

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی سیستم‌های انرژی

گرایش تکنولوژی انرژی

ساخت آب شیرین کن خورشیدی با استفاده از لوله‌های خلاء مجهز به انعکاس دهنده

نگارنده: معین غلامی

استاد راهنما

دکتر علی عباس نژاد

استاد مشاور

دکتر محمد ضامن

اسفندماه ۱۴۰۰

تقدیم اثر

خدای را بسی شاکرم ، مادر و پدری فداکار نصیبم ساخته که در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی همواره، یآوری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم برایم بوده‌اند.

تقدیم به وجود با ارزش‌تان...

که وجودشان شادی بخش و صفایشان مایه آرامش من است.

تشکر و قدردانی

انجام این پروژه را مدیون زحمات اساتید فرزانه ام، جناب آقایان دکتر ضامن و دکتر عباس نژاد هستم چراکه بدون راهنمایی‌های ایشان تامین این پایان‌نامه بسیار مشکل می‌نمود. لذا از زحمات ایشان تشکر می‌نمایم و طول عمر باعزت را برایشان از خداوند مسالت می‌نمایم.

معلما مقامت ز عرش برتر باد همیشه توسن اندیشه ات مظفر باد

و در پایان از تمام کسانی که (دوستان) در انجام این پروژه، موجب دلگرمی بنده بودند تشکر می‌نمایم.

تهدنامه

اینجانب معین غلامی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی سیستم‌های انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه "ساخت آب شیرین کن خورشیدی با استفاده از لوله‌های خلاء مجهز به انعکاس دهنده" تحت راهنمایی دکتر علی عباس نژاد و دکتر محمد ضامن متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

آب یکی از عناصر مهم کره زمین است که منابع شور آن بسیار زیاد و منابع شیرین آن بسیار کم و دسترسی به آنها سخت است. شیرین سازی آب شور دریاها و یا پساب ها، جایگزینی بسیار خوب برای جلوگیری از اتمام سریع آب های شیرین در دسترس است. فرآیندهای مرسوم شیرین سازی آب شور با مصرف بالای انرژی همراه هستند. برای جلوگیری از ایجاد آلودگی های زیست محیطی ناشی از مصرف انرژی فسیلی می توان از انرژی خورشیدی بهره برد. برای این منظور در این پژوهش، سیستم آب-شیرین کن از نوع تبخیری با استفاده همزمان از لوله خلاء مجهز به لوله گرمایی و انعکاس دهنده به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا حرارت جذب شده توسط لوله خلاء با استفاده از لوله گرمایی به محفظه تبخیرکننده منتقل و سپس بخار آب تولید شده با عبور از کویل مارپیچ داخل مخزن مبدل حرارتی، تقطیر شده و آب شیرین تولید خواهد شد. استفاده از دو انعکاس دهنده تخت و سهموی در کنار لوله بدون انعکاس دهنده مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین از دو سیال روغن و هوا به صورت مجزا به عنوان سیال پرکننده داخل لوله خلاء استفاده و نتایج آن بر تولید آب شیرین ثبت و مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش ها در دو حالت استفاده از شبیه ساز خورشیدی در محیط آزمایشگاه و آزمایش در محیط باز در فصل زمستان انجام شده است. نتایج با استفاده از شبیه ساز نشان داد استفاده از انعکاس دهنده تخت و سهموی در تابش زیاد به ترتیب ۳ و ۶ درصد و در تابش کم ۳۳ و ۶۷ درصد میزان تولید را افزایش می دهد. همچنین استفاده از سیال روغن داخل لوله خلاء به جای هوا تا ۶۴٪ درصد عملکرد تولید آب شیرین را بهبود می دهد. در انتها سیستم پیشنهادی آب گرمکن-آب شیرین کن خورشیدی بر اساس این روش که شامل ۴۰ عدد لوله خلاء با سیال روغن مجهز به لوله گرمایی و انعکاس دهنده تخت می باشد، پیشنهاد و ارایه گردیده است.

کلمات کلیدی: نمک زدایی، کلکتور لوله خلاء، لوله گرمایی، انعکاس دهنده سهموی، انعکاس -

دهنده صفحه تخت

فهرست مطالب

ی	فهرست جداول
ک	فهرست اشکال
م	فهرست علائم
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۱-۲ فرآیندهای شیرین سازی آب شور
۳	۱-۲-۱ فرآیندهای تک فاز (غشایی)
۵	۱-۲-۲ تغییر فاز (حرارتی)
۱۳	۱-۳ سیستم های حرارتی خورشیدی
۱۴	۱-۳-۱ انواع آبگرمکن های خورشیدی
۱۷	۱-۳-۲ انواع جاذب خورشیدی
۲۳	۱-۳-۳ جمع بندی
۲۵	فصل ۲: پیشینه تحقیق
۲۶	۲-۱ پیشینه تحقیق
۳۷	۲-۲ معرفی پژوهش حاضر و نوآوری طرح
۳۹	فصل ۳: روش ساخت و انجام آزمایش
۴۰	۳-۱ ساخت دستگاه
۴۰	۳-۱-۱ بخش تبخیر کننده

۴۲	۳-۱-۲ بخش انعکاس دهنده تابش
۴۴	۳-۱-۳ بخش تقطیرکننده
۴۵	۳-۲ آزمایش‌ها
۴۷	۳-۳ تجهیزات اندازه‌گیری
۴۷	۳-۳-۱ تابش سنج
۴۷	۳-۳-۲ دماسنج مدادی
۴۸	۳-۳-۳ دماسنج
۴۸	۳-۳-۴ ترازو دیجیتال
۴۹	۳-۴ نحوه انجام آزمایش

فصل ۴ : نتایج ۵۱

۵۲	۴-۱ بررسی تاثیر انعکاس دهنده‌ها با سیال هوا بر میزان تولید آب شیرین
۵۵	۴-۲ بررسی تاثیر انعکاس دهنده‌ها با سیال روغن بر میزان تولید آب شیرین
۶۰	۴-۳ نتایج آزمایش‌ها در محیط باز
۶۲	۴-۴ طرح پیشنهادی
۶۴	۴-۵ محاسبه عملکرد سیستم
۶۵	۴-۶ ارزیابی اقتصادی سیستم

فصل ۵ : نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۶۹

۷۰	۵-۱ نتیجه‌گیری
۷۱	۵-۲ پیشنهادها

مراجع ۷۲

فهرست جداول

جدول ۱-۳	مشخصات تجهیزات	۴۹
جدول ۱-۴	نتایج آزمایش‌های مقدماتی و نهایی در محیط باز	۶۳
جدول ۲-۴	هزینه‌های ساخت سیستم طراحی شده	۶۵
جدول ۳-۴	هزینه‌های مربوط به سهم آب شیرین کن	۶۶
جدول ۴-۴	مقایسه هزینه تولید هر لیتر آب شیرین	۶۷

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ انواع روش‌ها و تکنولوژی‌های شیرین‌سازی آب شور [۳] ۳
- شکل ۲-۱ شماتیک سیستم اسمز معکوس [۶] ۴
- شکل ۳-۱ شماتیک یک سیستم آب شیرین کن الکترودیالیز [۴] ۵
- شکل ۴-۱ شماتیک آب شیرین کن تقطیر چند اثره [۶] ۶
- شکل ۵-۱ شماتیک آب شیرین کن تبخیر ناگهانی چند مرحله‌ای [۶] ۷
- شکل ۶-۱ شماتیک سیستم ساده تراکم بخار مکانیکی MVC [۶] ۸
- شکل ۷-۱ شماتیک سیستم ساده تراکم بخار حرارتی TVC [۶] ۹
- شکل ۸-۱ شماتیک یک سیستم شیرین‌سازی MED-TVC [۶] ۹
- شکل ۹-۱ شیرین‌سازی به روش انجمادی FD [۱۴] ۱۰
- شکل ۱۰-۱ شماتیک ساده از یک سیستم آب شیرین کن HDH [۱۵] ۱۱
- شکل ۱۱-۱ دسته‌بندی انواع آب شیرین کن به روش HDH [۱۵] ۱۲
- شکل ۱۲-۱ شماتیک کلی از یک دستگاه آب شیرین کن تقطیر خورشیدی [۱۷] ۱۳
- شکل ۱۳-۱ سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی [۲۱] ۱۵
- شکل ۱۴-۱ شماتیکی از یک آبگرمکن خورشیدی کلکتور صفحه تخت ترموسیفون [۲۱] ۱۶
- شکل ۱۵-۱ اجزا آبگرمکن خورشیدی و انواع کلکتور آن [۲۱] ۱۷
- شکل ۱۶-۱ شماتیک ساده‌ای از یک متمرکز کننده دیش سهموی [۲۸] ۱۸
- شکل ۱۷-۱ شماتیک ساده‌ای از آبگرمکن خورشیدی با کلکتور PTC [۲۸] ۱۹
- شکل ۱۸-۱ شماتیک کلکتور صفحه تخت [۲۸] ۲۰
- شکل ۱۹-۱ شماتیک ساده‌ای از عملکرد یک لوله گرمایی Heat Pipe [۳۵] ۲۱
- شکل ۲۰-۱ شماتیک آبگرمکن خورشیدی لوله خلاء مجهز به لوله گرمایی [۳۵] ۲۲
- شکل ۱-۲ شماتیک مدل معرفی شده [۴۵] ۳۰
- شکل ۲-۲ شماتیک سیستم طراحی شده [۴۶] ۳۱
- شکل ۳-۲ شماتیک مدل طراحی و ساخته شده [۴۹] ۳۳
- شکل ۴-۲ شماتیک سیستم طراحی شده [۵۱] ۳۵
- شکل ۵-۲ مدل طراحی و ساخته شده [۵۲] ۳۶
- شکل ۶-۲ شماتیک سیستم ۳۷
- شکل ۱-۳ اجزا سیستم تبخیرکننده ۴۱
- شکل ۲-۳ اتصال نهایی بخش تبخیرکننده ۴۲
- شکل ۳-۳ الف) نگهدارنده انعکاس‌دهنده‌ها ب) نصب انعکاس‌دهنده‌ها بر روی سازه ۴۳

- شکل ۳-۴ (الف) مبدل حرارتی ب) جایگذاری مبدل در مخزن ۴۴
- شکل ۳-۵ نصب نهایی تجهیزات برای انجام آزمایش‌های محیط باز ۴۵
- شکل ۳-۶ دستگاه شبیه‌ساز خورشیدی ۴۶
- شکل ۳-۷ تابش‌سنج KIMO SL100 ۴۷
- شکل ۳-۸ دماسنج مدل TP-101 ۴۸
- شکل ۳-۹ دماسنج مدل SHD96A ۴۸
- شکل ۳-۱۰ ترازو مدل KS01 ۴۹
- شکل ۴-۱ بررسی مقدار تولید آب شیرین با سیال هوا در یک ساعت ۵۲
- شکل ۴-۲ مقدار انرژی منتقل شده به آب مخزن مبدل حرارتی در یک ساعت ۵۳
- شکل ۴-۳ روند افزایش دمای آب مخزن مبدل حرارتی بر حسب زمان در تابش 600 Wm^2 ۵۴
- شکل ۴-۴ روند افزایش دمای آب مخزن مبدل حرارتی بر حسب زمان در تابش 1200 Wm^2 ۵۴
- شکل ۴-۵ مقایسه مقدار تولید آب شیرین بین سیال هوا و روغن در حالت بدون انعکاس‌دهنده در یک ساعت ۵۵
- شکل ۴-۶ مقایسه مقدار تولید آب شیرین بین سیال هوا و روغن با انعکاس‌دهنده تخت در یک ساعت ۵۶
- شکل ۴-۷ مقایسه مقدار تولید آب شیرین بین سیال هوا و روغن با انعکاس‌دهنده سهموی در یک ساعت ۵۷
- شکل ۴-۸ مقدار انرژی منتقل شده به آب مخزن مبدل حرارتی در یک ساعت با سیال روغن ۵۷
- شکل ۴-۹ روند افزایش دمای آب مخزن مبدل حرارتی بر حسب زمان در تابش 600 Wm^2 ۵۸
- شکل ۴-۱۰ روند افزایش دمای آب مخزن مبدل حرارتی بر حسب زمان در تابش 1200 Wm^2 ۵۹
- شکل ۴-۱۱ نمودار تابش و دمای محیط بر حسب زمان ۶۰
- شکل ۴-۱۲ دمای آب و تولید لحظه‌ای (نیم ساعته) آب با استفاده از انعکاس‌دهنده تخت و سهموی بر حسب زمان ۶۱
- شکل ۴-۱۳ دمای آب و تولید تجمعی آب با استفاده از انعکاس‌دهنده تخت و سهموی بر حسب زمان ۶۱
- شکل ۴-۱۴ شماتیک طرح پیشنهادی ۶۲
- شکل ۴-۱۵ شماتیک انعکاس‌دهنده‌ها برای سیستم پیشنهادی ۶۴

فهرست علائم

پارامتر	واحد	توضیحات
A_a	m^2	مساحت جاذب
A_c	m^2	مساحت کلکتور خورشیدی
C	\$	هزینه سرمایه گذاری (اولیه)
C_p	$\frac{J}{kg \cdot K}$	ظرفیت گرمایی ویژه
D	M	عرض
h_{fg}	$\frac{kJ}{kg}$	آنتالپی تبخیر
I	$\frac{W}{m^2}$	انرژی تابش
L	M	طول
m	kg	جرم آب مخزن مبدل حرارتی
m_d	kg	جرم آب شیرین شده
OC	\$	هزینه تعمیر و نگهداری
P_{daily}	L	تولید روزانه
Q_{input}	kJ	انرژی ورودی به سیستم
Q_{con}	kJ	انرژی آب مخزن مبدل حرارتی
Q_{out}	kJ	انرژی خروجی از سیستم
R	%	نرخ بهره بانکی
t	Year	عمر مفید سیستم
T	°C	دما

فصل ۱ : مقدمه

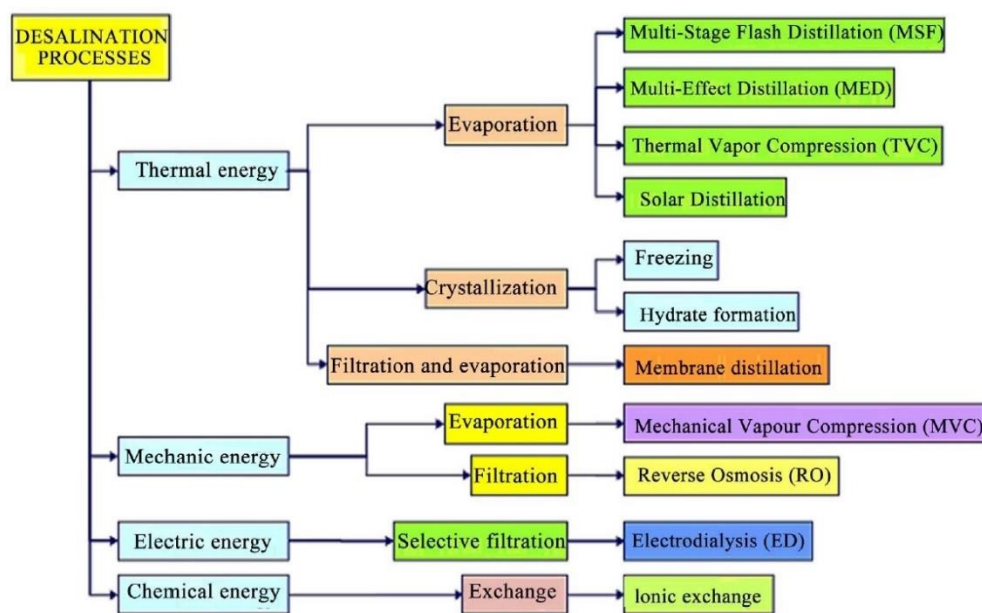
۱-۱ مقدمه

با توجه به رشد جمعیت و افزایش سرانه مصرف آب، دسترسی به آب آشامیدنی در تمام کشورها روز به روز در حال کاهش است. بیشترین بیماری‌های انسانی ناشی از منابع آب آلوده یا تصفیه نشده است. امروزه نیز کشورهای توسعه‌یافته و کشورهای در حال توسعه به دلیل عملکردهای برنامه‌ریزی نشده و ایجاد آلودگی ناشی از فعالیت‌های صنعتی با کمبود شدید آب مواجه هستند. انتظار می‌رود کمبود آب آشامیدنی به دلیل نرخ صعودی مصرف و رشد جمعیت، بزرگترین مشکل جهان در قرن حاضر باشد. آلودگی منابع آب شیرین (رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و آب‌های زیرزمینی) توسط پساب‌های صنعتی این مشکل را افزایش داده است. مجموع ذخیره آب‌های جهانی حدود $1/4$ میلیارد کیلومتر مکعب است. اقیانوس‌ها حدود $97/5\%$ از کل مقدار را تشکیل می‌دهند و $2/5\%$ باقیمانده متشکل از آب شیرین موجود در جو، یخ‌های قطبی و آب‌های زیرزمینی است. این به آن معنی است که تنها حدود $0/014\%$ به طور مستقیم در دسترس انسان و سایر موجودات کره زمین است [۱].

بنابراین توسعه منابع جدید آب شیرین بسیار مهم و الزامی است. نمک‌زدایی آب دریاها و یا پساب‌ها جایگزینی بسیار خوب برای جلوگیری از اتمام سریع آب‌های شیرین در دسترس است. افزون بر بحران کمبود آب شیرین در قرن حاضر، تامین انرژی هم مشکلی دیگر بر سر راه است. فرآیندهای نمک‌زدایی مقدار قابل توجهی انرژی مصرف می‌کند. تخمین زده شده است که تولید یک میلیون متر مکعب آب در روز برای یک سال به حدود ۱۰ میلیون تن نفت خام نیاز دارد [۲]. لازم به ذکر است که فرآیندهای نمک‌زدایی آب در انواع مختلفی توسعه یافته است که در ادامه به بررسی انواع آن پرداخته خواهد شد.

۱-۲ فرآیندهای شیرین‌سازی آب شور

فرآیندهای نمک‌زدایی از لحاظ انرژی به چهار دسته‌ی حرارتی، مکانیکی، الکتریکی و شیمیایی تقسیم بندی می‌شود که شکل ۱-۱ انواع مختلف آن را با جزئیات دسته بندی کرده و نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ انواع روش‌ها و تکنولوژی‌های شیرین‌سازی آب شور [۳]

به طور کلی می‌توان فرآیندهای شیرین‌سازی آب را به دو بخش تقسیم کرد: فرآیندهای تک فاز (غشایی) و فرآیندهای دو فازی (حرارتی).

۱-۲-۱ فرآیندهای تک فاز (غشایی)

غشاهای مورد استفاده در این فرآیند در دو سیستم شیرین‌سازی اسمز معکوس^۱ (RO) و الکترودیالیز^۲ (ED) استفاده می‌شوند.

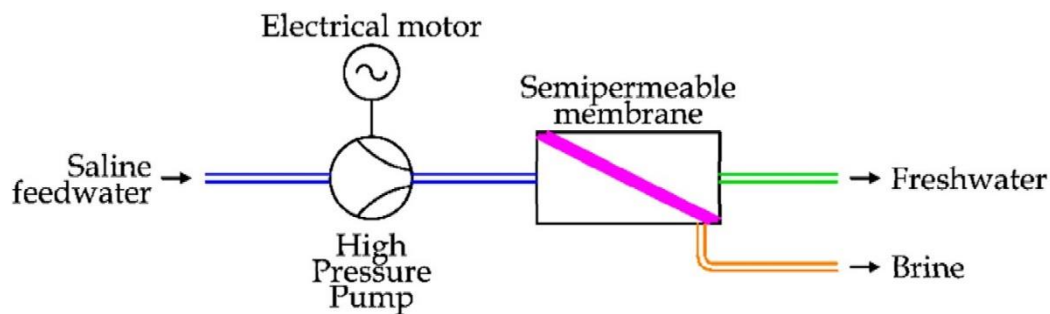
۱-۲-۱-۱ شیرین‌سازی به روش اسمز معکوس (RO)

اسمز معکوس یک فناوری شیرین‌سازی آب شور است که از غشاهای پلیمری استفاده می‌نماید. این غشاها از لایه‌های خاصی ساخته شده‌اند که تنها مولکول‌های آب امکان عبور از آن را دارند. به این صورت که با ایجاد یک فشار خارجی که توسط پمپ ایجاد می‌شود، آب شور در یک سمت غشا جریان یافته و با عبور مولکول‌های آب از غشا مابقی مواد موجود مانند نمک، مواد معدنی و آلی و ... در همان

^۱Reverse Osmosis

^۲Electro Dialysis

سمت غشا باقی خواهد ماند. معمولاً برای شیرین‌سازی آب شور و لب شور، فشار ۱۵ تا ۲۵ بار و برای آب دریا ۵۴ تا ۸۰ بار اعمال می‌شود [۴، ۵]. با در نظر گرفتن فشارهای کاری سیستم اسمز معکوس مشخص است که این سیستم برای ایجاد فشارهای بالا در پشت غشا به مقادیر قابل توجهی انرژی الکتریکی یا مکانیکی نیاز دارد که البته در مقایسه با دیگر روش‌های نم‌زدایی شدت مصرف انرژی پایینی دارد. مشکل این روش تکنولوژی بالای ساخت غشاهای آن است که در اختیار چند کشور قرار دارد. همچنین می‌توان گفت اسمز معکوس جزو دسته سیستم‌های شیرین‌سازی فشار بالا است. در شکل زیر شماتیک از یک سیستم ساده‌ی اسمز معکوس را می‌توانید مشاهده کنید.



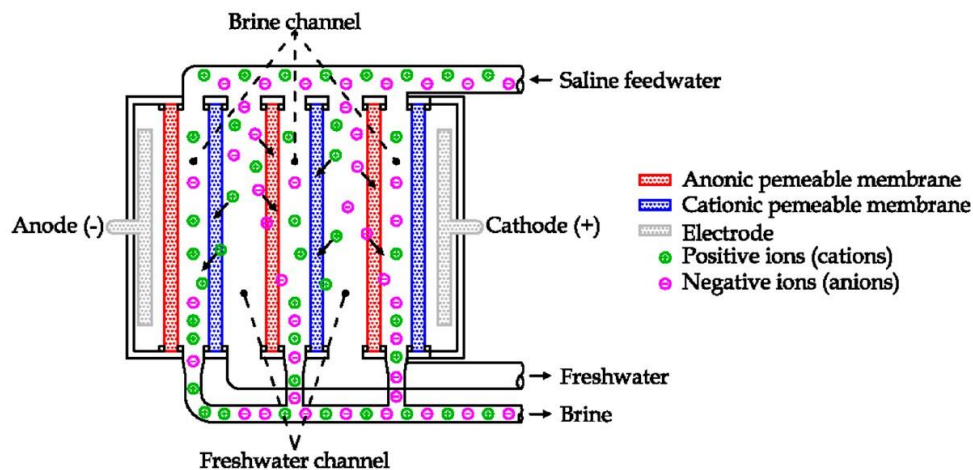
شکل ۱-۲ شماتیک سیستم اسمز معکوس [۶]

۱-۲-۱-۲ شیرین‌سازی به روش الکترو دیالیز (ED)

این روش در واقع شیرین‌سازی به روش الکتروشیمیایی است. در این روش با استفاده از غشاهای نیمه نفوذپذیر و ایجاد میدان الکتریکی برای حذف یون‌های محلول از سیال، عمل شیرین‌سازی رخ می‌دهد. روش کار این سیستم به این صورت است که میدان الکتریکی به وسیله‌ی دو الکترود با جریان DC ایجاد می‌شود. بدیهی است که هر یون دارای بار الکتریکی مثبت یا منفی است، پس با توجه به میدان الکتریکی ایجاد شده توسط الکترودها، تمام یون‌های موجود در آب تحت تاثیر این میدان به سمت آند و کاتد جذب می‌شوند.

غشاهای نیمه نفوذپذیر آنیونی و کاتیونی در ناحیه بین دو الکترود نصب می‌شوند. کاتیون‌ها از جمله یون‌های مثبت مانند Na و Ca توسط آند و آنیون‌ها از جمله یون‌های منفی مانند Cl، HCO₃،

CO توسط کاتد جذب می‌شوند. نهایتاً یون‌ها در داخل کانال‌های آب شور متوقف و از کانال‌های آب شیرین حذف می‌شوند [۷، ۸]. از این روش شیرین‌سازی می‌توان برای آب‌های شور تا ۲۰۰۰ ppm استفاده کرد [۹]. در شکل زیر می‌توانید مدلی ساده از یک سیستم آب شیرین کن به روش الکترودیالیز را مشاهده کنید.



شکل ۳-۱ شماتیک یک سیستم آب شیرین کن الکترودیالیز [۴]

۱-۲-۲ تغییر فاز (حرارتی)

در این فرآیند ممکن است از یک منبع انرژی حرارتی، مانند سوخت‌های فسیلی، انرژی هسته‌ای یا انرژی خورشیدی برای تبخیر آب استفاده شود. فرآیندهای شیرین‌سازی آب به روش تغییر فاز شامل: تقطیر چند اثره (MED)، تبخیر ناگهانی چند مرحله‌ای (MSF)، تراکم بخار (VC)، تقطیر انجمادی (FD)، رطوبت زنی و رطوبت زدایی (HDH) و تقطیر حوضچه‌ای (SSD) است.

^۱Multi Effect Distillation

^۲Multi Stage Flash

^۳Vapor Compression

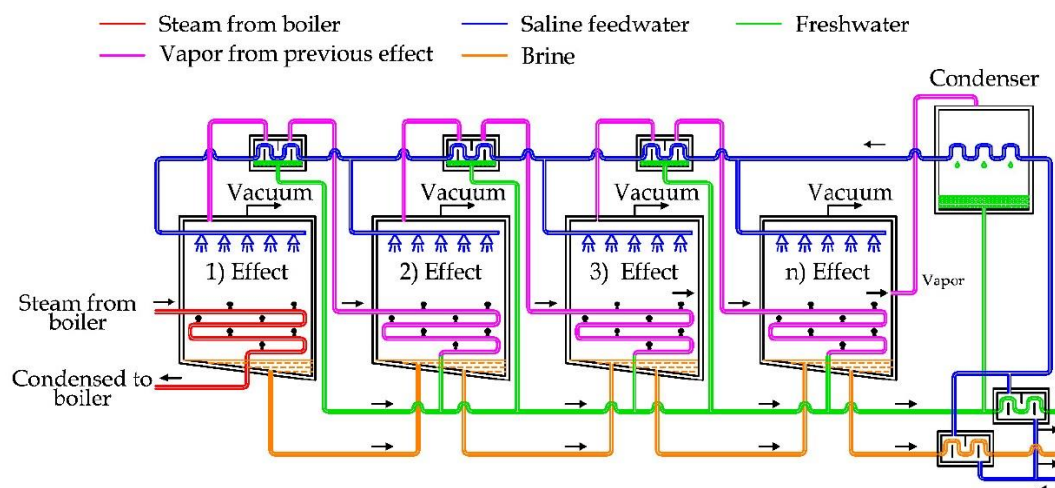
^۴Freezing Distillation

^۵Humidification-Dehumidification

^۶Solar Still Distillation

۱-۲-۲-۱ شیرین سازی به روش تقطیر چند اثره (MED)

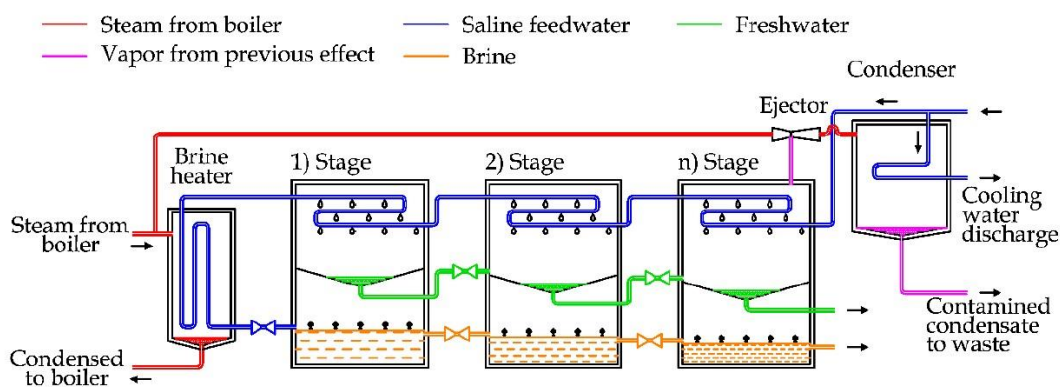
در شکل ۴-۱ شماتیک یک سیستم آب شیرین کن MED مشاهده می شود. مطابق شکل این روش از چندین محفظه تحت خلا تشکیل شده است. نخستین مرحله دارای بالاترین دما و فشار است و به ترتیب مراحل بعدی دما و فشار پایین تری دارند. آب شور بر روی لوله ها پاشش می شود و بخار تولید شده وارد مرحله بعدی می شود و در آنجا چگالیده می شود. بخار فشار پایین در مرحله اول انرژی مورد نیاز این مرحله را تامین می نماید. با توجه به هزینه بالای انرژی در دنیا، برای کاهش مصرف انرژی، بخار مورد نیاز معمولا از یک توربین بخار در داخل یک نیروگاه گرفته و یا از یک منبع بازیافت انرژی در فرآیندهای صنعتی بازیابی می شود. از آنجایی که بخار اولیه در تماس مستقیم با آب شور نیست و گرمای مورد نیاز از طریق مبدل به آب شور منتقل می شود، میعانات داخل اواپراتور معمولا برای استفاده مجدد به دیگ داخل نیروگاه منتقل خواهد شد [۴]. بازده انرژی سیستم های MED به تعداد چند اثره بودن آن بستگی دارد که معمولا بین ۴ تا ۲۱ عدد می باشد [۷]. آب شیرین کن های MED با ظرفیت تولید آب شیرین از ۲۰۰۰ تا ۲۰,۰۰۰ متر مکعب در روز ساخته می شوند [۱۰].



شکل ۴-۱ شماتیک آب شیرین کن تقطیر چند اثره [۶]

۱-۲-۲-۲ شیرین سازی به روش تبخیر ناگهانی چند مرحله ای (MSF)

در این روش مانند روش MED از چندین محفظه به صورت متوالی استفاده شده است که در هر محفظه خلا نسبی وجود دارد. مطابق شکل ۵-۱، اولین محفظه دارای بیشترین دما و فشار و محفظه های بعدی دارای دما و فشار پایین تری هستند. در هر محفظه با ورود آب گرم به دلیل وجود خلا نسبی تبخیر ناگهانی رخ می دهد. بر خلاف روش MED بخار ایجاد شده در همان محفظه از روی لوله های سرد عبور کرده و چگایده می شود. در این روش تعدادی پمپ هم استفاده می شود که باید برق مورد نیاز آنها هم فراهم شود. از روش MSF معمولاً در کشتی ها و در امتداد خط ساحلی در مناطق مختلفی از جمله آمریکا، کره و خاورمیانه برای تولید آب شیرین از آب دریا استفاده می شود [۱۱]. این روش می تواند در حدود ۴۰۰۰ تا ۵۷۰۰۰ متر مکعب در روز آب شیرین تولید کند که نیاز به حرارت با دمای ۹۰ تا ۱۱۰ درجه سلسیوس دارد [۴].



شکل ۵-۱ شماتیک آب شیرین کن تبخیر ناگهانی چند مرحله ای [۶]

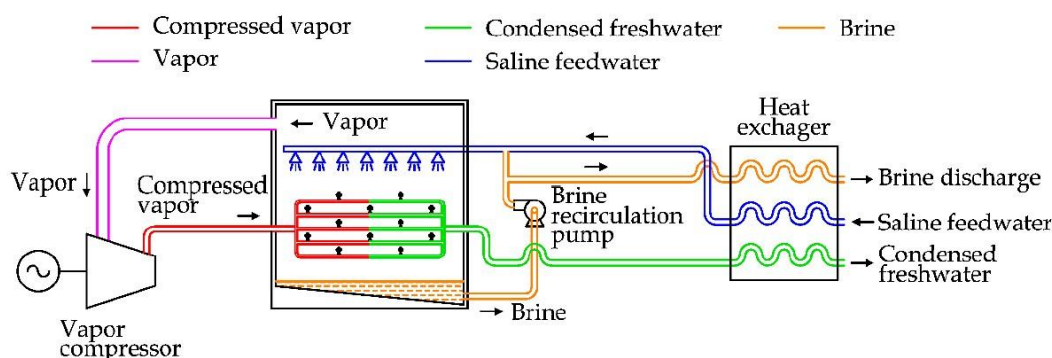
۱-۲-۲-۳ شیرین سازی به روش تراکم بخار (VC)

روش تراکم بخار در بین روش های دوفازی، ظرفیت پایین تری نسبت به دو روش قبلی گفته شده دارد. روش تراکم بخار خود به دو نوع ^۱MVC و ^۲TVC تقسیم می شود. در شکل زیر می توانید شماتیک یک سیستم ساده تراکم بخار مکانیکی را مشاهده کنید.

^۱Mechanical Vapor Compression

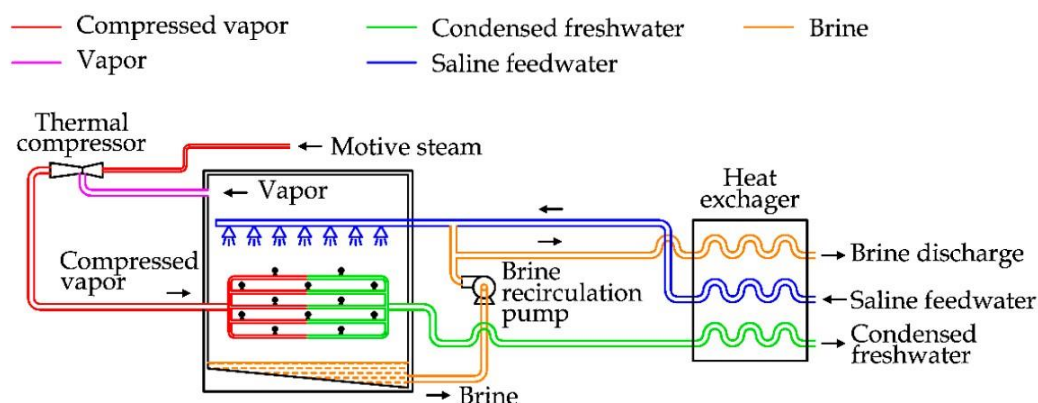
^۲Thermal Vapor Compression

مطابق شکل ۶-۱، در روش تراکم بخار مکانیکی از یک کمپرسور مخصوص بخار برای استحصال و هدایت بخار تولید شده در داخل محفظه اصلی سیستم استفاده می‌شود. در اثر فشرده شدن بخار توسط کمپرسور، دمای بخار افزایش می‌یابد، به طوری که با استفاده از مبدل حرارتی، گرمای خود را به آب شور داخل محفظه انتقال داده و باعث تولید بخار می‌شود. برای بالا بردن راندمان و استفاده بهینه از انرژی و گرمای موجود در بخار مبدلی برای بازیافت انرژی در انتهای سیستم وجود دارد که آب شور ورودی را پیش گرم می‌کند [۱۲]. آب شور ورودی پس از پیش گرم شدن وارد محفظه اصلی سیستم شده و از طریق نازل‌های تعبیه شده روی مبدل پاشیده می‌شود. با توجه به این موضع برآورد شده است که یک واحد کوچک MVC می‌تواند بین ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ متر مکعب در روز آب شیرین تولید کند.



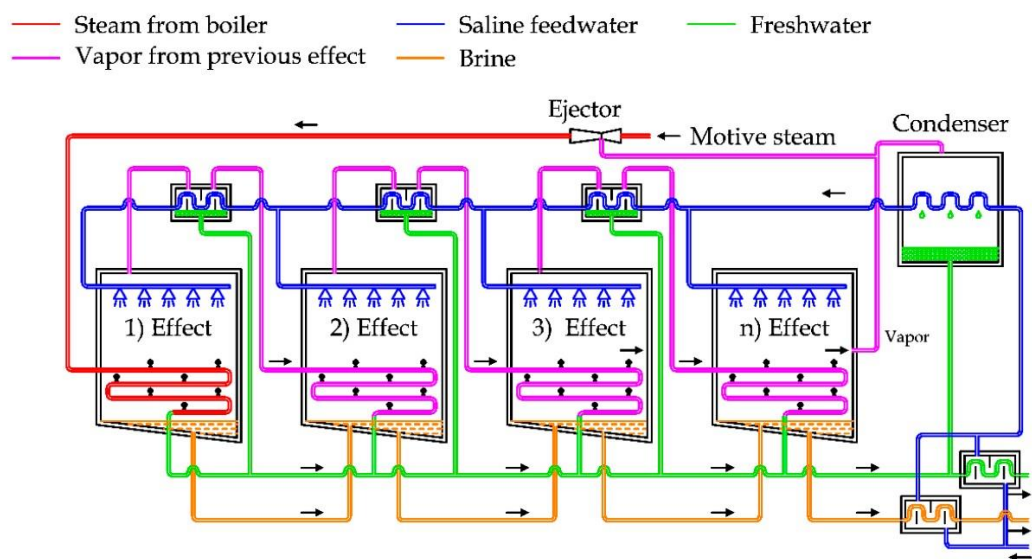
شکل ۶-۱ شماتیک سیستم ساده تراکم بخار مکانیکی MVC [۶]

نوع دیگر این سیستم که تراکم بخار حرارتی یا TVC نام دارد کاملاً مشابه نوع قبلی است با این تفاوت که دیگر برای افزایش فشار بخار از کمپرسور استفاده نمی‌شود. در نوع TVC از این سیستم، با استفاده از یک کمپرسور حرارتی که با بخار فشار بالا که معمولاً از یک نیروگاه تامین می‌شود، بخار داخل محفظه را فشرده و مانند روش قبل وارد چرخه می‌کند. نوع حرارتی این سیستم، هم به انرژی حرارتی برای متراکم کردن بخار و هم الکتریکی برای مصرف پمپ‌های گردش آب سیستم نیاز دارد. شماتیک سیستم تراکم بخار حرارتی در شکل زیر قابل مشاهده است.



شکل ۷-۱ شماتیک سیستم ساده تراکم بخار حرارتی TVC [۶]

گاهی برای افزایش تولید آب شیرین و راندمان، این روش با سیستم‌های MED کوپل شده و سیستمی ترکیبی که به آن MED-TVC می‌گویند ایجاد می‌کند که قابلیت تولید آب شیرین به مقدار ۱۰,۰۰۰ تا ۳۰,۰۰۰ متر مکعب در روز را دارد. در شکل زیر می‌توانید ترکیب این دو سیستم را به صورت شماتیک مشاهده کنید [۱۳].



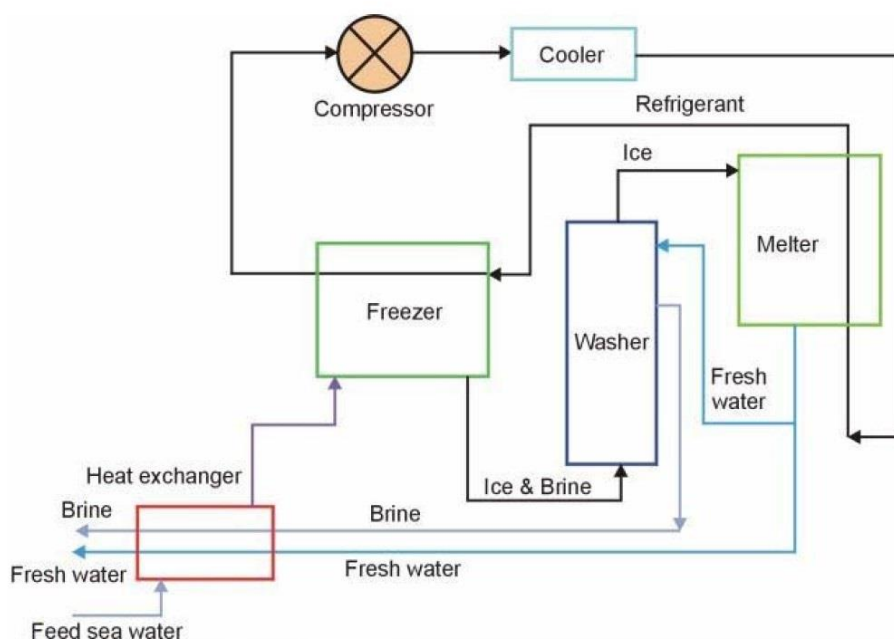
شکل ۸-۱ شماتیک یک سیستم شیرین‌سازی MED-TVC [۶]

۴-۲-۱-۲ شیرین‌سازی به روش تقطیر انجمادی (FD)

نمک‌زدایی با روش انجماد بر این اساس است که کریستال‌های یخ اساساً از آب خالص تشکیل می‌شوند. به طور کلی این روش از سه مرحله‌ی تشکیل یخ، تمیز کردن یخ و ذوب کردن یخ تشکیل شده

است. برای رسیدن به آب شیرین باید کریستال‌های یخ از آب شور جدا شوند. سپس اقدام به جداسازی نمک‌های چسبیده روی کریستال‌ها شود و نهایتاً کریستال‌های یخ که عاری از نمک هستند، ذوب شوند تا آب شیرین حاصل شود. در مقایسه با سایر فرآیندهای نمک‌زدایی، بخصوص فرآیندهایی که با تقطیر همراه است، این فرآیند مزایای زیادی نسبت به آنها دارد.

روش FD به دلایل متعددی مانند نیاز به انرژی کم، نداشتن مشکل رسوب و خوردگی یا پوسته پوسته شدن لوله‌های سیستم و ورود آب شور به سیستم بدون پیش تصفیه دارای راندمان بالایی است. لازم به ذکر است که برای تبخیر ۱ کیلوگرم آب، تقریباً ۶۰۰ کیلوکالری انرژی مورد نیاز است ولی در روش تقطیر انجمادی از نظر تئوری برای انجماد ۱ کیلوگرم آب، فقط نیاز است از آب حدود ۸۰ کیلوکالری حرارت گرفته شود [۱۴].

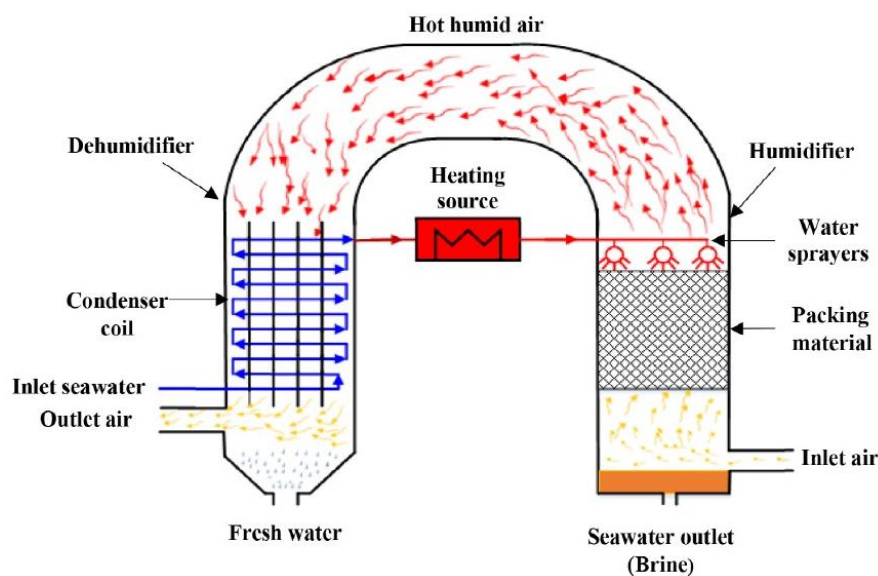


شکل ۹-۱ شیرین‌سازی به روش انجمادی FD [۱۴]

۵-۲-۱ شیرین‌سازی به روش رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی (HDH)

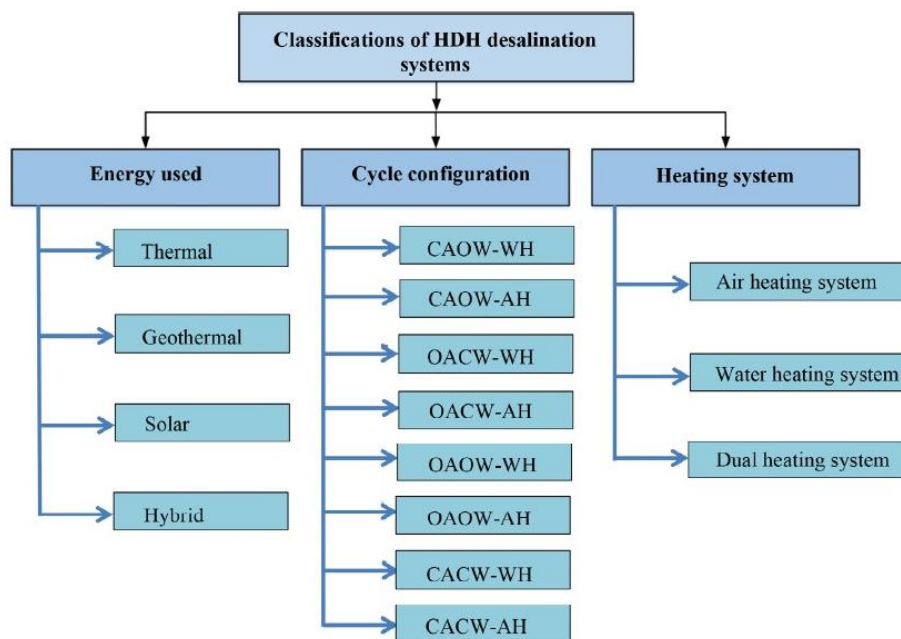
می‌توان گفت این روش جزو روش‌های جدید جهت شیرین‌سازی آب شور است. همانطور که از اسم آن پیداست، این سیستم شامل دو جزء اصلی که یکی رطوبت‌زنی جهت ایجاد رطوبت در سیستم و

دیگری رطوبت‌زدایی (کندانسور) جهت تقطیر رطوبت سیستم است. اساس کار این سیستم به این صورت است که در بخش رطوبت‌زنی آب شور ورودی بر روی پکینگ پاشش می‌شود و جریان هوای عبوری از روی آن مرطوب می‌شود. زمانی که مولکول‌های آب تبخیر می‌شوند تمام نمک‌ها، املاح و... در جریان آب باقی می‌ماند و از سیستم خارج می‌شود. پس از آن هوای مرطوب به بخش رطوبت‌گیری هدایت شده تا در آنجا سرد و بخار آن چگالیده شده و آب شیرین حاصل شود [۱۵]. شکل زیر شماتیک ساده ای از یک سیستم رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۰ شماتیک ساده از یک سیستم آب شیرین کن HDH [۱۵]

یکی از مزایای این روش این است که تمام انرژی حرارتی مورد نیاز برای کار سیستم را می‌توان از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی زمین گرمایی و انرژی خورشیدی و ... به دست آورد [۶]. آب شیرین کن‌های HD انواع مختلفی از نظر منبع انرژی، چرخه کاری و سیستم گرمادهی دارند که در شکل زیر به تفکیک دسته بندی شده‌اند.



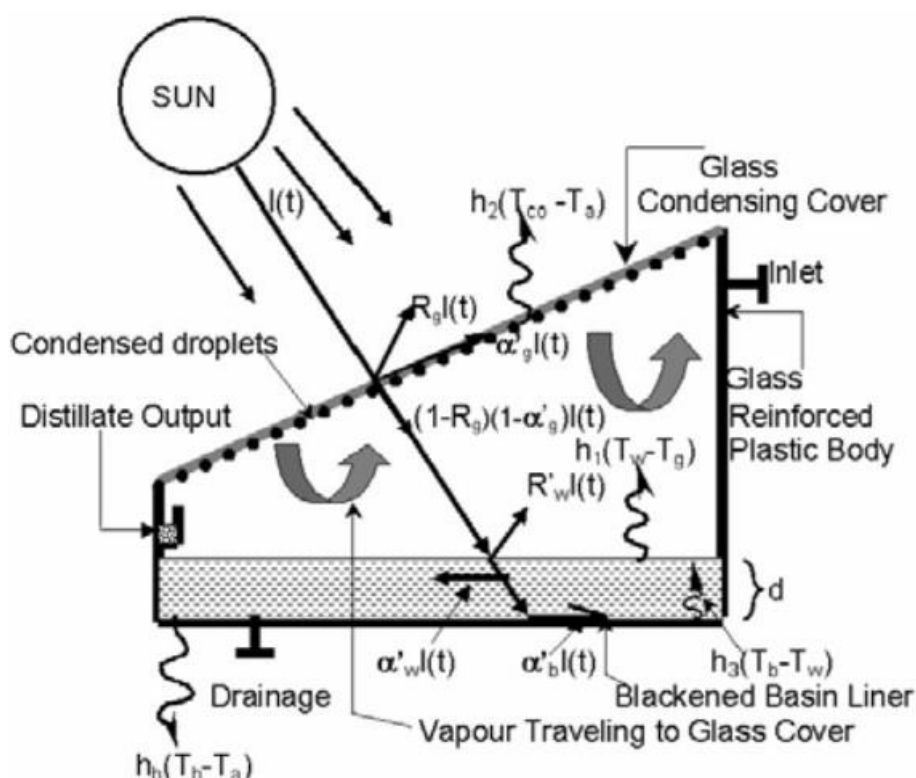
شکل ۱-۱۱ دسته‌بندی انواع آب شیرین کن به روش HDH [۱۵]

۶-۲-۱-۲ شیرین‌سازی به روش تقطیر خورشیدی (حوضچه‌ای-SSD)

این روش با استفاده از تابش خورشید و یک حوضچه که آب شور درون آن قرار می‌گیرد عمل شیرین‌سازی را انجام می‌دهد. به این صورت که سطحی شیشه‌ای بر روی حوضچه به حالت شیب دار قرار می‌گیرد، تابش خورشید باعث گرم و سپس تبخیر آب شور درون حوضچه می‌شود و نهایتاً بخار تولید شده بر روی سطح شیشه‌ای تقطیر شده و از محل تعبیه شده مخصوص خارج می‌شود. آب مقطر تولید شده دارای کیفیت تقطیر بسیار بالا و به طور کلی قابل شرب است و تمام نمک، اجزای معدنی و آلی از آن جدا و در حوضچه باقی مانده‌اند.

البته عوامل مختلفی مانند: تابش خورشید، ارتفاع آب در حوضچه، سرعت باد و دمای محیط بر روی عملکرد این روش بسیار تاثیر گذار است. در تحقیقات اکثر محققین، حتی در بهترین شرایط کاری سیستم، بازده گزارش شده با این روش از نوع تک حوضچه‌ای در محدوده ۳۰-۴۵٪ با تولید آب شیرین کمتر از ۵ لیتر بر متر مربع در روز بوده است [۱۶، ۶].

^۱O=Open, C=Close, W=Water, A=Air, H=Heater



شکل ۱۲-۱ شماتیک کلی از یک دستگاه آب شیرین کن تقطیر خورشیدی [۱۷]

۳-۱ سیستم‌های حرارتی خورشیدی

به دلیل هزینه بالای منابع انرژی متعارف و ضرر آن‌ها برای محیط زیست، منابع انرژی تجدیدپذیر بخصوص انرژی خورشیدی برای اکثر کشورها مورد توجه قرار گرفته است. انرژی خورشیدی کاربرد-های مختلفی از جمله انرژی الکتریکی و حرارتی دارد. انرژی الکتریکی به شدت در دنیا در حال گسترش و انرژی حرارتی که خود شامل مقیاس نیروگاهی و خانگی مانند آبگرمکن‌های خورشیدی بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

انرژی حرارتی خورشید در بین بقیه انرژی‌های تجدیدپذیر بیشترین فراوانی را دارد که می‌توان آن را به صورت مستقیم و غیرمستقیم استفاده کرد. خورشید با نرخ $10^{23} \times 3/8$ کیلووات انرژی خود را منتشر می‌کند که تقریباً $10^{14} \times 1/8$ کیلووات آن با جو زمین که در حدود ۱۵۰ میلیون کیلومتری خورشید قرار دارد، برخورد می‌کند. حدود ۶۰ درصد از این مقدار که برابر است با $10^{14} \times 1/0.8$

کیلووات به سطح زمین می‌رسد. اگر حدود ۰/۱٪ از انرژی‌ای که به سطح زمین رسیده است را تنها با راندمان ۱۰٪ تبدیل به حالتی از انرژی قابل مصرف کنیم، در حدود ۳۰۰۰ گیگاوات که چهار برابر ظرفیت تولید برق کل زمین است، به دست می‌آید. همچنین مجموع تشعشعات خورشیدی سالانه بر سطح زمین بیش از ۷۵۰۰ برابر کل مصرف انرژی اولیه سالانه زمین می‌باشد که برابر ۴۵۰ اگزاژول است. مقدار تابش سالانه خورشید که به سطح زمین می‌رسد، به طور تقریبی ۳،۴۰۰،۰۰۰ اگزاژول است که چیزی بیشتر از تمام منابع انرژی تجدید ناپذیر (کشف شده و کشف نشده) از جمله سوخت-های فسیلی و هسته‌ای است. با این حال متأسفانه حدود ۸۰ درصد از انرژی مورد استفاده در سراسر جهان از سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود [۱۸]. روش‌ها و سیستم‌های مختلفی برای استحصال و استفاده از انرژی حرارتی خورشید وجود دارد که یکی از آن‌ها آبگرمکن‌های خورشیدی است که در ادامه به بررسی انواع آنها می‌پردازیم.

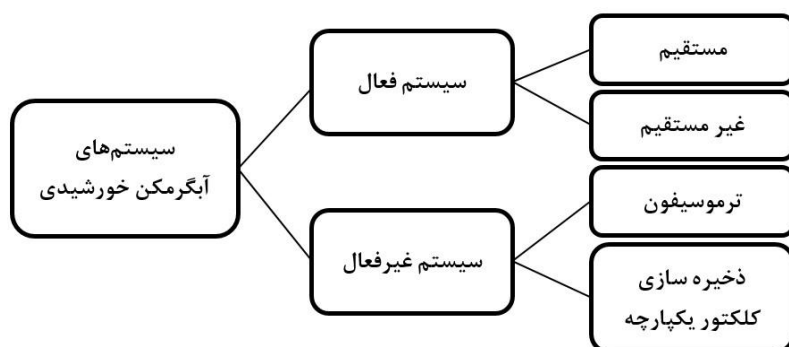
۱-۳-۱ انواع آبگرمکن‌های خورشیدی

آبگرمکن خورشیدی یکی از سیستم‌های دریافت انرژی حرارتی خورشید است که معمولاً بیشترین کاربرد آن در بخش خانگی است. این سیستم به طور معمول در یا پشت بام، جایی که نور خورشید در دسترس است نصب می‌شود و با تابش نور خورشید آب را در طول روز گرم می‌کند. سپس آب گرم در یک مخزن دارای عایق ذخیره شده و برای مصارف خانگی، مخصوصاً در طول روز بسیار مناسب است. آبگرمکن‌های خورشیدی انرژی را از طریق سطح جذبی که با موادی خاص که جاذب انرژی خورشید هستند پوشانده شده است دریافت و به سیال داخلی خود که می‌تواند آب، آب به همراه ضد یخ، روغن یا هوا باشد منتقل می‌کند. آبگرمکن‌های خورشیدی را می‌توان به دو دسته سیستم فعال^۱ و سیستم غیرفعال^۲ طبقه بندی کرد [۱۹]. در سیستم فعال، سیال داخلی سیستم می‌تواند مستقیماً آب

^۱Active System

^۲Passive System

مصرفی باشد که به آن سیستم مستقیم^۱ گفته می‌شود و یا ممکن است یک سیال واسط برای انتقال حرارت (مانند اتیلن گلیکول، روغن یا ترکیبی از آب) باشد که برای انتقال حرارتش به آب مصرفی از نوعی مبدل حرارتی به وسیله یک پمپ عبور داده می‌شود که به آن سیستم غیرمستقیم^۲ گفته می‌شود. سیستم غیرفعال نیز به دو دسته ترموسیفون و ذخیره سازی کلکتور یکپارچه^۳ تقسیم بندی می‌شوند [۲۰].



شکل ۱-۱۳ سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی [۲۱]

می‌توان گفت تقریباً تمام آبگرمکن خورشیدی مورد استفاده در آب و هوای معتدل سیستم‌های فعالی هستند که برای گردش سیالات انتقال حرارت از پمپ استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها معمولاً از کلکتورهای صفحه تخت^۴ یا کلکتورهای لوله خلاء^۵ استفاده می‌کنند که هم تابش پراکنده و هم مستقیم خورشید را جذب می‌کنند و حتی در مواقعی که آسمان ابری است باز هم آب را گرم می‌کنند [۲۲]. البته در خیلی از نقاط هم از پمپ استفاده نمی‌شود و سیستم به حالت ترموسیفون کار کرده که باعث می‌شود جزو سیستم‌های غیر فعال قرار بگیرند. ساده بودن سیستم و هزینه کم این آبگرمکن‌ها باعث می‌شود برای کاربردها با دمای زیر ۸۰ درجه سانتیگراد بسیار مناسب باشد [۲۳]. راندمان حرارتی آبگرمکن‌های خورشیدی مستقیم در مقایسه با سیستم تبدیل الکتریسته خورشیدی

^۱Direct System

^۲Indirect System

^۳Integral Collector Storage (ICS)

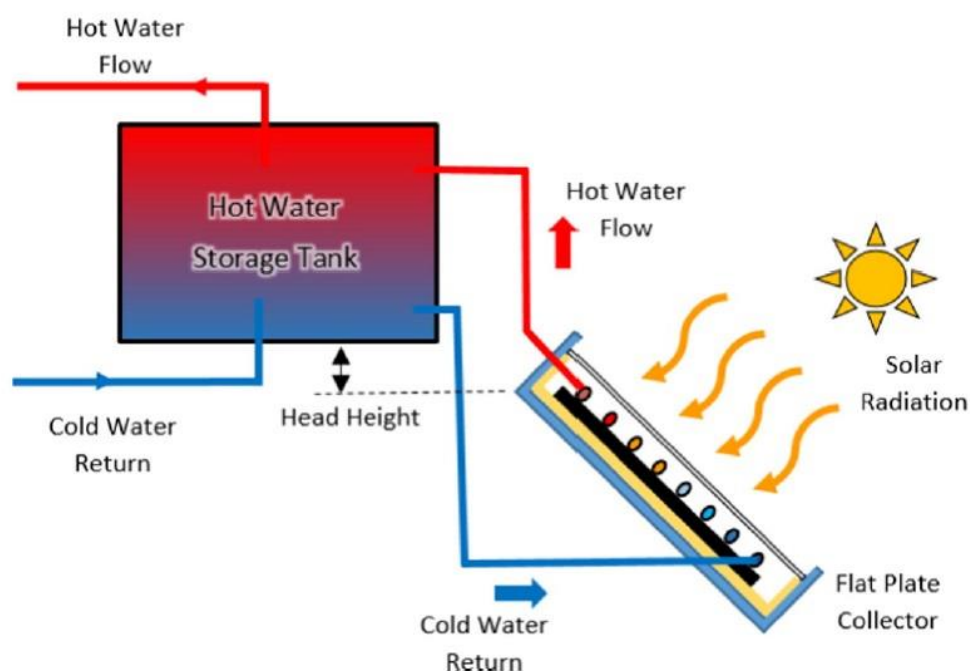
^۴Flat Plates Collectors (FPC)

^۵Evacuated Tube Collectors (ETC)

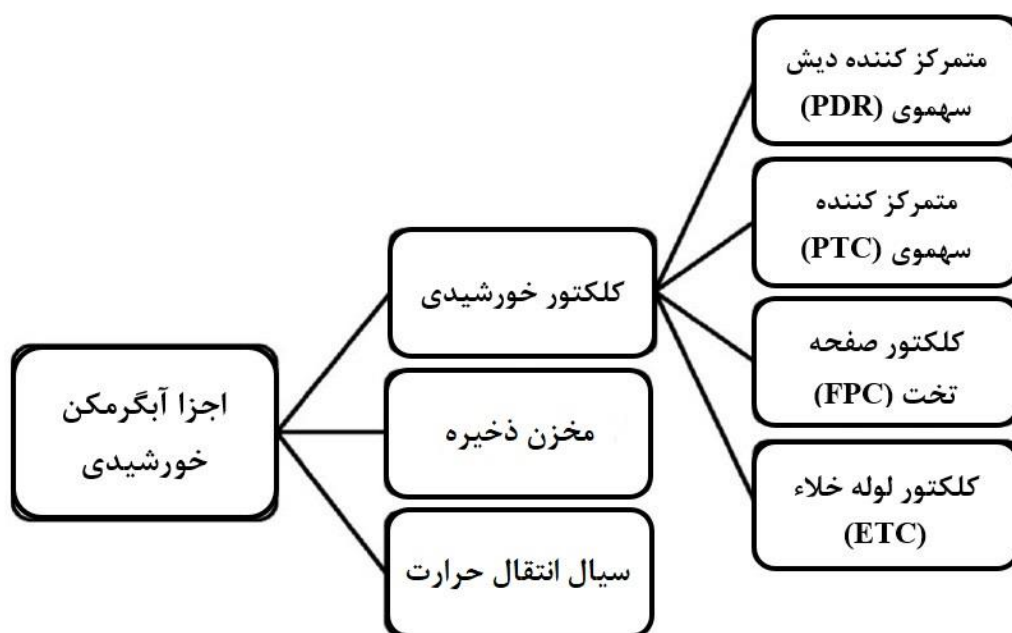
به حرارتی که بازدهی تنها ۱۷ درصد دارد، حدود ۷۰ درصد است [۲۴].

در شکل زیر شماتیکی از یک سیستم غیرفعال آبگرمکن خورشیدی از نوع ترموسیفون با کلکتور صفحه تخت را مشاهده می‌کنید.

به طور کلی آبگرمکن‌های خورشیدی از چند جزء اصلی شامل صفحه جذب کننده تابش خورشید، مخزن ذخیره آب و سیال انتقال حرارت تشکیل شده‌اند. البته علاوه بر این موارد چند قطعه دیگر مانند پمپ (در سیستم فعال)، گرمایش کمکی، مبدل حرارتی و خطوط لوله‌کشی وجود دارد. در شکل زیر می‌توانید اجزا سیستم و انواع کلکتور خورشیدی را مشاهده کنید.



شکل ۱-۱۴ شماتیکی از یک آبگرمکن خورشیدی کلکتور صفحه تخت ترموسیفون [۲۱]



شکل ۱-۱۵ اجزا آبرمکن خورشیدی و انواع کلکتور آن [۲۱]

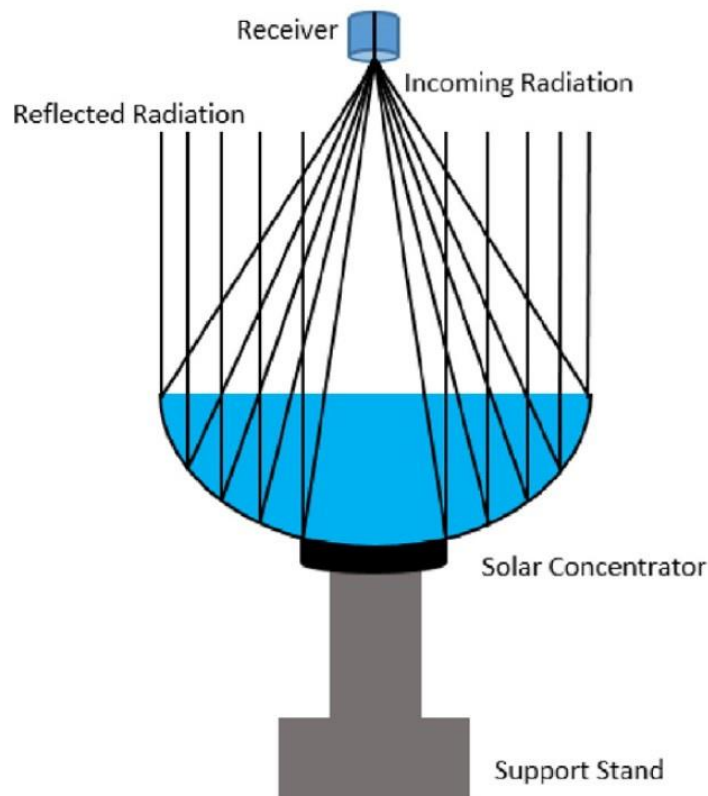
۲-۳-۱ انواع جاذب خورشیدی

از لحاظ سطح جاذب دو نوع کلکتور خورشیدی وجود دارد: غیرمتمركز و متمركز [۲۵، ۲۶]. کلکتور غیرمتمركز دارای مساحت یکسانی بین سطح اشغال کننده و سطح جاذب تابش خورشیدی است، در حالی که کلکتور متمركز معمولاً دارای سطح بازتابنده مقعری در زیر کلکتور است که برای متمركز کردن پرتو خورشید به سطح جاذب می‌باشد که نتیجه‌ی آن افزایش شار تابش است [۲۱]. به طور کلی با چهار نوع جاذب حرارتی متداول وجود دارد که عبارتند از کلکتورهای متمركز کننده شامل دیش سهموی (PDR) و کلکتور سهموی (PTC) که بیشتر کاربرد نیروگاهی دارند، کلکتور صفحه تخت (FPC) و کلکتور لوله خلاء (ETC) که کاربرد دما پایین دارند [۲۷].

۱-۲-۳-۱ جاذب خورشیدی متمركز کننده دیش سهموی (PDR)

کاربرد اصلی این نوع متمركز کننده برای موتورهای بشقاب سهموی است که جزو کاربری‌های نیروگاهی می‌باشد. سیستمی که شامل یک ژنراتور الکتریکی است که از نور خورشید به جای نفت خام یا زغال سنگ برای تولید برق استفاده می‌کند. در حقیقت این سیستم به طور مستقیم یک

آبگرمکن حرارتی نیست زیرا با استفاده از الکتریسیته تولید شده توسط ژنراتور آب را گرم می‌کند. لازم به ذکر است که این کلکتورها مجهز به سنسور دنبال کننده نور خورشید هستند که با استفاده از دو محور در تمام روز خورشید را دنبال می‌کند [۲۸]. در شکل زیر شماتیکی از این نوع کلکتور را مشاهده می‌کنید.



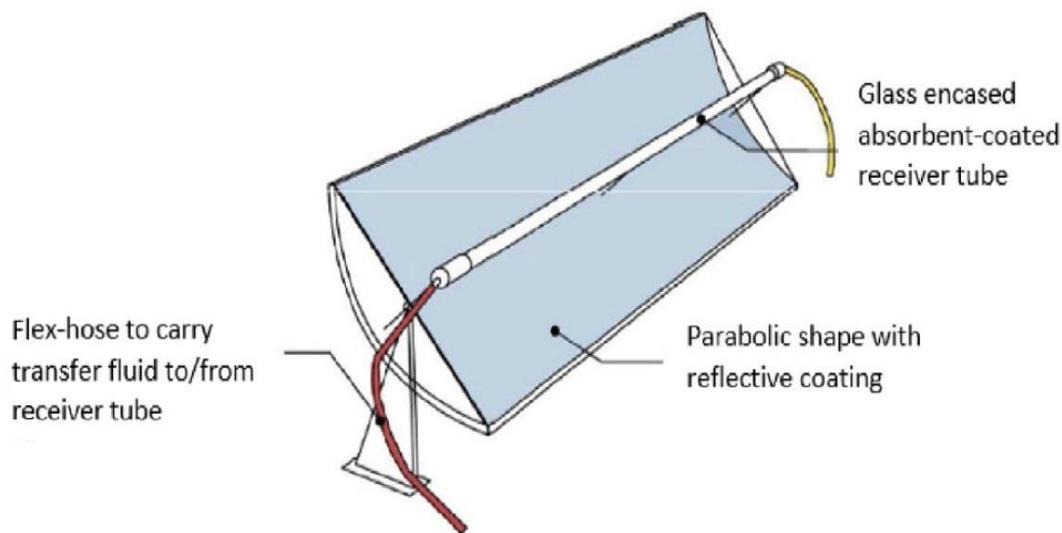
شکل ۱-۱۶ شماتیک ساده‌ای از یک متمرکز کننده دیش سهموی [۲۸]

این سیستم می‌تواند به دمای بیش از ۱۵۰۰ درجه سلسیوس برسد. با توجه به موارد ذکر شده این کلکتور کارآمدترین کلکتور است زیرا همیشه رو به خورشید است و نسبت تمرکز آن در محدوده ۶۰۰ تا ۲۰۰۰ برابر است [۲۹، ۳۰].

۲-۳-۱-۲ جاذب خورشیدی متمرکز کننده سهموی (PTC)

یکی از تفاوت‌های این کلکتور با کلکتور PDR در این است که این کلکتور تابش مستقیم خورشید را به موازات محور کلکتور که از خم شدن یک ورق براق ساخته شده است، روی یک خط کانونی

متمرکز می کند در حالی که تمرکز تابش کلکتور PDR فقط در یک نقطه است. این کلکتور تشکیل شده است از یک لوله سیاه فلزی که با یک لوله شیشه‌ای برای کاهش تلفات حرارتی پوشانده شده است و در امتداد خط کانونی متمرکز کننده، جایی که تابش خورشید زمانی که سهمی رو به خورشید است متمرکز می‌شود قرار می‌گیرد [۳۱]. در داخل لوله سیالی جریان دارد که در این سیستم آب استفاده شده است. سیال با عبور از لوله، انرژی متمرکز شده خورشید را از دیواره لوله جذب کرده و دمایش افزایش پیدا می‌کند [۳۲]. شکل زیر شماتیکی از یک سیستم آبگرمکن با کلکتور PTC را نشان می‌دهد.

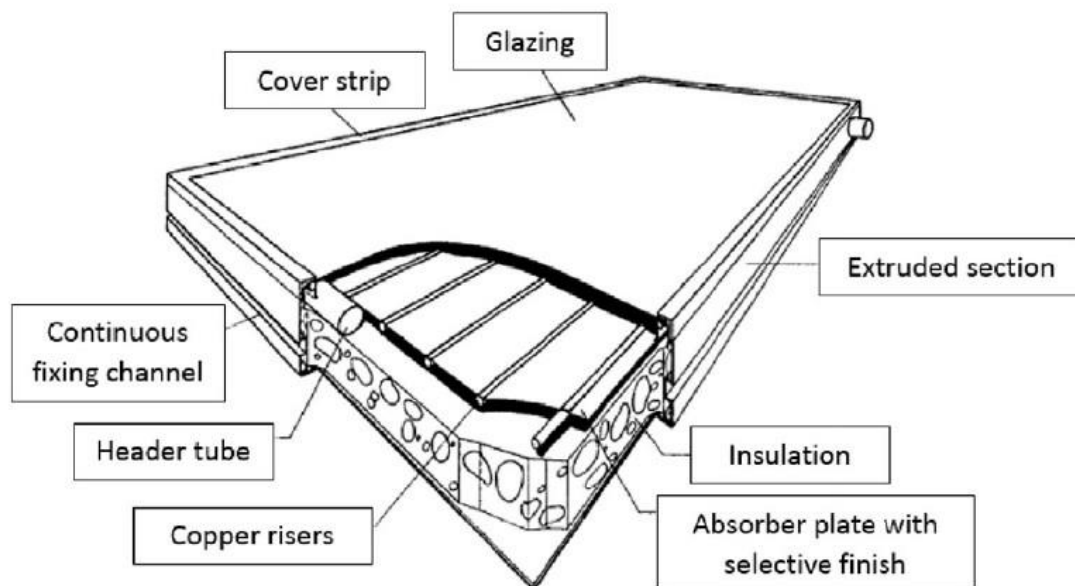


شکل ۱-۱۷ شماتیک ساده‌ای از آبگرمکن خورشیدی با کلکتور PTC [۲۸]

کلکتور PTC می‌تواند در یکی از محورهای شرقی-غربی یا شمالی-جنوبی حرکت داشته باشد و در محور دیگر ثابت باشد. لازم به ذکر است که این نوع آبگرمکن بیشتر کاربرد نیروگاهی دارد.

۳-۲-۳-۱ جاذب خورشیدی صفحه تخت (FPC)

محبوب‌ترین آبگرمکن خورشیدی خانگی نوع کلکتور صفحه تخت است [۳۳]. این نوع کلکتور از نوع ثابت است. اجزای آن شامل صفحه جاذب، لوله‌های هدر و رایزر مسی یا آهنی و عایق‌ها می‌باشد [۲۴]. صفحه جاذب معمولاً یک سطح سیاه شده (با قابلیت جذب بالا) است تا گرمای بیشتری را جذب کند [۲۰]. از طرف دیگر، رایزرهای مسی به صفحه جذب جوش داده می‌شوند و دو سر آنها توسط لوله‌های هدر با قطر بزرگ به هم متصل می‌شوند. در حالی که دو لوله هدر برای ورود و خروج سیال در بالا و پایین کلکتور قرار گرفته‌اند، عایق‌ها برای به حداقل رساندن اتلاف حرارتی از پشت و کناره‌های کلکتور استفاده می‌شوند [۳۴]. در شکل زیر نمایی برش خورده از کلکتور صفحه تخت را مشاهده می‌کنید.



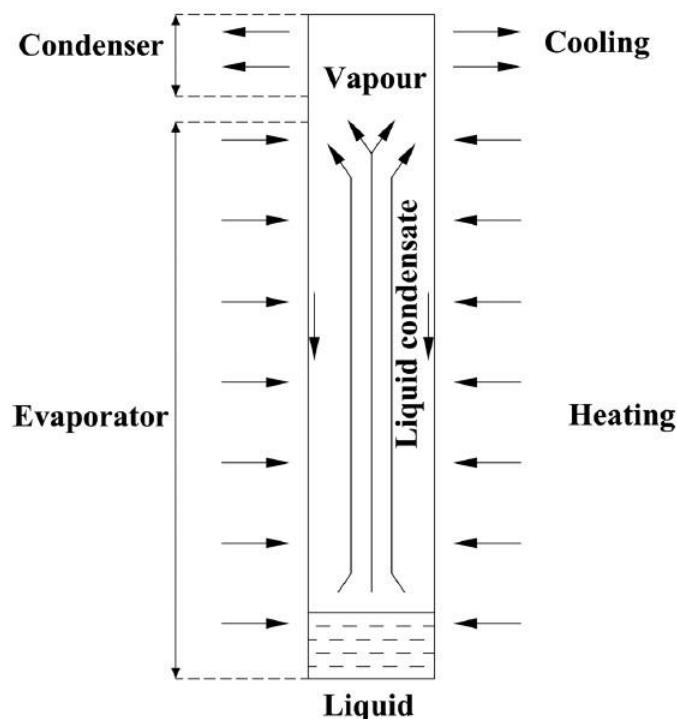
شکل ۱-۱۸ شماتیک کلکتور صفحه تخت [۲۸]

۳-۲-۴-۱ جاذب خورشیدی لوله خلاء (ETC)

کلکتور لوله خلاء مانند کلکتور تخت ثابت است و در هیچ محوری حرکت ندارد ولی به دلیل داشتن یک لایه خلاء در لایه خارجی خود، تلفات کمتر و راندمان بالاتری نسبت به کلکتور تخت دارد. اجزای اصلی این نوع آبگرمکن شامل لوله هدر که همان مخزن آب است و لوله‌های خلاء می‌باشد.

لوله‌های خلاء تشکیل شده‌اند از دو لوله هم مرکز از جنس شیشه که برای به حداقل رساندن تلفات حرارتی بین این دو خلاء شده است. سطح لوله بیرونی شفاف و سطح خارجی لوله داخلی دارای لایه-ای جاذب متشکل از مس، فولاد و آلومینیوم است. سیال مورد استفاده در داخل لوله مرکزی در جریان است [۲۱].

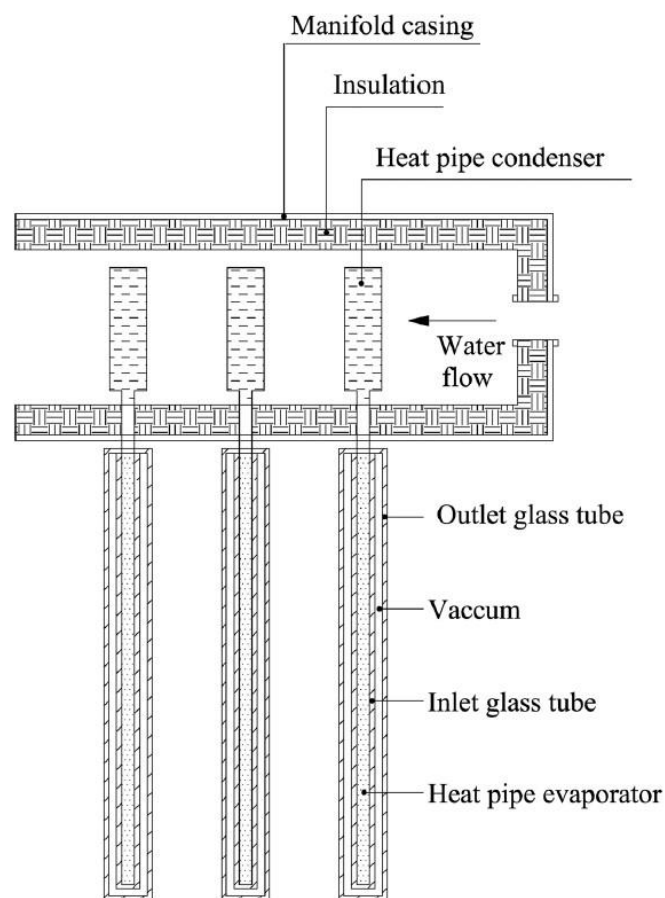
در بعضی از آبگرمکن‌ها با کلکتور لوله خلاء به دلیل مشکلاتی از قبیل گرفتن رسوب ناشی از گرم شدن آب در داخل لوله‌ها و مواردی دیگر از Heat Pipe^۱ استفاده می‌شود. لوله گرمایی یا هیت پایپ لوله‌ای از جنس مس است که ابتدا درون آن خلاء می‌شود و سپس سیالی خاص به مقدار معینی به داخل آن تزریق و سپس دو سر آن بسته می‌شود. به دلیل این که فشار داخلی این لوله کمتر از فشار اتمسفر است، سیال داخلی آن به راحتی به جوش آمده و با تبخیر شدن حرارت را از نقطه گرم تر یعنی اواپراتور (پایین لوله) به نقطه سردتر یعنی کندانسور (بالای لوله) منتقل می‌کند. در شکل زیر می‌توانید شماتیک و عملکرد لوله گرمایی را مشاهده کنید.



شکل ۱-۱۹ شماتیک ساده ای از عملکرد یک لوله گرمایی Heat Pipe [۳۵]

^۱ لوله گرمایی

پس از برخورد تابش خورشید به سطح جاذب لوله خلاء، انرژی آن جذب و به درون لوله خلاء منتقل خواهد شد. در صورتی که لوله گرمایی در درون لوله خلاء وجود نداشته باشد، گرما مستقیماً به آب منتقل می‌شود که در اثر گرم شدن و کاهش چگالی، به سمت بالا حرکت کرده و جای خود را به آب سردتر می‌دهد، به این حالت پدیده ترموسیفونی گفته می‌شود. حال اگر لوله گرمایی در داخل لوله خلاء وجود داشته باشد، عملکرد سیستم به این صورت خواهد بود که گرمای جذب شده توسط جاذب به داخل لوله خلاء منتقل شده و باعث تبخیر سیال داخل لوله گرمایی شده که در نتیجه بخار آن به سمت کندانسور لوله گرمایی که در داخل مخزن جوشش آب قرار دارد حرکت کرده و در آنجا حرارت را به آب منتقل می‌کند. این عمل تا زمانی که تابش وجود داشته باشد به طور مداوم تکرار خواهد شد و باعث بالا رفتن دمای آب مخزن جوشش می‌شود. در شکل زیر شماتیک یک آبگرمکن خورشیدی با کلکتور لوله خلاء مجهز به لوله گرمایی را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱-۲۰ شماتیک آبگرمکن خورشیدی لوله خلاء مجهز به لوله گرمایی [۳۵]

۳-۳-۱ جمع‌بندی

هدف از این پژوهش این است که با استفاده از سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی لوله خلا و با بکارگیری انعکاس دهنده، آب را به دمای جوش رسانده تا جهت شیرین‌سازی و فرآیند نمک‌زدایی مورد استفاده قرار گیرد. از حرارت حاصل از چگالش بخار می‌توان برای گرمایش آب ورودی استفاده نمود. در فصل بعد پیشینه این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فصل ۲۰: روش تحقیق

۲-۱ پیشینه تحقیق

به دلیل کمبود آب شیرین در دسترس و رشد سریع سرانه مصرف آب شیرین، بسیاری از محققین طی سال‌های گذشته تحقیقاتی تئوری و تجربی را در جهت ساخت آب شیرین کن‌ها به خصوص نوع تبخیری-تقطیری انجام داده‌اند. تعداد زیادی تحقیق و پژوهش برای بهبود سیستم‌های موجود، انجام شده که در این فصل به بررسی تعدادی از این موارد می‌پردازیم.

در سال ۲۰۱۹ یک بررسی تجربی توسط چند محقق هندی برای شیرین‌سازی آب شور با استفاده از سیستم نمک‌زدایی خورشیدی با کلکتور لوله خلاء انجام شد. متغیرهای مطالعه شامل پارامترهای مختلفی مانند دمای آب شور و شیرین، دمای محیط آب، سرعت جریان آب، شدت تابش خورشیدی و سرعت باد بود. طی نتایج بدست آمده از آزمایشات مشاهده شد که سیستم کلکتور لوله خلاء، در خروجی دمای بالایی برای آب ایجاد کرده و نتایج خوبی برای عملکرد حرارتی سیستم دارد. تجزیه و تحلیل تجربی نشان داد که این سیستم کلکتور خورشیدی لوله خلاء، ۲۷ الی ۲۸ لیتر آب شیرین در روز می‌تواند تولید کند [۳۶].

ژی و همکارانش در تحقیقی به بررسی دستگاه تقطیر حوضچه‌ای سه اثره با بهره‌وری بهبود یافته پرداخته‌اند. سیستم تقطیر حوضچه‌ای ساخته شده دارای تغذیه آب آبخاری و سیستم عملیاتی خلاء می‌باشد و از سه محفظه تقطیر تشکیل شده است. انرژی مورد نیاز این سیستم را به وسیله‌ی یک کلکتور لوله خلاء مجهز به لوله گرمایی تامین کردند. بازده آب شیرین دستگاه در چهار فشار عملیاتی مختلف اندازه گیری شد. طبق مشاهدات دمای کاری سیستم و اختلاف دما بین سه محفظه، با کاهش فشار عملیاتی کاهش می‌یافت. مقدار تولید آب شیرین در فشار ۴۰ کیلوپاسکال ۷/۵۶ کیلوگرم در روز با راندمان مصرف انرژی ۱/۳۹ بود. بر اساس نتایج تجربی این تحقیق، فشار عملیاتی بهینه برای دستگاه تقطیر حوضچه‌ای در مقیاس کوچک ۴۰ الی ۶۰ کیلوپاسکال تعیین شد [۳۷].

در سال ۲۰۲۱ الماتی و همکارانش مطالعه‌ای جهت بررسی تجربی و نظری یک سیستم نمک‌زدایی با مه را ارائه دادند که انرژی آن توسط یک آبگرمکن خورشیدی لوله خلاء تغذیه می‌گردید. این

سیستم از یک پمپ فشار بالا، دو نازل تولید مه، کندانسور، مبدل حرارتی لوله‌ای پره‌دار، کانال تبخیر و تقطیر، و یک جریان طبیعی آب از ده لوله خلاء آبگرمکن خورشیدی با یک مخزن ذخیره افقی تشکیل شده‌است. نتایج نظری نشان داد که افزایش جرم آب در مخزن ذخیره باعث افزایش راندمان آبگرمکن خورشیدی و کاهش دمای آب می‌شود. همچنین نتایج تجربی نشان داد که هم تابش خورشید و هم دمای متوسط در مخزن ذخیره تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم دارند. میزان تولید آب شیرین در دمای ۵۰ درجه سلسیوس $\frac{kg}{m^2h}$ ۰/۳۱۰ و در دمای ۵۸ درجه سلسیوس $\frac{kg}{m^2h}$ ۰/۳۸۰ اندازه‌گیری شده‌است [۳۸].

کدار و همکارانش در سال ۲۰۲۱ تحقیقی جهت بررسی تجربی از یک سیستم آب شیرین کن خورشیدی تک مرحله‌ای لوله خلاء با انعکاس‌دهنده سهموی ارائه کرده‌اند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که با حفظ فاصله بهینه ۲۰ میلیمتری بین لوله خلاء و انعکاس‌دهنده، سیستم می‌تواند آب آشامیدنی را تا $\frac{liter(m^2h)}{day}$ ۳/۴ تولید کند. در صورت استفاده از فویل آلومینیومی به عنوان بازتابنده سطح انعکاس‌دهنده، تولید آب شیرین به ۱/۹ لیتر در روز کاهش می‌یابد [۳۹].

کومار و همکارانش در سال ۲۰۲۲ مطالعه‌ای درباره‌ی طراحی سیستم آب شیرین کن خورشیدی با کلکتور لوله خلاء و ترکیب آن با متمرکزکننده‌های سهموی اصلاح شده به کمک نرم افزار متلب انجام داده‌اند. بازده کلی انرژی و انرژی روزانه به ترتیب ۵۰/۸٪ و ۳/۸٪ است. تولید آب شیرین از این سیستم $\frac{kg}{day}$ ۱۶/۲ یا $\frac{kg}{m^2}$ ۵/۴ اندازه‌گیری شده است. هزینه تولید آب شیرین ۰/۰۰۵ دلار بر لیتر محاسبه شده است [۴۰].

در سال ۲۰۱۲ دو همکار در هند یک آزمایش تئوری-عملی در خصوص ترکیب یک آبگرمکن لوله خلاء با یک آب شیرین کن حوضچه‌ای انجام داده‌اند. در این کار که به صورت روزانه و در ماه‌های مختلف سال انجام شده، سیستم کلکتور لوله خلاء با سیستم آب شیرین کن حوضچه‌ای ترکیب شده است به طوری که سیستم کلکتور لوله خلاء وظیفه نگهداری آب در دمای بالا و سیستم تقطیر

حوضچه‌ای مقدار بخار را افزایش می‌دهد. در نتیجه کوپل این دو سیستم باعث می‌شود هم آب گرم و هم آب قابل شرب حاصل شود. همچنین در این تحقیق، اعتبارسنجی و تحلیل اقتصادی انجام شده است. این سیستم قادر به تولید $630 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$ آب شیرین در سال است در حالی که سیستم‌های تقطیر حوضچه‌ای تنها قادر به تولید $327 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$ در سال می‌باشند. هم چنین بیشترین بازده حرارتی سیستم ترکیبی کلکتور لوله خلاء و تقطیر حوضچه‌ای (EISS) حدوداً ۳۰/۱٪ است و میانگین سالانه آن ۲۱/۳٪ است. تحلیل اقتصادی این سیستم نشان می‌دهد هر کیلوگرم آب نمک‌زدایی شده معادل ۰/۱۲۸ دلار هزینه خواهد داشت [۴۱].

تحقیقی درباره‌ی سیستم‌های آب شیرین کن خورشیدی به وسیله PHP^۲ توسط شریف آباد و همکارانش انجام و نوشته شده است. یکی از بهترین و سودمندترین راه‌ها برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده از سیستم‌های آب شیرین کن خورشیدی همراه با PHP است، به طوری که استفاده از این روش، عملکرد و پاسخ‌دهی سیستم را افزایش می‌دهد. با مشاهده نتایج در می‌یابیم که بیشترین مقدار آب شیرین تولید شده توسط این سیستم $875 \frac{\text{ml}}{\text{m}^2 \text{h}}$ است که در ظهر بین ساعات ۱۲:۳۰ الی ۱۳:۳۰ بوده است. در این سیستم با افزایش مقدار آب داخل حوضچه، نرخ تولید کاهش می‌یابد. نسبت بهینه نرخ پرشدگی آب سیستم ۴۰٪ ثبت شده است [۴۲].

لیو و همکارانش پژوهشی درباره یک سیستم آب شیرین کن همراه با فرآیندهای تبخیر و بازیابی حرارت انجام داده‌اند. این سیستم شامل چهار واحد متصل به هم است که تحت فشار باروتروپیک^۳ و اتمسفر عمل می‌کند. هر کدام از چهار واحد شامل یک مخزن آب شور دریا، حداقل یک جمع‌کننده تابش خورشید از نوع CPC و واحد نمک‌زدایی خورشیدی با استفاده از لوله خلاء می‌باشد. در هر کدام از واحدها، فرایند شیرین‌سازی آب به طور مستقل انجام شده که شامل جمع‌آوری تابش خورشید، بازیابی حرارت و تقطیر بخار می‌باشد. نتایج بررسی عملی نشان می‌دهد که بیشترین مقدار تولید آب

^۱Evacuated tubular collector Integrated Solar Still

^۲Pulsating Heat Pipe

^۳Barotropic

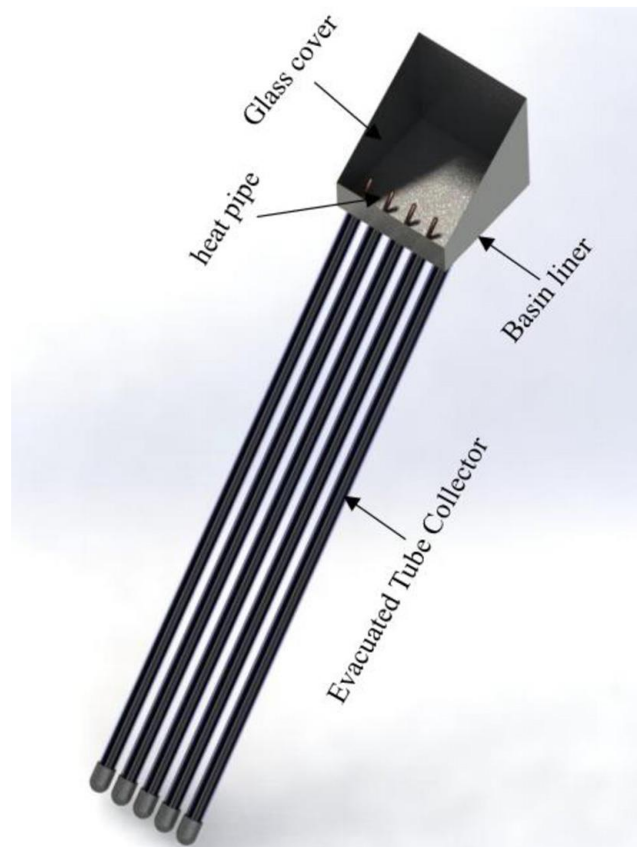
شیرین در این سیستم می‌تواند به $\frac{kg}{m^2h}$ ۱/۲۵ در فصل پاییز و بازده کلی سیستم به ۹۰٪ برسد. همچنین با توجه به نتایج مشخص شد که این سیستم عملکرد فوق العاده‌ای در جمع‌آوری تابش خورشید، بازیابی حرارت و تبخیر آب دریا دارد [۴۳].

پانچال و همکارش در تحقیقی، افزایش آب خروجی از دستگاه آب شیرین کن خورشیدی دو حوضچه‌ای با استفاده از لوله‌های خلاء را بررسی کرده‌اند. به دلیل آن که گرمای نهان تبخیر در جو از بین می‌رود، نمی‌توان از انرژی آن برای افزایش تقطیر بخار خروجی از سیستم حوضچه خورشیدی استفاده کرد زیرا اتصال یک حوضچه به حوضچه اصلی مشکل است. اما یک رویکرد تازه وجود دارد که تقطیر را در خروجی افزایش می‌دهد و آن اتصال لوله‌های خلاء مجهز به مواد مختلف ذخیره‌ساز انرژی مانند سنگ‌ریزه، شن گرانیت سیاه و سنگ‌های کلسیومی به حوضچه پایینی است.

آزمایشات با عمق آب ۲ سانتیمتر در حوضچه بالایی در دو حالت استفاده و عدم استفاده از مواد ذخیره‌ساز انرژی انجام شد. مقدار تولید آب شیرین با سنگ‌ریزه که به عنوان ماده ذخیره‌ساز استفاده شد $\frac{kg}{h}$ ۲/۹، شن گرانیت سیاه $\frac{kg}{h}$ ۳/۴ و بیشترین تولید مربوط به سنگ‌های کلسیمی با $\frac{kg}{h}$ ۴/۱ می‌باشد. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که تقطیر خروجی از حوضچه با استفاده از سنگ کلسیم در مقایسه با سنگ ریزه و شن گرانیت سیاه ۷۴٪ بیشتر است. همچنین استفاده از لوله‌های خلاء در حوضچه پایینی مقدار تولید را مقدار زیادی افزایش داده است [۴۴].

در سال ۲۰۱۴ جهانگیری و همکارانش تحقیق تجربی اثر استفاده از پدیده ترموسیفونی لوله گرمایی و لوله خلاء بر روی عملکرد آب شیرین کن از نوع حوضچه‌ای را انجام دادند. استفاده از پدیده ترموسیفونی لوله گرمایی باعث افزایش سرعت و عملکرد هدایت گرمایی و همچنین استفاده از کلکتورهای لوله خلاء نیز باعث افزایش عملکرد سیستم در شرایط آب و هوایی مختلف می‌شود. طبق تحقیقات تجربی با عمق آب داخل حوضچه ۲ سانتیمتر، بیشترین میزان آب تولید شده $\frac{kg}{m^2h}$ ۱/۰۲ و بیشترین بازده ۲۲/۹٪ بوده است. تجزیه و تحلیل هزینه نشان داد که با وجود اینکه نرخ

تولید بسیار بالا بود ولی ضریب^۱ CPL یا هزینه تولید هر لیتر آب در واحد سطح برای سیستم معرفی شده ۰/۰۰۹۲ دلار بر لیتر بوده است [۴۵].

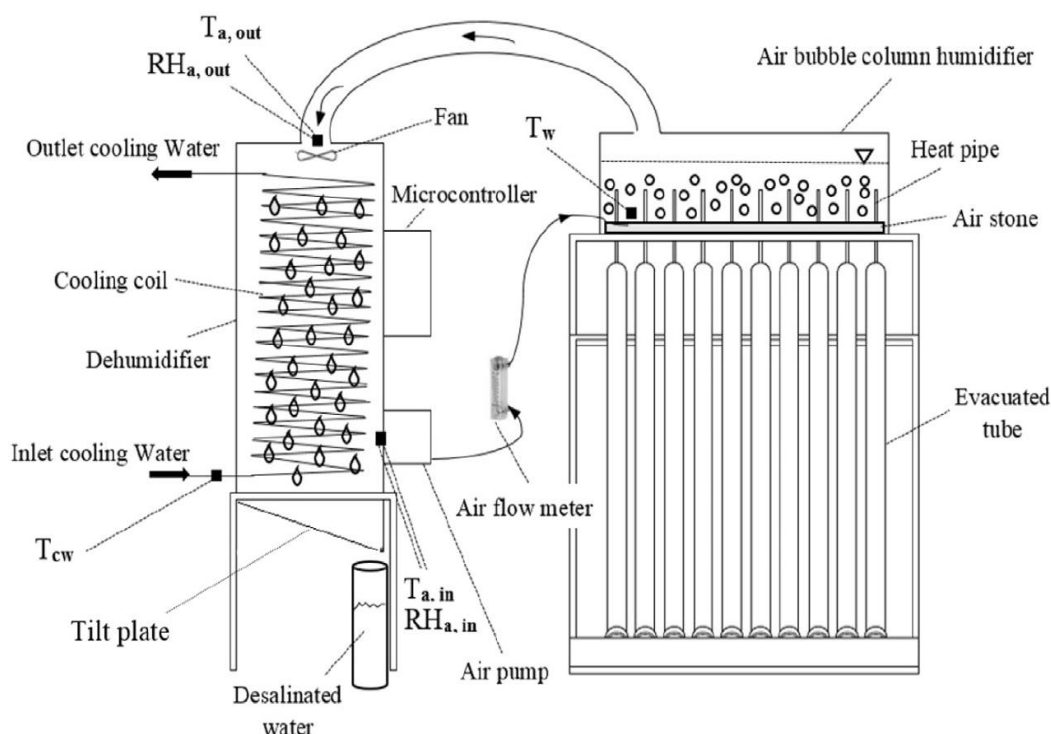


شکل ۱-۲ شماتیک مدل معرفی شده [۴۵]

بهنام و شفیع در سال ۲۰۱۶ تحقیقی با موضوع بررسی سیستم آب شیرین کن خورشیدی مجهز به رطوبت‌ساز عمودی حباب هوا، لوله گرمایی و کلکتور لوله خلاء انجام داده‌اند. در این سیستم از مزیت‌های ترکیب لوله خلاء با لوله گرمایی به عنوان جاذب خوب و منتقل کننده سریع انرژی حرارتی و همچنین از رطوبت‌ساز حباب هوا به دلیل مساحت سطح زیاد که باعث گرم کردن موثر آب و اختلاط خوب هوا و رطوبت استفاده شده است. در این سیستم اثر پارامترهای مختلف شامل نرخ جریان هوا ورودی به رطوبت‌ساز، عمق اولیه آب داخل رطوبت‌ساز، اضافه کردن سیال مانند روغن و آب بین لوله‌های خلاء و لوله‌های گرمایی به عنوان سیال انتقال حرارت بررسی شده است. نتایج نشان داده است که اضافه کردن روغن به فضای بین لوله خلاء و لوله گرمایی به طرز

^۱Cost Per Liter

چشمگیری باعث افزایش تولید روزانه آب شیرین شده که مقدار آن $\frac{kg}{m^2 day}$ ۶/۲۷۵ و بازده روزانه آن ۶۵ درصد است. طی بررسی‌های انجام شده تولید آب شیرین با افزایش نرخ جریان هوا افزایش می‌یابد. همچنین مقدار CPL آب تولید شده در این سیستم ۰/۰۲۸ دلار بر لیتر محاسبه شده است [۴۶].



شکل ۲-۲ شماتیک سیستم طراحی شده [۴۶]

شفیعی و همکارانش در تحقیقی دیگر درباره‌ی آب شیرین کن خورشیدی اصلاح شده از نوع غیرفعال با استفاده از کلکتور لوله خلاء انجام داده‌اند. کلکتورهای لوله خلاء در این سیستم نه تنها به عنوان کلکتور حرارتی، بلکه به عنوان حوضچه‌ای برای گرم کردن آب هم استفاده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین نرخ تولید آب شیرین $\frac{kg}{m^2 h}$ ۰/۸۳ است و مشاهده شده که بیشترین تولید مربوط به زمانی است که شیب لوله‌ها نسبت به سطح افق ۳۵ درجه بوده است و ۸۰٪ آن با آب پر شده است. همچنین طی بررسی تجربی مشاهده شد که استفاده از پشم فولاد ضد زنگ در داخل لوله خلاء باعث افزایش نرخ انتقال حرارت شده که در نتیجه نرخ تولید تا $\frac{kg}{m^2 h}$ ۱/۰۱ افزایش یافته است. در نهایت مقدار CPL برای این سیستم با پشم فولاد و زاویه شیب ۳۵ درجه برای ۲۵ سال کارکرد کمتر از

$$\frac{\$}{\text{liter} \times \text{m}^2} 0.134 \text{ محاسبه شد [47].}$$

در سال ۲۰۱۸ لی و همکارانش درباره‌ی عملکرد سیستم آب شیرین کن خورشیدی غیرفعال با استفاده از اثرات چندگانه بازیابی حرارتی مطالعه‌ای انجام دادند. در این سیستم از هیچ پمپی استفاده نشده است به طوری که بخار و آب شیرین به وسیله افت فشار حرکت می‌کنند. این سیستم شامل ۷ واحد جمع‌کننده و بازیابی حرارتی است که به ۷ حالت دما و فشار تقسیم شده است. هر قسمت شامل یک جمع‌کننده حرارت خورشیدی که شامل یک انعکاس‌دهنده CPC، لوله‌های خلاء جذب‌کننده تابش، مخزن تقطیر و لوله گرمایی است. هر کدام از واحدها تحت فشار اتمسفر و باروتروپیک عمل می‌کند. با توجه به مشاهدات تجربی مقدار تولید آب شیرین در روزهای آفتابی در طول روز به $\frac{4.23}{\text{m}^2} \text{ kg}$ و در روز ابری به $\frac{3.03}{\text{m}^2} \text{ kg}$ می‌رسد. بازده این سیستم در روز آفتابی در دمای سیستم ۱۴۰ درجه سانتیگراد می‌تواند به ۴۱٪ برسد. نتایج تایید کرده است که نسبت عملکرد می‌تواند در روز آفتابی به ۲/۵ و در روز ابری به ۲/۳ برسد، به این معنی است که طراحی این نوع سیستم بدون مصرف انرژی عملکرد بسیار خوبی دارد [48].

عباسپور و همکارانش در سال ۲۰۱۹ تحقیقی با موضوع بررسی تجربی یک سیستم نمک‌زدایی خلاء طبیعی با کلکتورهای لوله خلاء انجام داده‌اند. سیستم NVD^۱ از دو کلکتور لوله خلاء، پمپ خلاء، محفظه تبخیر، کندانسور، ظروف آب شور و شیرین و پمپ آب تشکیل شده است. در موقع راه‌اندازی سیستم، ابتدا محفظه تبخیر با آب پر شده، سپس دریچه محفظه بسته خواهد شد. از دو کلکتور لوله خلاء برای افزایش دمای آب شور و تسهیل تبخیر استفاده شده است. آب شور در داخل لوله‌های مسی U شکل، در داخل لوله خلاء جریان یافته و سپس به محفظه تبخیر متصل می‌شوند. برای افزایش انتقال حرارت بین لوله خلاء و لوله مسی حاوی آب شور، از روغن موتور بهران استفاده شده است. گرمای دریافت شده در لوله خلاء از طریق روغن به آب شور داخل لوله مسی منتقل شده و در نهایت با پدیده ترموسیفون، دمای آب محفظه تبخیر بالا رفته و بخار تولید می‌شود. این سیستم با

^۱Natural Vacuum Desalination

The diagram illustrates a solar-driven membrane distillation system. It features a condenser, water pump, cooling water container, freshwater container, measurement jar, saline water container, U-tube, evaporator chamber, and an evacuated tube collector. Key components and labels include: Pressure gauge, To vacuum pump, T_3 , Evaporation chamber, T_2 , Water level indicator, Valve, T_1 , U-tube, Saline water container, Oil, T_4 , Evacuated tube collector, Condenser, Condensed freshwater, Cooling water, Water pump, T_5 , Cooling water container, Freshwater container, and Measurement jar. A vertical distance of 10.33 m is indicated between the saline water container and the freshwater container.

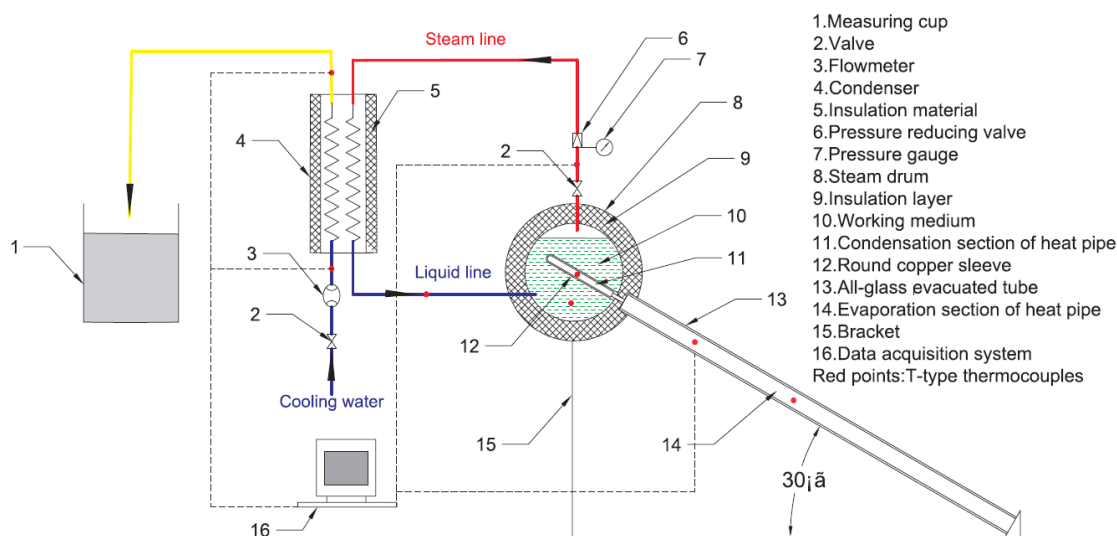
کدار و همکارانش تحقیقی درباره‌ی تحلیل تجربی سیستم‌های آب شیرین‌کن ترکیبی که با استفاده از کلکتور لوله خلاء و انعکاس‌دهنده CPC ساخته شده انجام داده‌اند. این سیستم به صورت

۳۳

ترموسیفونی بوده و از پمپ در آن استفاده نشده است. این سیستم ترکیبی شامل لوله خلاء، CPC، کندانسور، مخزن آب ورودی، مخزن جمع آوری آب شیرین خروجی و غیره است. آزمایشات در شرایط مختلف آب و هوایی مورد بررسی قرار گرفته است. CPC ساخته شده در این تحقیق با استفاده از فویل آلومینیوم صورت گرفته که از آن برای افزایش عملکرد سیستم استفاده شده و با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شد که این سیستم قادر به تولید $1/5$ الی 2 لیتر آب شیرین در روز است [۵۰].

در تحقیقی دیگر که توسط ژو و همکارانش انجام شد، عملکرد کلکتور لوله خلاء با دمای متوسط برای تولید بخار پایدار با دمای 130 درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم طراحی شده از چهار واحد که هر کدام شامل یک مخزن بخار، 24 لوله خلاء مجهز به پره آلومینیومی و لوله گرمایی، کندانسور، لوله‌های بخار و آب تشکیل شده است. کندانسورهای لوله گرمایی که در مخزن بخار قرار دارند، گرمای خود را به آب منتقل کرده تا بخار تولید شود. بخار تولید شده به سمت کندانسور سیستم حرکت کرده و با مبدل حرارتی که در طرف دیگر آن آب خنک جریان دارد، تبادل حرارت کرده تا تقطیر و به محفظه بخار بازگردد.

نتایج حاکی از این است که این کلکتورها، بازده جذب انرژی بالایی داشته و قادر به ذخیره بخار با میانگین دمای بالا به مدت طولانی هستند. حداکثر مقدار تولید بخار در روز آفتابی $2/3 \frac{kg}{m^2}$ ثبت شده که حدود 27 درصد بیشتر از روز ابری با تولید $1/82 \frac{kg}{m^2}$ بوده است. بازده سیستم در تابستان 54% و در زمستان 40% درصد محاسبه شده است [۵۱].



شکل ۲-۴ شماتیک سیستم طراحی شده [۵۱]

در سال ۲۰۲۱ تحقیقی توسط اِسا و همکارانش برای تحلیل عملکرد سیستم آب شیرین کن یکپارچه شیب دار با کلکتور لوله خلاء صورت گرفت. بزرگترین چالش در سیستم‌های آب شیرین کن بازده انرژی آنها است. یکی از دستاوردهای این تحقیق تجربی کاهش ظرفیت حرارتی آب با استفاده از لایه‌ای نازک از آب تغذیه در کنار لوله جاذب است. سیستم ارایه شده با پشتیبان جریان مداوم آب تغذیه کار می‌کند. فیلم آب با ضخامت‌های متفاوت آزمایش شده که ضخامت ۲ میلی‌متر بهترین بازده یعنی ۵۳ درصد را داشته است.

قطرهای مختلف برای لوله‌های استفاده شده در آزمایش بررسی شد، که قطر ۱۶۰ میلی‌متر بیشترین میزان بازدهی یعنی ۶۰/۲٪ را داشت و زوایای استفاده شده در این سیستم ۸۰، ۶۲ و ۴۵ درجه است که زاویه ۴۵ درجه بیشترین بازده یعنی ۴۸/۱٪ را داشت که بهترین شرایط میزان تولید آب شیرین $\frac{4}{5} \frac{\text{liter}}{\text{m}^2 \text{ day}}$ خواهد بود. همچنین هزینه آب شیرین شده $\frac{\$}{\text{liter} \times \text{m}^2}$ ۰/۰۱۲۰۵ است [۵۲].

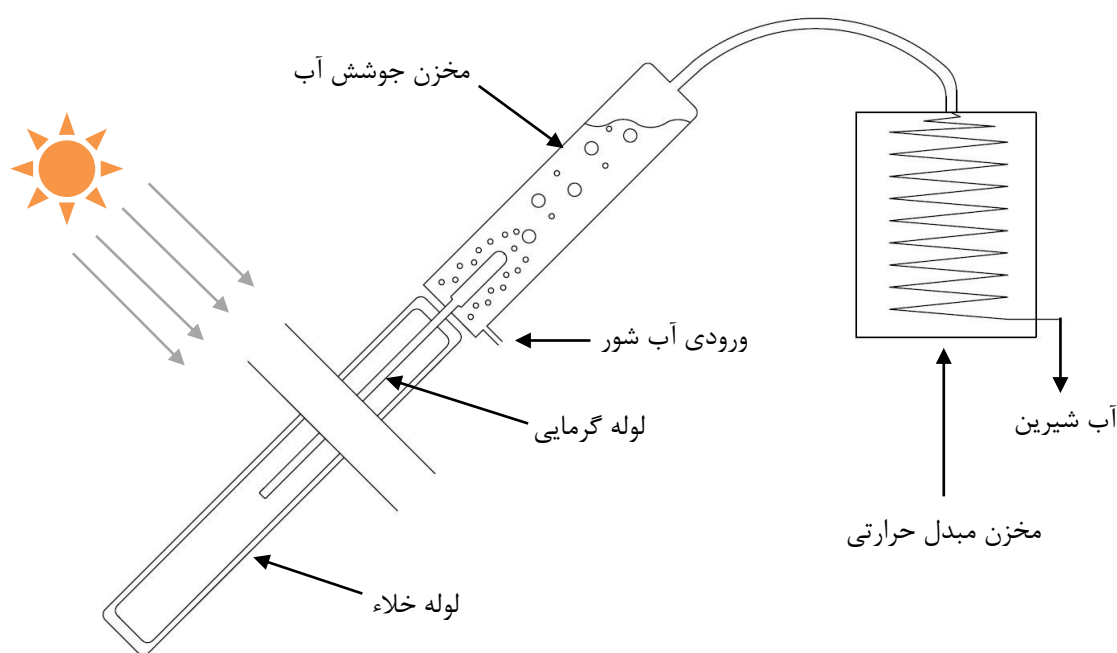


- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1 Steel frame | 5 Coupler |
| 2 Steel fixtures | 6 Water tank with a float valve |
| 3 Evacuated tube collector (ETCs) | 7 Brackish water tank |
| 4 Tubular still | |

شکل ۵-۲ مدل طراحی و ساخته شده [۵۲]

۲-۲ معرفی پژوهش حاضر و نوآوری طرح

در این پژوهش با استفاده از لوله خلاء مجهز به لوله گرمایی، یک سیستم آب شیرین کن-آبگرمکن از نوع تبخیری ساخته و بررسی شده است. همانطور که در شکل ۲-۶ مشاهده می‌کنید روش کاری سیستم مورد نظر به این صورت است که ابتدا لوله خلاء تابش خورشید را جذب نموده و به سیال داخل لوله منتقل می‌کند. انرژی و حرارت داخل لوله، به بخش اواپراتور لوله گرمایی منتقل می‌شود. کندانسور لوله گرمایی در یک مخزن جوشش از جنس استیل که حاوی آب شور است، قرار می‌گیرد تا حرارت جمع شده در خود را به آب شور منتقل و باعث تبخیر آن شود. در نهایت بخار تولید شده برای تقطیر به مبدل حرارتی که یک کویل مارپیچ است هدایت شده و با سرد و تقطیر شدن بخار، آب شیرین تولید خواهد شد.



شکل ۲-۶ شماتیک سیستم

در این پژوهش از سه عدد لوله خلاء دارای لوله گرمایی استفاده شده است. یکی از لوله‌های خلاء با انعکاس دهنده صفحه تخت، یکی با انعکاس دهنده سهموی و یکی بدون انعکاس دهنده بوده و بنابراین مقایسه‌ای بین این سه حالت صورت گرفته است. همچنین از هوا و روغن به صورت مجزا به عنوان سیال پرکننده داخلی لوله خلاء استفاده گردیده تا تاثیر آن بر روی تولید ثبت و بررسی گردد.

فصل ۳: روش ساخت و انجام آزمایش

در این فصل وسایل مورد استفاده در دستگاه معرفی و مراحل ساخت و نصب آنها بیان خواهد گردید. همچنین تجهیزات اندازه‌گیری و همینطور نحوه انجام آزمایش تشریح می‌شود.

۳-۱ ساخت دستگاه

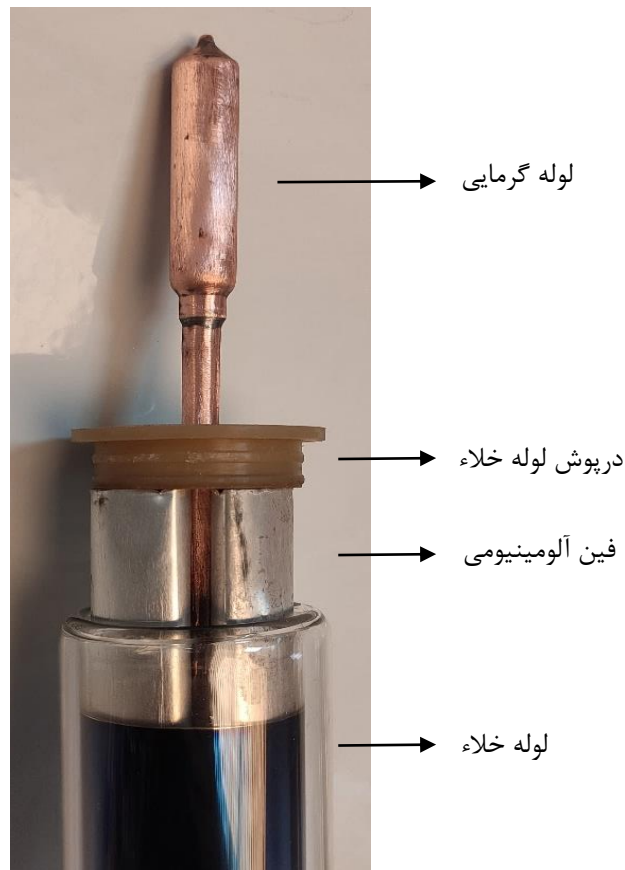
دستگاه ساخته شده شامل ۳ بخش اصلی شامل بخش تبخیرکننده آب، بخش انعکاس‌دهنده تابش و بخش تقطیرکننده می‌باشد که در ادامه به بررسی و تشریح هر کدام پرداخته خواهد شد.

۳-۱-۱ بخش تبخیرکننده

در این پروژه از ۳ عدد لوله خلاء استفاده شده است. لوله خلاء از دو لوله شیشه ای هم مرکز که قطر لوله داخلی ۴۲/۵ میلیمتر و قطر لوله بیرونی ۵۸ میلیمتر و ارتفاع ۱۸۰۰ میلیمتر ساخته شده است. فاصله بین این دو لوله توسط کارخانه سازنده خلاء شده تا انتقال حرارت یا همان تلفات حرارتی را به حداقل برساند. تلفات حرارتی لوله های خلاء به صورت طولی چیزی در حدود $8 \frac{W}{m^{\circ}C}$ می‌باشد [۵۳].

سطح خارجی لوله داخلی پوشیده شده از لایه‌ای بسیار نازک متشکل از مس، فولاد و آلومینیوم است که نهایتاً به رنگ سرمه‌ای درآمده و نقش جاذب تابش خورشید را دارد. زمانی که این لوله در زیر تابش خورشید قرار گیرد، جاذب انرژی را جذب کرده، گرم می‌شود و حرارت خود را به سطح شیشه داخلی و سپس به داخل لوله منتقل می‌کند.

برای استفاده از حرارت انتقال یافته به داخل لوله، از یک لوله گرمایی که اواپراتور آن دارای ابعاد 1630×8 میلیمتر و کندانسور آن 65×14 میلیمتر است، استفاده می‌شود. جنس لوله گرمایی از مس است و جهت افزایش سطح اواپراتور و نرخ انتقال حرارت بیشتر و همچنین در مرکز قرار دادن لوله گرمایی نسبت به لوله خلاء از یک پره (فین) از جنس آلومینیوم به ابعاد $1650 \times 42/5$ میلیمتر استفاده شده است. در شکل ۱-۳ می‌توان نحوه قرارگیری این اجزا را مشاهده کرد.



شکل ۱-۳ اجزا سیستم تبخیرکننده

در این پروژه برای محفظه جوشش آب از یک مخزن استیل به حجم نیم لیتر استفاده شده است. برای این منظور ابتدا سوراخی در دیواره آن جهت ورودی آب شور ایجاد شده و سپس شیلنگی از جنس پلاستیک با استفاده از چسب سیلیکون برای آب بندی و چسب دوقلو برای تثبیت به آن متصل شد. همینطور سوراخی دیگر در زیر مخزن جوشش جهت عبور و اتصال لوله گرمایی ایجاد شد. کندانسور لوله گرمایی از داخل مخزن جوشش با استفاده از چسب سیلیکون مقاوم در برابر دمای بالا (دمای کندانسور لوله گرمایی در زمان تابش به بیش از ۱۲۵ درجه سانتیگراد می‌رسد) و از زیر مخزن با استفاده از چسب دوقلو ثابت شد.

برای اتصال و ثابت کردن مجموعه مخزن جوشش و لوله گرمایی به لوله خلاء از یک عدد تفلون سفید مقاوم به حرارت تا ۱۲۰ درجه سلسیوس به ابعاد ۱۲۰×۹۰ میلیمتر استفاده شد. تفلون ابتدا به حالت استوانه تو پر بود که از یک طرف با قطر ۵۸ میلیمتر (برابر قطر خارجی لوله خلاء) و از طرف

دیگر با قطر ۷۰ میلیمتر (برابر قطر خارجی مخزن جوشش) سوراخ کاری شده تا رابط اتصال بین این دو باشد. با توجه به وجود ورودی پرکن مخزن جوشش، برشی در دیواره تفلون جهت عبور شیلنگ ایجاد شد. در نهایت اجزا بخش تبخیر کننده به صورتی که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، به یکدیگر متصل شدند.



شکل ۲-۳ اتصال نهایی بخش تبخیر کننده

۳-۱-۲ بخش انعکاس دهنده تابش

در حالت عادی وقتی تابش به لوله خلاء برخورد می کند، تنها نیمی از لوله تابش را دریافت می کند در حالی که اگر از انعکاس دهنده استفاده شود نیمه ی زیرین لوله هم تابش دریافت می کند. در این پروژه از ۲ مدل انعکاس دهنده شامل انعکاس دهنده صفحه تخت (FPR) و انعکاس دهنده سهموی (CPC) استفاده خواهیم کرد. انعکاس دهنده ها از ورق استیل براق به ضخامت ۰/۵ میلیمتر ساخته

^۱Flat Plate Reflector

^۲Compound Parabolic Concentrator

شد. برای ساخت نگهدارنده‌ی آنها همانطور که در تصویر ۳-۳ مشاهده می‌کنید از دو عدد نبشی ساین ۳ به طوری که با پیچ و مهره ثابت شده‌اند استفاده کردیم. انعکاس‌دهنده صفحه تخت بعد از برش در ابعاد 150×1710 میلیمتر که ۶۰ میلیمتر از عرض آن برای سوراخ کاری و اتصالش به نگهدارنده در نظر گرفته شد با استفاده از پرچ به نبشی‌ها متصل و پوشانده شد. برای ساخت انعکاس‌دهنده سهموی به دلیل نبود تجهیزات مورد نیاز برای ساخت ورق با پروفیل سهموی و از طرفی نزدیک بودن پروفیل سهموی به پروفیل استوانه در مقیاس کاری این پژوهش، بعد از برش در ابعاد 150×1710 که ۶۰ میلیمتر از عرض برای اتصال به نگهدارنده در نظر گرفته شد، با استفاده از دستگاه رول کن ورق فلزی، رول شده و سپس به نبشی‌ها با استفاده از پرچ متصل شد. با استفاده از پیچ‌های تنظیم کننده که در زیر ورق قرار دارند، مقدار عمق قوس سهمی به ۱۰ میلیمتر رسانده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۳ الف) نگهدارنده انعکاس‌دهنده‌ها ب) نصب انعکاس‌دهنده‌ها بر روی سازه

۳-۱-۳ بخش تقطیر کننده

زمانی که سیستم آب شیرین کن شروع به کار کند، ناشی از تبخیر آب شور، بخاری خواهیم داشت که می‌بایست آن را برای بدست آوردن آب شیرین تقطیرش کنیم. برای این کار مبدلی لوله‌ای از جنس مس با سایز ۸ و به شکل حلزونی با قطر ۱۸۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر ساخته شد که در شکل ۴-۳ قابل مشاهده است.



(ب)



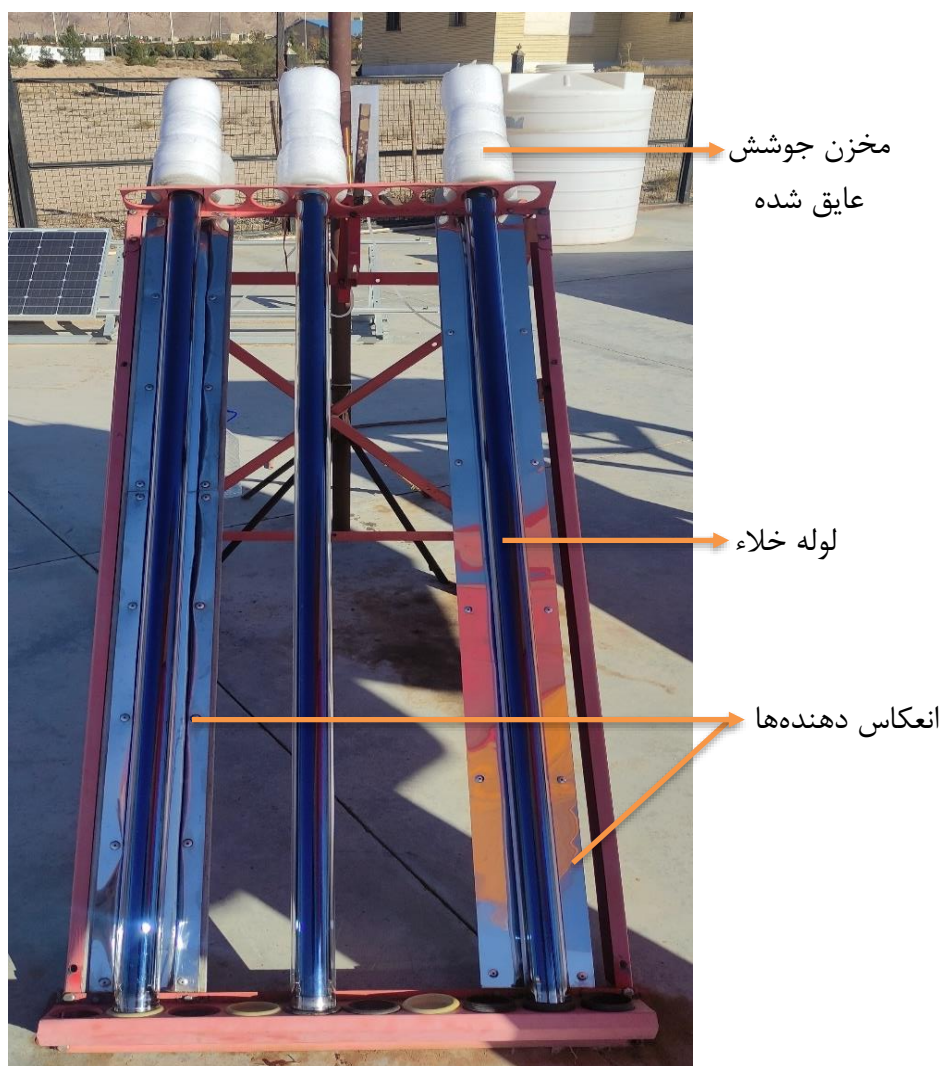
(الف)

شکل ۴-۳ (الف) مبدل حرارتی (ب) جایگذاری مبدل در مخزن

برای دفع حرارت، مبدل حرارتی در مخزن آبی به ابعاد 210×250 میلیمتر حاوی ۵ لیتر آب قرار داده شده تا حرارت خود را به آب درون مخزن انتقال دهد. برای اتصال مخزن جوشش آب به مبدل حرارتی جهت تقطیر بخار، رابطی به درب مخزن جوشش جهت هدایت بخار تولید شده متصل و به وسیله یک شیلنگ مخصوص بخار آن را به کندانسور متصل خواهیم کرد. در نهایت بعد از خروج بخار تولید شده از مخزن جوشش و عبور آن از مبدل حرارتی، بخار گرمای نهان خود را از طریق مبدل به آب منتقل کرده و به صورت کامل تقطیر و از انتهای مبدل به وسیله‌ی یک شیلنگ به داخل یک بشر جهت اندازه گیری مقدار تولید ریخته می‌شود.

۳-۲ آزمایش‌ها

بعد از ساخت و اتصال تمام تجهیزات و قطعات به هم و تثبیت آنها روی سازه مخصوص که زاویه ۴۵ درجه‌ای نسبت به سطح افق دارد، آزمایش‌های اولیه در محیط باز صورت گرفت. در شکل ۳-۵ تجهیزات نصب شده بر روی سکوی آزمایشگاه انرژی نشان داده شده است.



شکل ۳-۵ نصب نهایی تجهیزات برای انجام آزمایش‌های محیط باز

پس از انجام آزمایش‌های اولیه در محیط باز و بررسی نتایج اولیه، مجموعه را به آزمایشگاه منتقل کرده و با استفاده از دستگاه شبیه ساز خورشیدی آزمایش‌های مورد نظر تحت دو تابش مختلف انجام شد. دستگاه شبیه ساز خورشیدی موجود در آزمایشگاه انرژی دانشگاه صنعتی شاهرود با توان 15 kW و همچنین دارای دو شدت تابش مختلف $600 \frac{W}{m^2}$ و $1200 \frac{W}{m^2}$ در بخش مرکزی می‌باشد.

در شکل ۳-۶ دستگاه نصب شده در زیر شبیه‌ساز خورشیدی نشان داده شده است. میزان تابش این دستگاه با استفاده از یک دستگاه تابش‌سنج که در بخش بعد معرفی خواهد شد اندازه‌گیری شد. روش اندازه‌گیری تابش به این صورت بوده است که سنسور تابش‌سنج روی سازه لوله خلاء قرار داده شده و در نقاط مختلف اندازه‌گیری انجام شد. تمامی آزمایش‌ها با استفاده از این شبیه‌ساز تحت هر دو مقدار تابش انجام گرفت. در ادامه روش آزمایش توضیح داده خواهد شد.



شکل ۳-۶ دستگاه شبیه‌ساز خورشیدی

۳-۳ تجهیزات اندازه‌گیری

در آزمایش‌ها نیاز است مواردی از قبیل میزان تابش، دما، مقدار تولید آب شیرین اندازه‌گیری شود که به همین منظور از تجهیزات اندازه‌گیری مورد نیاز استفاده شد که در ادامه به معرفی آنها پرداخته می‌شود.

۳-۳-۱ تابش‌سنج

برای اندازه‌گیری میزان تابش شبیه ساز خورشیدی در نقاط مختلف آن از تابش‌سنج مدل SL100 ساخت شرکت KIMO که بازه اندازه‌گیری آن از $0 \frac{W}{m^2}$ تا $1300 \frac{W}{m^2}$ استفاده شد (شکل ۳-۷). دقت اندازه‌گیری این دستگاه $1 \frac{W}{m^2}$ می‌باشد.



شکل ۳-۷ تابش‌سنج KIMO SL100

۳-۳-۲ دماسنج مدادی

در این سیستم نیاز است در چند نقطه از جمله مخزن جوشش آب، مخزن آب مبدل حرارتی و... دما اندازه‌گیری شود. به همین منظور از دماسنج مدل TP-101 که بازه اندازه‌گیری دمای آن از -50 تا $+300$ درجه سانتیگراد و دقت اندازه‌گیری 0.1 درجه استفاده شد.



شکل ۳-۸ دماسنج مدل TP-101

۳-۳-۳ دماسنج

دمای سیال داخل لوله خلا با استفاده از یک دماسنج دما بالا اندازه‌گیری شده است. با توجه به دمای بالای داخل لوله خلا، از دماسنج سیم‌دار مدل SHD96A که می‌تواند تا دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد را اندازه‌گیری کند استفاده شده است (شکل ۳-۹).



شکل ۳-۹ دماسنج مدل SHD96A

۳-۳-۴ ترازو دیجیتال

به منظور اندازه‌گیری دقیق میزان آب شیرین تولیدی از ترازو دیجیتال مدل KS01 از شرکت KIA که بازه اندازه‌گیری آن از ۰ تا ۳۰۰۰ گرم و دقت اندازه‌گیری آن ۰/۱ گرم می‌باشد، استفاده

گردیده است که در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۰ ترازو مدل KS01

در جدول زیر مشخصات دستگاه‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری به همراه میزان خطای آنها آمده است.

جدول ۳-۱ مشخصات تجهیزات

نام تجهیز	بازه اندازه‌گیری	میزان دقت	میزان خطا
تابش‌سنج مدل KIMO SL100	$0 - 1300 \frac{W}{m^2}$	$1 \frac{W}{m^2}$	۵٪ میزان اندازه‌گیری
دماسنج مدل TP-101	$-50/+300 \text{ } ^\circ\text{C}$	$0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$
دماسنج مدل SHD96A	$0 - 600 \text{ } ^\circ\text{C}$	$1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$1 \text{ } ^\circ\text{C}$
ترازو مدل KS01	$0 - 3000 \text{ gr}$	0.1 gr	0.5 gr

۳-۴ نحوه انجام آزمایش

هدف از انجام این پژوهش، ساخت آب شیرین کن خورشیدی لوله خلاء و بررسی تاثیر دو نوع انعکاس‌دهنده و دو نوع سیال داخل لوله خلاء بر میزان تولید آب شیرین است. همان طور که در قسمت قبل اشاره شد انعکاس‌دهنده‌های ساخته و استفاده شده در این پژوهش شامل دو نوع تخت و سهموی هستند و سیال مورد استفاده داخل لوله خلاء شامل هوا و روغن موتور می‌باشد. با توجه به

موارد ذکر شده متغیرهای که نیاز است اندازه‌گیری شوند شامل دمای آب مخزن مبدل حرارتی، دمای داخل لوله خلاء، مقدار تولید و دمای محیط است.

برای انجام آزمایش‌ها با سیال هوا، پس از پر کردن مخزن جوشش آب که توسط شیلنگ متصل به دیواره آن انجام می‌شد، شبیه ساز با تابش مورد نظر روشن شده و همزمان دمای آب داخل مخزن جوشش تا زمان رسیدن آن به دمای جوش که در شهر شاهرود با توجه به میزان ارتفاع از سطح دریا بین ۹۶/۵ الی ۹۷ درجه سانتیگراد است اندازه‌گیری می‌شد. به محض رسیدن دما به دمای جوش، آزمایش آغاز شده و متغیرهای مورد نظر به فواصل ۲۰ دقیقه ای برای مدت ۱ ساعت اندازه‌گیری و ثبت می‌شد. برای آزمایش‌هایی که سیستم متصل به بخش تقطیرکننده بود، در زمان شروع جوشش آب بلافاصله شیلنگ مخصوصی که برای انتقال بخار تولیدی به مبدل حرارتی در نظر گرفته شده بود را متصل و بخار را به سمت مبدل هدایت می‌شد.

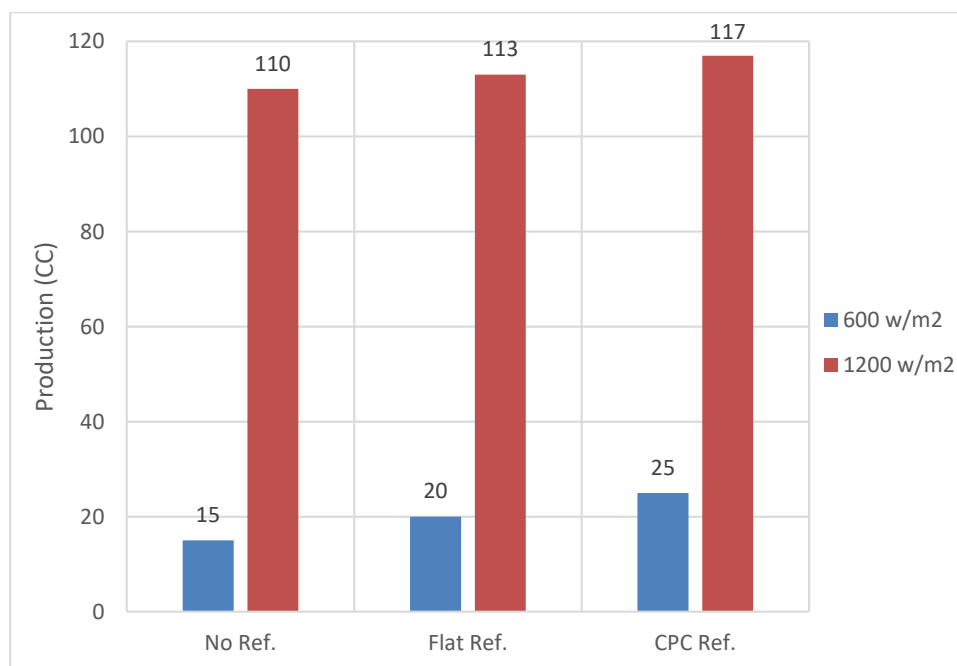
ابتدا تمامی آزمایش‌ها با سیال هوا انجام شد و سپس برای انجام آزمایش‌ها با سیال روغن، مقدار ۲۳۰۰ سی سی روغن موتور داخل لوله خلاء تزریق گردید. در آزمایش‌ها با سیال روغن، با توجه به این که روغن مدت زمان بیشتری نیاز دارد تا گرم شود و به دمای پایدار برسد در ابتدای شروع یک دوره از آزمایش‌های شبیه ساز، یک بار با مدت زمان بیشتری نسبت به سیال هوا روشن شده و بعد از رسیدن به بازه دمایی پایدار برای روغن که با انجام آزمایشات مکرر این بازه بدست آمده است، آزمایش‌ها آغاز می‌شد. لازم به ذکر است که در ابتدای هر آزمایش، دمای آب مخزن مبدل حرارتی به دمای ۲۵ درجه سانتیگراد رسانده می‌شد. دمای داخل لوله خلاء نیز مانند موارد دیگر کنترل و در موقع آغاز آزمایش‌ها در محدوده مورد نظر پایدار می‌شد.

برای اندازه‌گیری مقدار تولید آب شیرین در انتهای هر آزمایش، مقدار آب خارج شده از مبدل حرارتی را که در یک بشر جمع‌آوری شده، به وسیله ترازو اندازه‌گیری و برای اطمینان از آن، مقدار آب کسر شده از مخزن جوشش آب را هم با اندازه‌گیری مقدار آب باقیمانده در مخزن به وسیله ترازو ثبت، بررسی و مقایسه می‌کردیم که در اکثر آزمایشات مقادیر یکسانی اندازه‌گیری می‌شد.

فصل ۴ : نتایج

۴-۱ بررسی تاثیر انعکاس دهنده‌ها با سیال هوا بر میزان تولید آب شیرین

برای بررسی تاثیر انعکاس دهنده‌ها بر میزان تولید آب شیرین، شش آزمایش با دو مقدار تابش ۶۰۰ و ۱۲۰۰ وات بر متر مربع برای سیال هوا صورت گرفت. همانطور که در نمودار ۴-۱ زیر مشخص است، مقدار تولید با استفاده از انعکاس دهنده تخت و سهموی در تابش زیاد به ترتیب ۳ و ۶ درصد و در تابش کم ۳۳ و ۶۷ درصد بیشتر از حالت بدون انعکاس دهنده می‌باشد. علت این افزایش نسبت به حالت بدون انعکاس دهنده، جمع‌آوری تابش خورشید و انعکاس آن به زیر لوله خلاء به وسیله انعکاس دهنده می‌باشد.



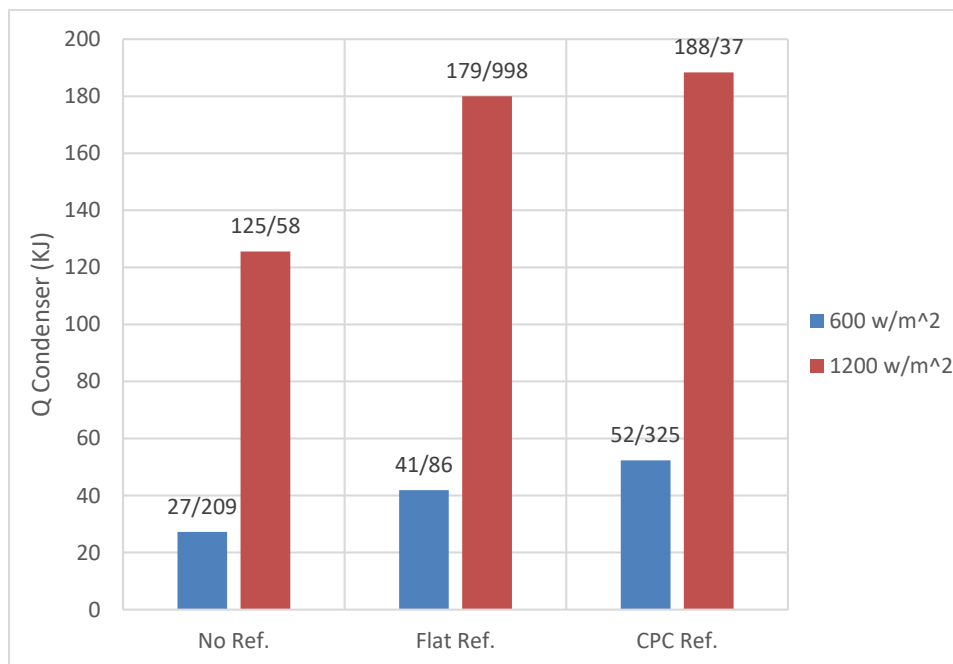
شکل ۴-۱ بررسی مقدار تولید آب شیرین با سیال هوا در یک ساعت

برای آزمایش‌های بالا، مقدار انرژی دریافت شده در مخزن مبدل حرارتی از طریق رابطه (۴-۱) بر حسب کیلوژول محاسبه و در نمودار ۴-۲ آمده است.

$$Q_{con} = m \times C_p \times \Delta T \quad (4-1)$$

در رابطه (۴-۱) m بیانگر جرم آب مخزن مبدل حرارتی می‌باشد. مشخص است که در هر دو حالت تابش، استفاده از انعکاس دهنده انرژی ورودی را به طور محسوس نسبت به حالت بدون انعکاس دهنده

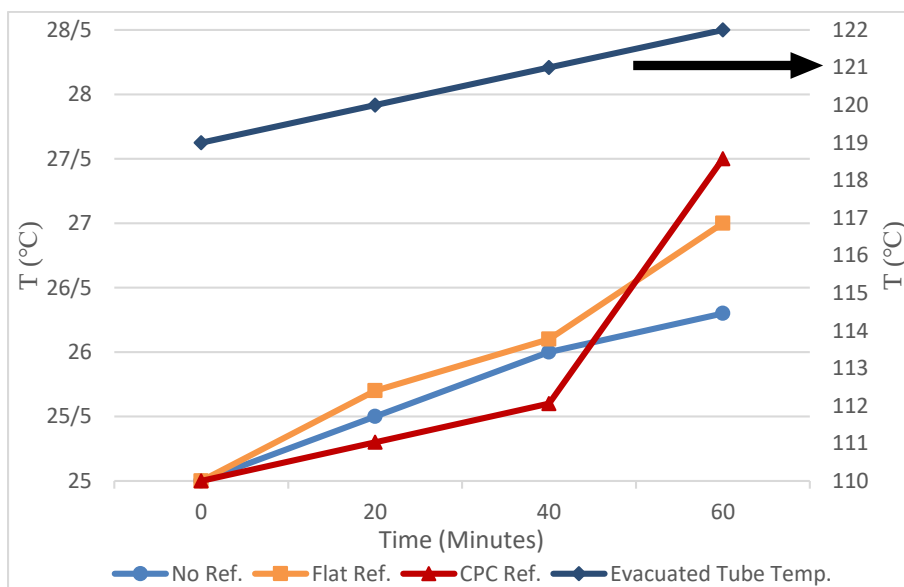
افزایش می‌دهد. مقدار انرژی ورودی با استفاده از انعکاس‌دهنده تخت و سهموی به ترتیب ۴۳ و ۵۰ درصد بیشتر از حالت بدون انعکاس‌دهنده می‌باشد. در ادامه جهت محاسبه مقدار انرژی استحصال شده از بخش تقطیرکننده، از مقادیر انرژی منتقل شده استفاده می‌شود.



شکل ۲-۴ مقدار انرژی منتقل شده به آب مخزن مبدل حرارتی در یک ساعت

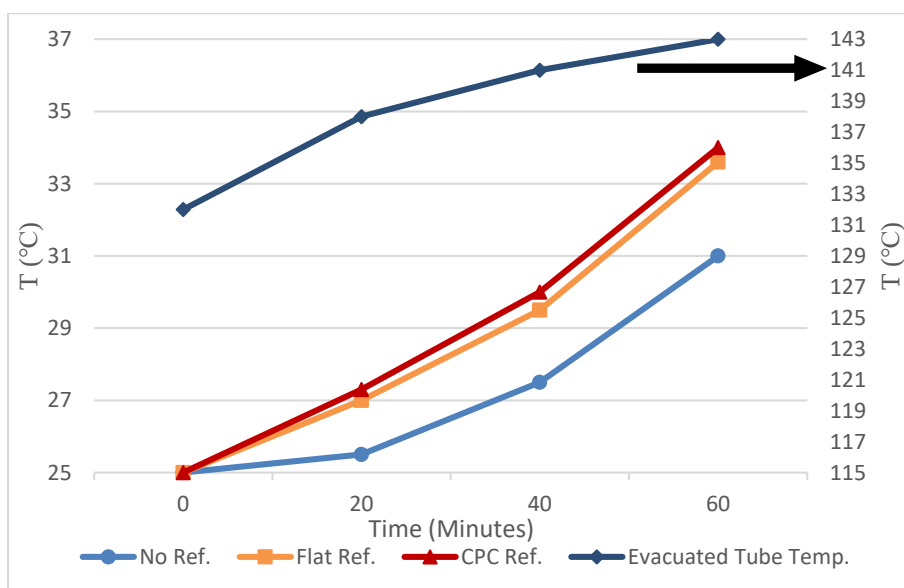
برای مقایسه بهتر و دقیق‌تر افزایش دمای آب مخزن مبدل حرارتی، روند تغییرات آن در آزمایش‌ها با تابش $600 \frac{W}{m^2}$ ثبت و در نمودار شکل ۳-۴ نشان داده شده است. همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود با گذشت زمان و تقطیر بخار تولید شده در مبدل، دمای آب مخزن مبدل حرارتی افزایش یافته است.

مطابق با شکل ۳-۴ با توجه به اینکه میزان تمرکز در انعکاس‌دهنده سهموی بیشتر است، بخار بیشتری در طی آزمایش توسط این انعکاس‌دهنده تولید گردیده که در نتیجه دمای آب مخزن مبدل حرارتی نسبت به دو حالت دیگر بیشتر شده است. همچنین دمای هوای داخل لوله خلاء در زمان انجام این سری از آزمایش‌ها نیز ثبت گردیده که در تابش $600 \frac{W}{m^2}$ بین ۱۱۹ تا ۱۲۲ درجه سانتیگراد بوده است.



شکل ۳-۴ روند افزایش دمای آب مخزن مبدل حرارتی بر حسب زمان در تابش $600 \frac{W}{m^2}$

روند افزایش دما آب مخزن مبدل حرارتی و دمای هوای داخل لوله خلاء در آزمایشات با تابش $1200 \frac{W}{m^2}$ ثبت و در نمودار زیر آمده است. مشاهده می‌شود که لوله خلاء بدون انعکاس‌دهنده با $5/5$ درجه سلسیوس کمترین و انعکاس‌دهنده سهموی با 9 درجه سلسیوس، بیشترین اختلاف دما را بر اثر تقطیر بخار در مبدل حرارتی ایجاد کرده‌اند. همچنین دمای هوای داخل لوله خلاء در زمان انجام این سری از آزمایش‌ها نیز ثبت گردیده که در تابش $1200 \frac{W}{m^2}$ بین 138 تا 143 درجه سانتیگراد بوده است.



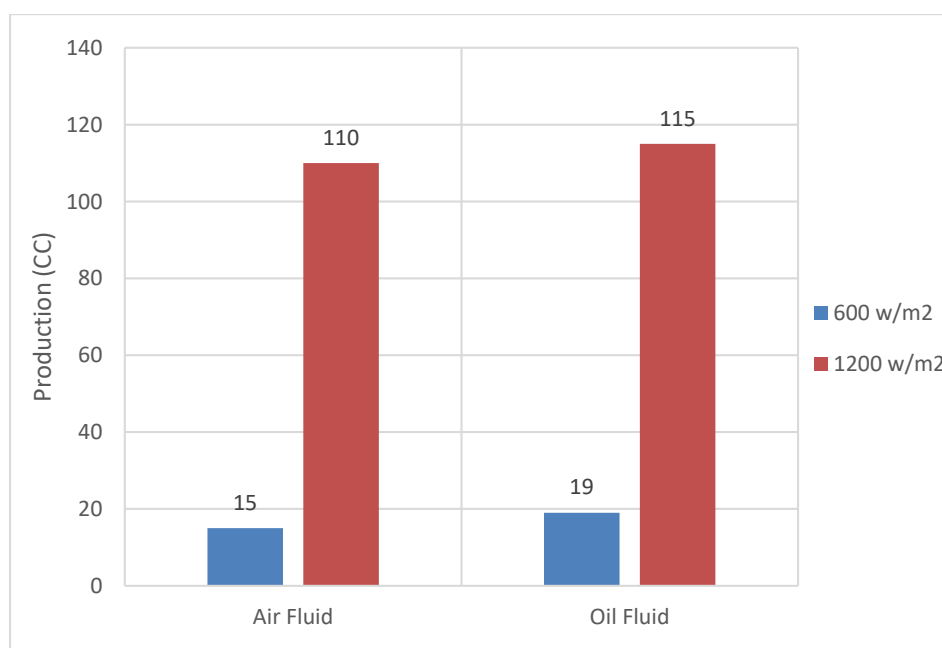
شکل ۴-۴ روند افزایش دمای آب مخزن مبدل حرارتی بر حسب زمان در تابش $1200 \frac{W}{m^2}$

۴-۲ بررسی تاثیر انعکاس دهنده‌ها با سیال روغن بر میزان تولید آب شیرین

با توجه به این که ظرفیت گرمایی ویژه روغن موتور از هوا بیشتر می‌باشد، می‌توان از آن به عنوان یک ماده ذخیره‌ساز انرژی استفاده کرد. از طرف دیگر ضریب انتقال حرارت روغن بیشتر از هوا است که در صورت استفاده از آن نرخ انتقال حرارت به سیستم افزایش و منجر به تولید بیشتر آب شیرین خواهد شد.

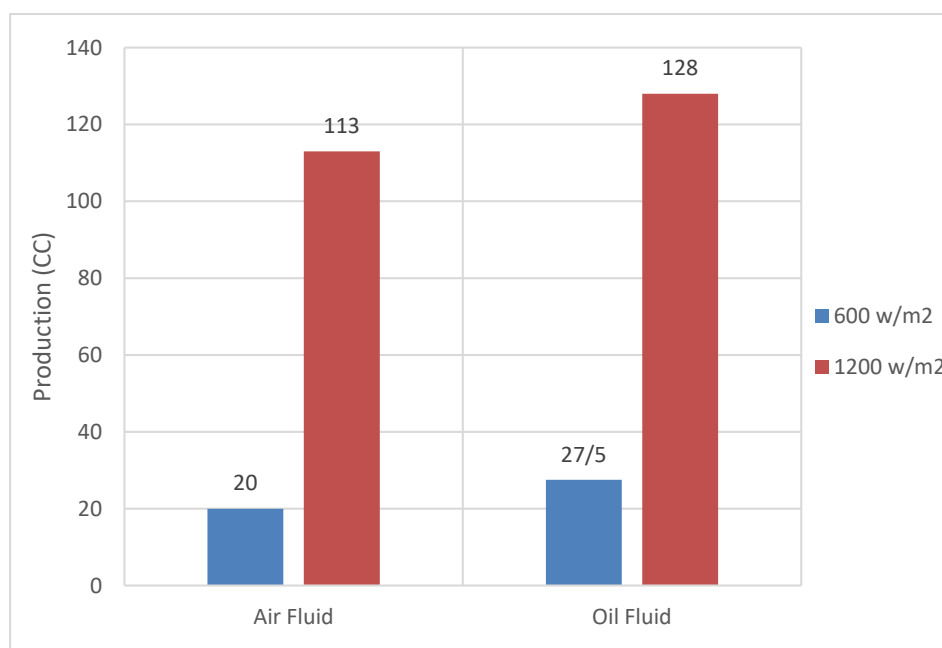
استفاده از روغن به عنوان سیال واسط انتقال حرارت در لوله خلاء علاوه به مزیت‌های ذکر شده، می‌تواند در شرایط واقعی آب و هوا، در زمان‌هایی که مقدار تابش به دلایلی از جمله ابری شدن هوا کاهش یافته، انرژی ذخیره شده خود را به سیستم انتقال دهد تا سیستم همچنان به کار خود ادامه دهد. آزمایش‌های گرفته شده با سیال هوا به طور کامل با سیال روغن تکرار شد و نتایج آن به تفکیک انعکاس دهنده در نمودارهای زیر آمده است.

همانطور که در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود استفاده از روغن در حالت بدون استفاده از انعکاس دهنده، تولید را در تابش کم به مقدار ۲۷٪ و در تابش زیاد ۵٪ افزایش داده است.



شکل ۴-۵ مقایسه مقدار تولید آب شیرین بین سیال هوا و روغن در حالت بدون انعکاس دهنده در یک ساعت

در نمودار شکل ۴-۶ نتایج انعکاس‌دهنده صفحه تخت آمده است، استفاده از روغن درون لوله تولید را در تابش کم به اندازه ۳۸٪ و در تابش زیاد ۱۳٪ افزایش داده است. این افزایش به دلیل ضریب انتقال حرارت بالاتر روغن نسبت به هوا درون لوله می‌باشد.

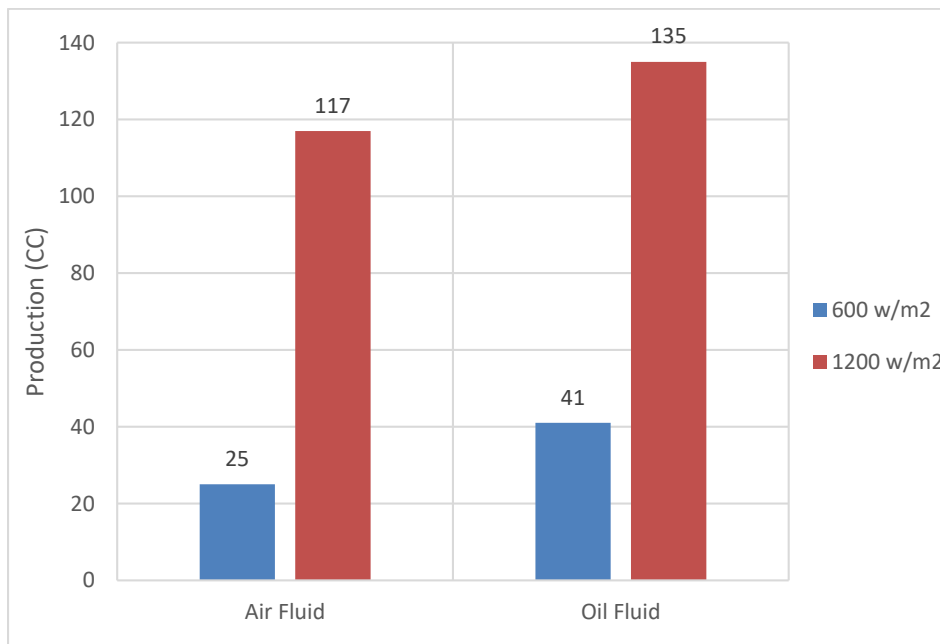


شکل ۴-۶ مقایسه مقدار تولید آب شیرین بین سیال هوا و روغن با انعکاس‌دهنده تخت در یک ساعت

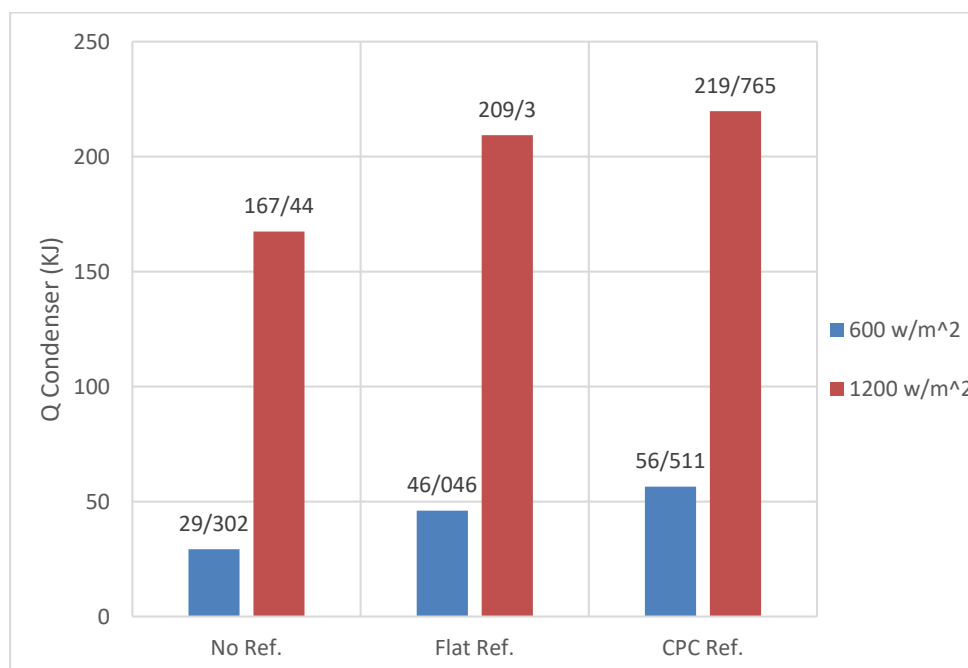
مطابق شکل ۴-۷ استفاده همزمان از انعکاس‌دهنده سهموی و روغن به عنوان سیال واسطه بیشترین تولید آب شیرین را حاصل کرد که نسبت به حالت سیال هوا در تابش کم ۶۴٪ و در تابش زیاد بیش از ۱۵٪ افزایش داشته است. به طور کلی اثر استفاده از روغن در تابش‌های پایین بالاتر بوده است. برای آزمایش‌های بالا مقدار انرژی منتقل شده به آب مخزن مبدل حرارتی از طریق رابطه (۴-۱) بر حسب کیلوژول محاسبه و در نمودار ۴-۸ آمده است.

مشخص است که در هر دو حالت تابش استفاده از انعکاس دهنده انرژی ورودی را به طور محسوس

نسبت به حالت بدون انعکاس دهنده افزایش می دهد.

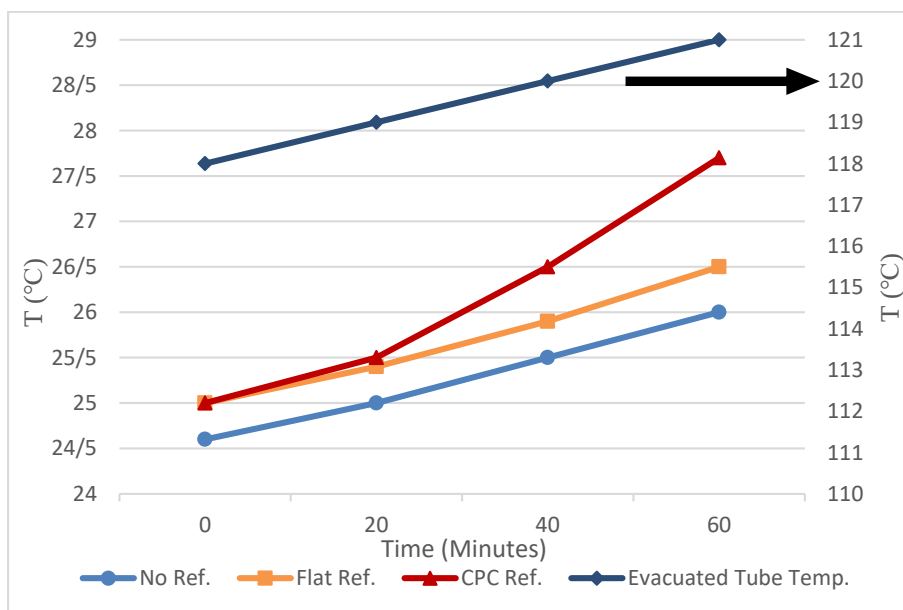


شکل ۴-۷ مقایسه مقدار تولید آب شیرین بین سیال هوا و روغن با انعکاس دهنده سهموی در یک ساعت



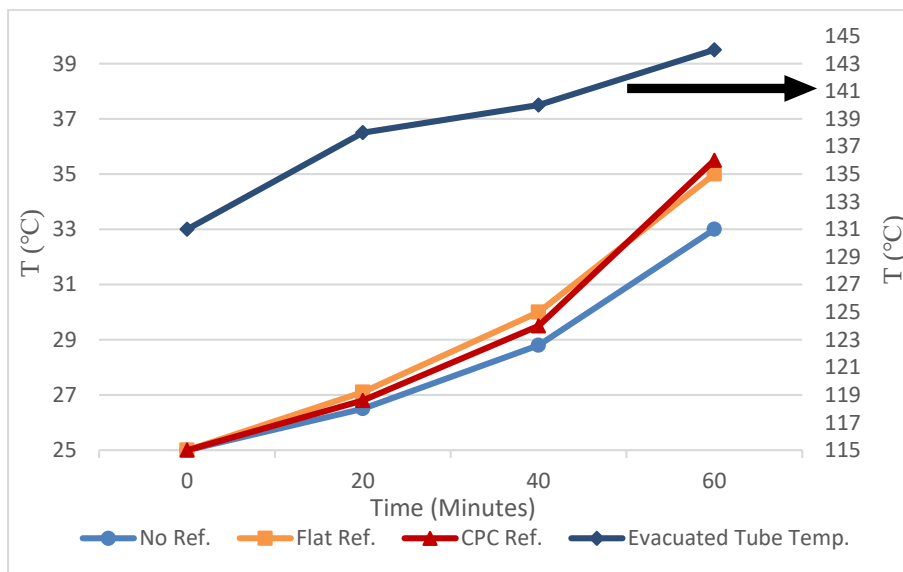
شکل ۴-۸ مقدار انرژی منتقل شده به آب مخزن مبدل حرارتی در یک ساعت با سیال روغن

در نمودار شکل ۴-۹ می‌توان روند افزایش دمای آب مخزن مبدل حرارتی را برای تابش $600 \frac{W}{m^2}$ مشاهده کرد. همانطور که در نمودار زیر مشخص است، انعکاس‌دهنده سهموی بالاترین دما را در این تابش ایجاد کرده است. دمای روغن داخل لوله خلاء در زمان انجام این سری از آزمایش‌ها نیز ثبت گردیده که در تابش $600 \frac{W}{m^2}$ بین ۱۱۸ تا ۱۲۱ درجه سانتیگراد بوده است.



شکل ۴-۹ روند افزایش دمای آب مخزن مبدل حرارتی بر حسب زمان در تابش $600 \frac{W}{m^2}$

نمودار شکل ۴-۱۰ نشان دهنده روند افزایش دمای آب مخزن مبدل حرارتی برای آزمایشات با تابش $1200 \frac{W}{m^2}$ که انعکاس‌دهنده سهموی بالاترین دما را ایجاد کرده است. در نمودار زیر دمای روغن داخل لوله خلاء در زمان انجام این سری از آزمایش‌ها نیز ثبت گردیده که در تابش $1200 \frac{W}{m^2}$ بین ۱۳۱ تا ۱۴۴ درجه سانتیگراد بوده است.



شکل ۴-۱۰ روند افزایش دمای آب مخزن مبدل حرارتی بر حسب زمان در تابش $1200 \frac{W}{m^2}$

مقدار انرژی دریافت شده در مخزن مبدل حرارتی را از رابطه (۴-۱) و انرژی چگالش بخار سیستم را با استفاده از مقدار تولید آب شیرین از رابطه (۴-۲) برای کل سیستم با سیال هوا محاسبه می کنیم.

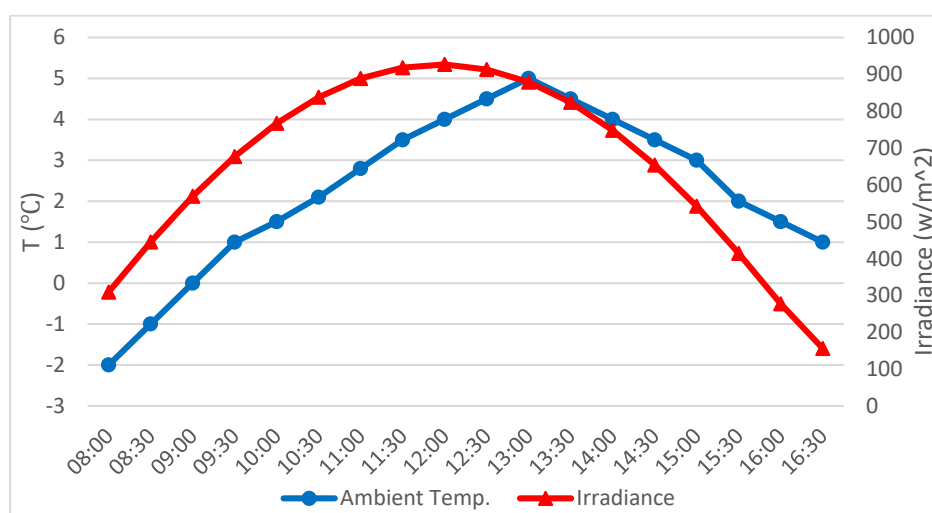
$$Q_{out} = m_d \times h_{fg} \quad (4-2)$$

با تقسیم «انرژی دریافتی در مخزن مبدل حرارتی» بر «انرژی چگالش بخار سیستم» برای هر آزمایش و سپس با محاسبه ی میانگین مقادیر به دست آمده، مشخص می شود $76/4\%$ از انرژی دریافتی استحصال شده است. با استفاده از روابط (۴-۱) و (۴-۲) و محاسبه ی مقادیر آنها برای کل سیستم با سیال روغن، این مقدار برابر با $68/8\%$ محاسبه می شود. طبق نتایج آزمایش های بالا مشخص است، بیشترین مقدار تولید آب شیرین برای تابش ثابت $1200 \frac{W}{m^2}$ مربوط به لوله خلاء مجهز به انعکاس- دهنده سهموی با استفاده از روغن به منظور سیال واسطه با مقدار $135 \frac{CC}{Hr}$ است. مقدار استحصال انرژی در این آزمایش با استفاده از روابط ذکر شده $72/2\%$ محاسبه شده است.

در خصوص اختلاف محاسبه شده باید گفت، به دلیل عدم استفاده از عایق مناسب برای حفظ دمای بالای بخار و همچنین عدم توانایی در ایجاد هوا بند ی مناسب در بخش تولید و مسیر انتقال بخار، بخش کمی از بخار و حرارت از سیستم خارج شده است که تلفات حرارتی و تلفات بخار سیستم می- باشد.

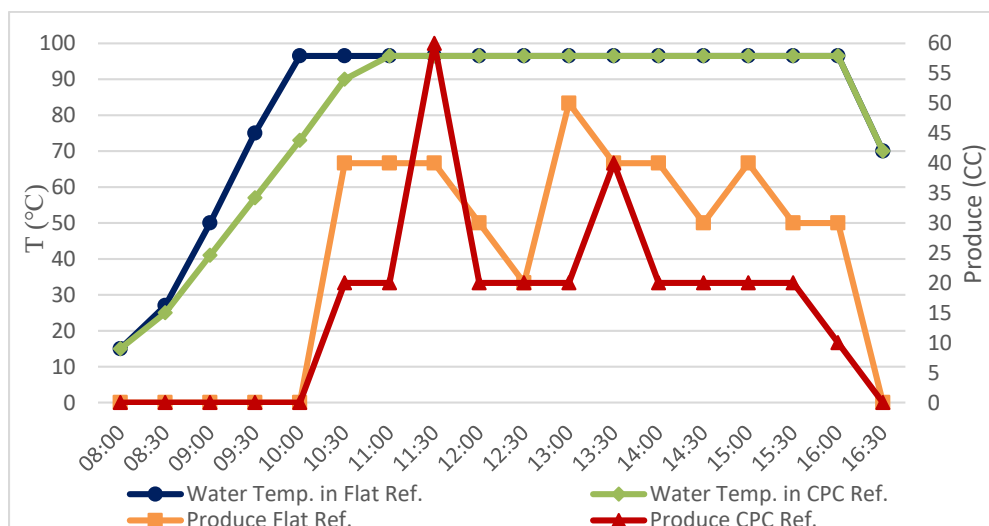
۳-۴ نتایج آزمایش‌ها در محیط باز

آزمایش‌ها در محیط باز در تاریخ ۳۰ دی ماه مصادف با ۲۰ ژانویه در شهر شاهرود واقع در استان سمنان-ایران انجام گرفت. نمودار ۴-۱۱ که اطلاعات آن در هر سی دقیقه و در کل روز ثبت شده، نشان دهنده میزان تابش خورشید و دمای هوای محیط بر حسب زمان می‌باشد. همانطور که در نمودار مشخص است بیشترین مقدار تابش ۹۲۷ وات بر متر مربع و حداقل و حداکثر دمای هوای محیط به ترتیب ۲- و ۵+ درجه سانتیگراد ثبت شده است.



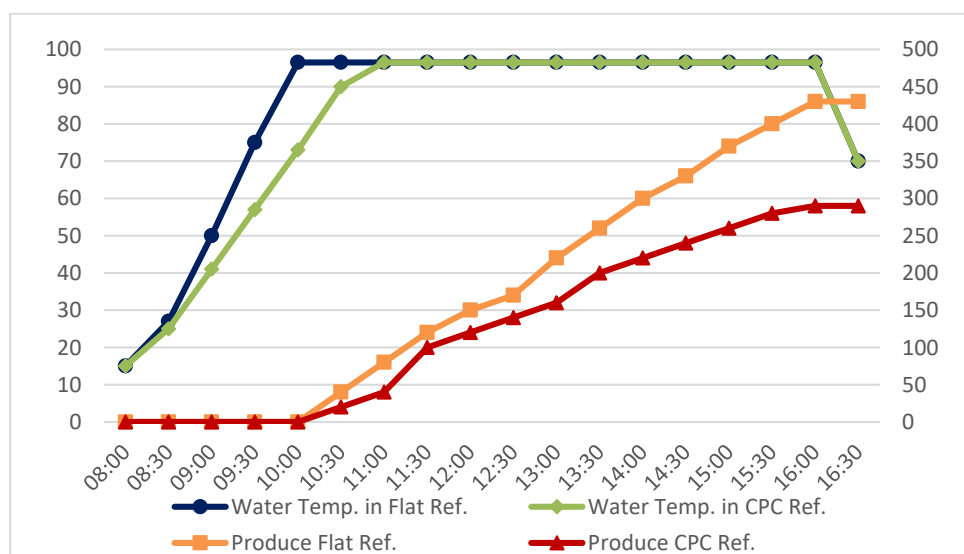
شکل ۴-۱۱ نمودار تابش و دمای محیط بر حسب زمان

طی آزمایش‌های انجام گرفته مشاهده شد که انعکاس‌دهنده صفحه تخت عملکرد بهتری نسبت به انعکاس‌دهنده سهموی در محیط باز داشته که دلیل آن خطا در ساخت انعکاس‌دهنده سهموی می‌باشد. نمودار ۴-۱۲ تولید لحظه‌ای آب شیرین و دمای آب داخل مخزن جوش را نشان می‌دهد. همانطور در نمودار قابل مشاهده است بیشترین تولید لحظه‌ای مربوط به انعکاس‌دهنده سهموی با مقدار ۶۰ سی سی در ۳۰ دقیقه بوده است.



شکل ۴-۱۲ دمای آب و تولید لحظه‌ای (نیم ساعته) آب با استفاده از انعکاس‌دهنده تخت و سهموی بر حسب زمان

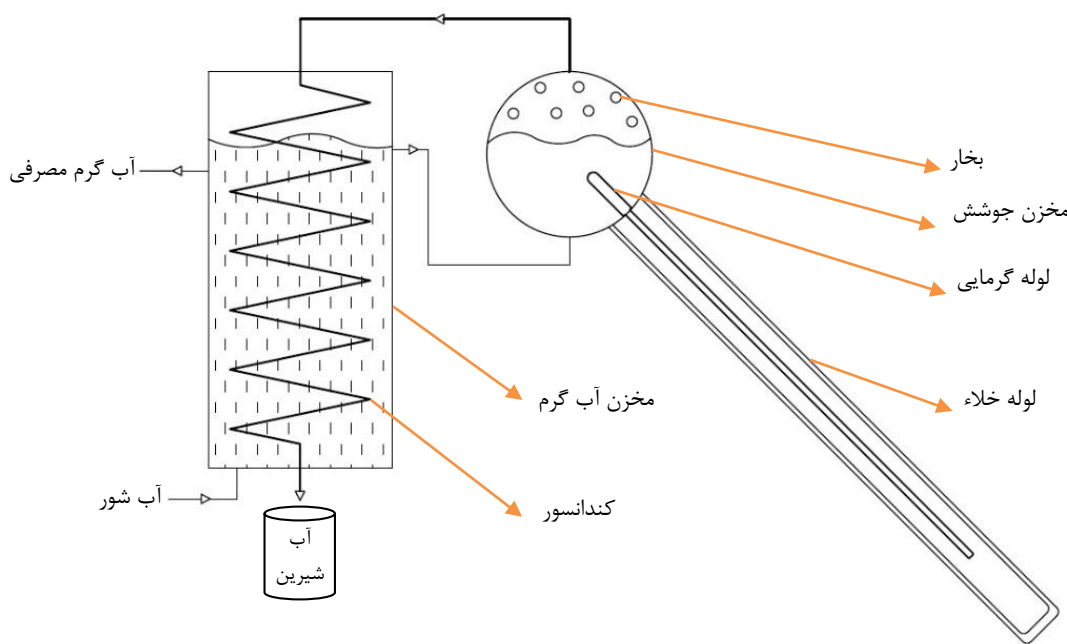
نمودار زیر دمای آب داخل مخزن جوشش و میزان تولید تجمعی آب را بر حسب زمان نشان می‌دهد که نشان دهنده عملکرد بهتر انعکاس‌دهنده تخت می‌باشد. حداکثر میزان تولید آب شیرین در یک روز برای انعکاس‌دهنده صفحه تخت و سهموی به ترتیب ۴۳۰ سی سی و ۲۹۰ سی سی ثبت شده است. همانطور که در نمودار ۴-۱۲ مشاهده شد، در ساعات نزدیک به ظهر خورشیدی عملکرد انعکاس‌دهنده سهموی بهتر بود ولی در نمودار ۴-۱۳ مشخص است که میزان تولید در کل روز برای انعکاس‌دهنده تخت بیشتر بوده است. از آنجایی که ساخت انعکاس‌دهنده سهموی، نیاز به دقت بسیار بالایی دارد، در این سیستم می‌توان خطای ساخت را برای آن متصور بود.



شکل ۴-۱۳ دمای آب و تولید تجمعی آب با استفاده از انعکاس‌دهنده تخت و سهموی بر حسب زمان

۴-۴ طرح پیشنهادی

بر اساس نتایج بدست آمده، مطابق شکل ۴-۱۴ سیستم پیشنهادی به عنوان یک دستگاه آب-شیرین کن-آبگرمکن خورشیدی ارایه شده است. یک سیستم آبگرمکن خورشیدی را با اضافه نمودن یک مخزن جوشش و قراردادن کویل داخل مخزن آب گرم می توان به یک سیستم ترکیبی آب شیرین کن-آبگرمکن خورشیدی تبدیل نمود. در نهایت محصول به دست آمده از خروجی کندانسور آب شیرین و آب داخل مخزن کندانسور (مبدل حرارتی) به عنوان آب گرم مصرفی خواهد بود. لازم به ذکر است که نمک ها و رسوب های باقیمانده در مخزن جوشش با استفاده از مواد رسوب زدا از بین می روند و در صورت ایجاد خوردگی، مخزن قابل تعویض و هزینه ای جهت تعویض آن در هزینه های سالانه سیستم در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۱۴ شماتیک طرح پیشنهادی

در جدول ۴-۱ نتایج بدست آمده از آزمایش های انجام شده در شرایط مختلف قابل مشاهده است. با میانگین گیری از میزان تولید روزانه بر اساس نوع انعکاس دهنده مشخص می شود که سیستم به طور میانگین با حالت بدون انعکاس دهنده ۳۹۸ سی سی، با انعکاس دهنده تخت ۴۶۰ سی سی و با انعکاس دهنده سهموی ۳۵۵ سی سی تولید آب شیرین در روز داشته اند. بر این اساس با در نظر

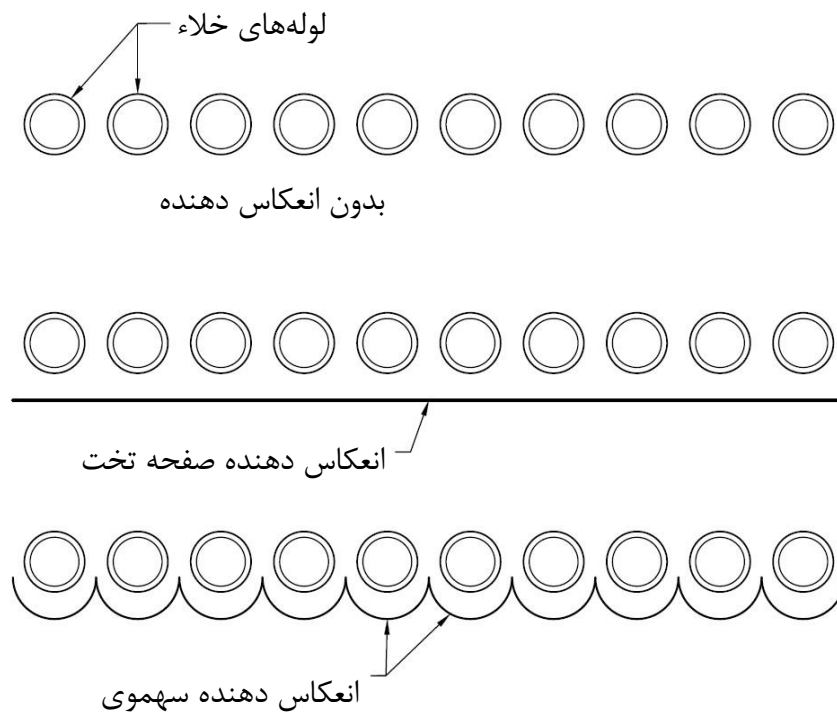
گرفتن عملکرد بهتر انعکاس دهنده تخت و با احتساب تولید بیشتر این سیستم در فصل تابستان، میانگین تولید آب شیرین را برای سیستم پیشنهادی ۵۰۰ سی سی در نظر گرفته شده است.

جدول ۴-۱ نتایج آزمایش‌های مقدماتی و نهایی در محیط باز

ردیف	نوع آزمایش	انعکاس دهنده	سیال لوله خلاء	فصل	تولید روزانه
۱	مقدماتی	-	روغن	تابستان	۶۰۰ CC
۲	مقدماتی	-	هوا	پاییز	۳۲۰ CC
۳	مقدماتی	تخت	هوا	پاییز	۴۹۰ CC
۴	مقدماتی	سهموی	هوا	پاییز	۴۲۰ CC
۵	نهایی	-	روغن	زمستان	۲۷۵ CC
۶	نهایی	تخت	روغن	زمستان	۴۳۰ CC
۷	اصلی	سهموی	روغن	زمستان	۲۹۰ CC

با توجه به این که به طور میانگین به ازای هر لوله خلاء $0.5 \frac{Liter}{Day}$ آب شیرین تولید خواهد شد، با در نظر گرفتن تعداد ۴۰ لوله خلاء برای سیستم، حدود $20 \frac{Liter}{Day}$ آب شیرین تولید خواهد شد. با توجه به میزان انرژی جذب شده توسط آب درون مخزن مبدل حرارتی در طی آزمایش‌های انجام شده، حدود $68/8\%$ تا $76/4\%$ از انرژی حاصل از چگالش آب شیرین در مخزن مبدل حرارتی قابل بازیابی خواهد بود. لذا بر همین اساس مقدار ۲۵۰ لیتر آب گرم از دمای ابتدایی ۲۵ به ۶۰ درجه سانتیگراد خواهد رسید.

طبق طرح پیشنهادی مذکور، برشی از شماتیک سه حالت مختلف بدون انعکاس دهنده، با انعکاس- دهنده صفحه تخت و با انعکاس دهنده سهموی در حالت ۴۰ لوله‌ای در شکل ۴-۱۵ قابل مشاهده است.



شکل ۴-۱۵ شماتیک انعکاس دهنده‌ها برای سیستم پیشنهادی

۴-۵ محاسبه عملکرد سیستم

یکی از معیارهای سنجش عملکرد سیستم‌های آب شیرین کن که معمولاً استفاده می‌شود تولید به ازای سطح کلکتور (PPCA) است. این معیار بر اساس فرمول ۴-۶ مقدار میانگین تولید روزانه بر واحد مساحت کلکتور سیستم می‌باشد.

$$PPCA = \frac{P_{daily}}{A_c} \quad (۴-۳)$$

برای آزمایش با انعکاس دهنده سهموی با سیال روغن تحت آزمایش با شبیه ساز خورشیدی که بهترین عملکرد را داشت با توجه به میانگین تولید روزانه این سیستم که در حدود $20 \frac{Liter}{Day}$ و

مساحت کلکتور که بر اساس طراحی ۴۰ لوله خلاء برابر با ۵/۳۷ مترمربع خواهد بود، مقدار تولید روزانه به ازای هر متر مربع برابر با ۳/۷۲ لیتر محاسبه شد.

مقدار PPCA برای آزمایش‌ها در محیط باز در فصل زمستان برای انعکاس‌دهنده صفحه تخت و سهموی به ترتیب با تولید ۴۳۰ و ۲۷۰ سی سی برابر با ۳/۲ و ۲/۰۱ لیتر بر متر مربع محاسبه شده است.

۴-۶ ارزیابی اقتصادی سیستم

یکی از فاکتورهای مهم انتخاب یک دستگاه، هزینه‌های آن است که خود شامل هزینه اولیه و هزینه جاری می‌باشد. هزینه ساخت سیستم انتخاب شده که تعدادی از قطعات آن با آبگرمکن‌های خورشیدی مشابه است طبق جدول ۴-۲ می‌باشد.

جدول ۴-۲ هزینه‌های ساخت سیستم طراحی شده			
قطعه	تعداد	مبلغ (دلار)	جمع (دلار)
لوله خلاء (۵۸×۱۸۰۰)	۴۰	\$ ۳	\$ ۱۲۰
لوله گرمایی (۸×۱۶۳۰)	۴۰	\$ ۳	\$ ۱۲۰
مخزن جوشش (۱۰۰ لیتری استیل ۳۱۶)	۲	\$ ۷۵	\$ ۱۵۰
کوئل کندانسور (لوله مسی)	۱	\$ ۱۵	\$ ۱۵
مخزن مبدل حرارتی (۲۵۰ لیتری استیل ۳۰۴)	۱	\$ ۱۰۰	\$ ۱۰۰
اتصالات	۱	\$ ۲۰	\$ ۲۰
جمع کل			\$ ۵۲۵

با استفاده از رابطه ۴-۷ که در آن نرخ بهره (R) ۲۰٪، زمان کارکرد (t) ۲۰ سال در نظر گرفته شده است، معادل هزینه سالیانه سیستم (EAC) محاسبه و در جدول ۴-۲ نشان داده شده است. هزینه تعمیر و نگهداری (OC) این سیستم، تنها شامل مخزن جوشش آب می‌باشد که آن هم به دلیل

خوردگی یا رسوب گرفتگی در طول عمر آن است که در هر ۵ سال، هزینه‌ای جهت تعویض آن در نظر گرفته شده است. این هزینه به طور سالانه برابر ۳۰ دلار خواهد بود. لازم به ذکر است که این دستگاه علاوه بر تولید آب شیرین، آب گرم نیز تولید می‌نماید. از این رو باید بخشی از هزینه اولیه دستگاه به این منظور در نظر گرفت شود. هزینه آبگرمکن خورشیدی شامل ۲۵ لوله خلاء و مخزن ۲۵۰ لیتری برابر با ۲۵۰ دلار است که از هزینه اولیه (C) کم شده و برابر ۲۷۵ دلار خواهد شد [۵۴].

$$EAC' = \left[\frac{\left(\frac{OC}{(1+R)^t} \right) - C}{(1 - (1/(1+R)^t)) / R} \right] \quad (7-4)$$

جدول ۳-۴ هزینه‌های مربوط به سهم آب شیرین کن		
نوع هزینه	مبلغ (دلار)	مقدار (لیتر)
هزینه اولیه دستگاه	\$ ۲۷۵	-
هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه	\$ ۳۰	-
هزینه معادل سالیانه (EAC)	\$ ۵۶/۳۱	
حداقل میزان تولید آب شیرین بر اساس فصل زمستان در سال	-	۷۳۰۰
هزینه تولید هر لیتر آب شیرین (CPL)	\$ ۰/۰۰۷۷	-

برای درک بهتر مقدار هزینه تولید آب شیرین، مقدار CPL را در چند پژوهش مشابه که در گذشته صورت گرفته، در جدول ۴-۴ آورده و مقایسه خواهیم کرد.

جدول ۴-۴ مقایسه هزینه تولید هر لیتر آب شیرین

مرجع	سال	نوع	هزینه تولید هر لیتر آب شیرین (CPL)
پژوهش حاضر	۲۰۲۲	تجربی	\$ ۰/۰۰۷۷
Behnam[46]	۲۰۱۶	تجربی	\$ ۰/۰۲۸
Shafii[47]	۲۰۱۶	تجربی - نظری	\$ ۰/۰۱۳۴
Abbaspour[49]	۲۰۱۹	تجربی	\$ ۰/۰۹۴
Essa[52]	۲۰۲۱	تجربی - نظری	\$ ۰/۰۱۲۰۵

فصل ۵ : نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتیجه گیری

با توجه به این روند و افزایش صعودی نیاز انسان‌ها به آب شیرین، می‌بایست در کنار اصلاح الگوی مصرف راهی برای بازیافت پساب‌های صنعتی و غیرصنعتی و همین‌طور شیرین‌سازی آب‌های شور و لب‌شور پیدا کنیم. یکی از راه‌های تولید آب شیرین استفاده از دستگاه‌های نمک‌زدایی آب‌های شور مانند آب دریا و آب‌های لب‌شور مانند آب‌هایی با سختی کم و متوسط است. برای مصارف خانگی و مقیاس کوچک می‌توان از دستگاه‌های آب شیرین کن خورشیدی استفاده کرد.

یکی از روش‌های شیرین‌سازی با استفاده از انرژی خورشید، شیرین‌سازی به روش تبخیر و تقطیر است که آب شیرین تولیدی آن بسیار با کیفیت و دارای سختی بسیار کم می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از لوله خلاء مجهز به لوله گرمایی و انعکاس‌دهنده خورشیدی، میزان تولید آب شیرین ما بین دو سیال واسطه هوا و روغن برای داخل لوله خلاء و دو نوع انعکاس‌دهنده صفحه تخت و سهموی توسط شبیه ساز خورشیدی و همچنین در محیط باز با تابش خورشید آزمایش شد که نتایج آن به شرح زیر می‌باشد.

در بین سیال‌های مورد استفاده در لوله خلاء، با توجه به بیشتر بودن ضریب انتقال حرارت روغن نسبت به هوا، مقدار تولید آب شیرین در آزمایش‌ها با سیال روغن بیشتر بود. در بین انعکاس‌دهنده‌ها نتایج به دست آمده در آزمایش‌ها با شبیه ساز خورشیدی با در نظر گرفتن تابش عمود بر سطح، انعکاس‌دهنده سهموی عملکرد بهتر و تولید آب بیشتری داشت. با بررسی نتایج بدست آمده از تمامی آزمایش‌ها که تحت شرایط آزمایشگاهی صورت گرفته است به این نتیجه رسیدیم که لوله خلاء با سیال روغن و انعکاس‌دهنده سهموی در شرایط مختلف تابش بهترین عملکرد را داشته و به تولید ۱۳۵ سی سی بر ساعت در تابش ثابت ۱۲۰۰ وات بر متر مربع رسیده است. میانگین تولید آب شیرین توسط این سیستم در طول روز به ۵۰۰ الی ۶۰۰ سی سی می‌رسد. همچنین در آزمایش‌های محیط باز، در بازه زمانی طلوع تا غروب روز ۳۰ دی‌ماه، نتایج نشان داد لوله خلاء با سیال روغن و انعکاس‌دهنده صفحه تخت با تولید روزانه ۴۳۰ سی سی عملکرد بهتر و تولید بیشتری داشته است. بعد از

ثبت نتایج و بررسی آن‌ها، با ایجاد تغییراتی در سیستم یک آبگرمکن خورشیدی، مدلی از این سیستم طراحی شد. این سیستم شامل تعداد ۴۰ لوله خلاء، دو مخزن جوشش آب، یک مخزن و مبدل حرارتی برای تقطیر بخار که از آن به عنوان آبگرمکن بهره می‌بریم. میانگین تولید آب شیرین در طول روز این سیستم به حدود ۲۰ لیتر می‌رسد و توانایی افزایش دمای ۲۵۰ لیتر آب را از ۲۵ به ۶۰ درجه سانتیگراد را خواهد داشت.

با محاسبه هزینه ثابت سالیانه، هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه و حداقل میزان تولید سالیانه آب شیرین در سردترین فصل سال، هزینه تولید هر لیتر آب شیرین در این سیستم برابر با $0.077/\$$ می‌باشد.

۲-۵ پیشنهادها

- ۱- ساخت دقیق‌تر متمرکز کننده سهموی و بررسی عملکرد آن
- ۲- ساخت سیستم چند لوله ای و بررسی عملکرد آن در طول سال

با تشکر از پژوهشگاه توسعه صنایع شیمیایی (جهاد دانشگاهی) و شرکت سولارکار

مراجع

١. Kalogirou, S., *Economic analysis of a solar assisted desalination system*. Renewable energy, ١٩٩٧. ١٢(٤): p. ٣٥١-٣٦٧
٢. Bendfeld, J., et al. *Design of a PV-powered reverse osmosis plant for desalination of brackish water*. in *Proceedings of ٧nd world conference and exhibition on photovoltaic solar energy conversion, Vienna, Austria*. ١٩٩٨
٣. Kabeel, A., et al., *Water desalination using a humidification-dehumidification technique—a detailed review*. ٢٠١٣
٤. Buross, O., *The ABCs of desalting*. ٢٠٠٠: International Desalination Association Topsfield, MA.
٥. Fritzmann, C., et al., *State-of-the-art of reverse osmosis desalination*. Desalination, ٢٠٠٧. ٢١٦(١-٣): p. ١-٧٦
٦. Curto, D., V. Franzitta, and A. Guercio, *A review of the water desalination technologies*. Applied Sciences, ٢٠٢١. ١١(٢): p. ٦٧٠
٧. Shatat, M. and S.B. Riffat, *Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources*. International Journal of Low-Carbon Technologies, ٢٠١٤. ٩(١): p. ١-١٩
٨. Greiter, M., et al., *Electrodialysis versus ion exchange: comparison of the cumulative energy demand by means of two applications*. Journal of membrane science, ٢٠٠٤. ٢٣٣(١-٢): p. ١١-١٩
٩. Al-Mutawa, A.A.M., et al., *Desalination in the GCC history present and future*. The Cooperation Council for the Arab States of the Gulf (GCC), ٢٠١٣
١٠. Sharon, H. and K. Reddy, *A review of solar energy driven desalination technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ٢٠١٥. ٤١: p. ١٠٨٠-١١١٨
١١. Tenno, R. and P. Nguyen, *Multistage Flash Evaporator Control in PDE Representation*. IFAC-PapersOnLine, ٢٠١٦. ٤٩(٢٤): p. ٧٠-٧٥
١٢. Al-Karaghoul, A. and L.L. Kazmerski, *Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ٢٠١٣. ٢٤: p. ٣٤٣-٣٥٦
١٣. El-Ghonemy, A., *Performance test of a sea water multi-stage flash distillation plant: Case study*. Alexandria engineering journal, ٢٠١٨. ٥٧(٤): p. ٢٤٠١-٢٤١٣
١٤. Lu, Z. and L. Xu, *Freezing desalination process*. Thermal desalination processes, ٢٠١٠. ٢
١٥. Mohamed, A., et al., *Desalination process using humidification–dehumidification technique: A detailed review*. International Journal of Energy Research, ٢٠٢٠. ٤٥(٣): p. ٣٦٩٨-٣٧٤٩

- . ١٦ Kabeel, A. and S. El-Agouz, *Review of researches and developments on solar stills*. Desalination, ٢٠١١. ٢٧٦(١-٣): p. ١-١٢
- . ١٧ Tiwari, A.K. and G. Tiwari, *Thermal modeling based on solar fraction and experimental study of the annual and seasonal performance of a single slope passive solar still: the effect of water depths*. Desalination, ٢٠٠٧. ٢٠٧(١-٣): p. ١٨٤-٢٠٤
- . ١٨ Thirugnanasambandam, M., S. Iniyan, and R. Goic, *A review of solar thermal technologies*. Renewable and sustainable energy reviews, ٢٠١٠. ١٤(١): p. ٣١٢-٣٢٢
- . ١٩ Patel, K., P. Patel, and J. Patel, *Review of solar water heating systems*. International Journal of Advanced Engineering Technology, ٢٠١٢. ٣(٤): p. ١٤٦-١٤٩
- . ٢٠ Tian, Y. and C.-Y. Zhao, *A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications*. Applied energy, ٢٠١٣. ١٠٤: p. ٥٣٨-٥٥٣
- . ٢١ Jamar, A., et al., *A review of water heating system for solar energy applications*. International Communications in Heat and Mass Transfer, ٢٠١٦. ٧٦: p. ١٧٨-١٨٧
- . ٢٢ Aman, M., et al., *A review of Safety, Health and Environmental (SHE) issues of solar energy system*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ٢٠١٥. ٤١: p. ١١٩٠-١٢٠٤
- . ٢٣ Ayompe, L., et al., *Validated TRNSYS model for forced circulation solar water heating systems with flat plate and heat pipe evacuated tube collectors*. Applied Thermal Engineering, ٢٠١١. ٣١(٨-٩): p. ١٥٣٦-١٥٤٢
- . ٢٤ Jaisankar, S., et al., *A comprehensive review on solar water heaters*. Renewable and sustainable energy reviews, ٢٠١١. ١٥(٦): p. ٣٠٤٥-٣٠٥٠
- . ٢٥ Khan, S.I. and A. Islam, *Performance analysis of solar water heater*. Smart Grid and Renewable Energy, ٢٠١١. ٢(٤): p. ٣٩٦-٣٩٨
- . ٢٦ Chidambaram, L., et al., *Review of solar cooling methods and thermal storage options*. Renewable and sustainable energy reviews, ٢٠١١. : (٦) ١٥p. ٣٢٢٠-٣٢٢٨
- . ٢٧ Hossain, M., et al., *Review on solar water heater collector and thermal energy performance of circulating pipe*. Renewable and sustainable energy reviews, ٢٠١١. ١٥(٨): p. ٣٨٠١-٣٨١٢
- . ٢٨ Kalogirou, S.A., *Solar thermal collectors and applications*. Progress in energy and combustion science, ٢٠٠٤. ٣٠(٣): p. ٢٣١-٢٩٥
- . ٢٩ Othman, Y.H. and K. Sopian, *Teknologi tenaga suria*. ٢٠٠٢: Penerbit Universiti Kebangsaan Malaysia.
- . ٣٠ Fang, X. and D. Li, *Solar photovoltaic and thermal technology and applications in China*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ٢٠١٣. ٢٣: p. ٣٣٠-٣٤٠
- . ٣١ Cabrera, F., et al., *Use of parabolic trough solar collectors for solar refrigeration and air-conditioning applications*. Renewable and sustainable energy reviews, : ٢٠١٣p. ١٠٣-١١٨

- .۳۲ Jradi, M. and S. Riffat, *Tri-generation systems: Energy policies, prime movers, cooling technologies, configurations and operation strategies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۲۰۱۴. ۳۲: p. ۳۹۶-۴۱۵
- .۳۳ Mahian, O., et al., *Performance analysis of a minichannel-based solar collector using different nanofluids*. Energy conversion and management, ۲۰۱۴. ۸۸: p. ۱۲۹-۱۳۸
- .۳۴ Srinivas, M., *Domestic solar hot water systems: Developments, evaluations and essentials for "viability" with a special reference to India*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۲۰۱۱. ۱۵(۸): p. ۳۸۵۰-۳۸۶۱
- .۳۵ Jafarkazemi, F. and H. Abdi, *Evacuated tube solar heat pipe collector model and associated tests*. Journal of Renewable and Sustainable Energy, ۲۰۱۲: (۲) p. ۰۲۳۱۰۱
- .۳۶ Kedar, S., A.R. Kumaravel, and A.K. Bewoor, *Experimental investigation of solar desalination system using evacuated tube collector*. Int J Heat Technol, ۲۰۱۹. ۳۷(۲): p. ۵۲۷-۵۳۲
- .۳۷ Xie, G., et al., *Three-effect tubular solar desalination system with vacuum operation under actual weather conditions*. Energy Conversion and Management, ۲۰۲۰. ۲۰۵: p. ۱۱۲۳۷۱
- .۳۸ El-Maaty, A.E.A., et al., *Performance study of fog desalination system coupled with evacuated tube solar collector*. Desalination, ۲۰۲۱. ۲۰۲۱ p. ۱۱۴۹۶۰
- .۳۹ Kedar, S., et al., *Effect of Reflecting Material on CPC to Improve the Performance of Hybrid Groundwater Solar Desalination System*. International Journal of Photoenergy, ۲۰۲۱. ۲۰۲۱
- .۴۰ Singh, A.K., *Techno-environ-economic-energy-exergy-matrices performance analysis of evacuated annulus tube with modified parabolic concentrator assisted single slope solar desalination system*. Journal of Cleaner Production, ۲۰۲۱: p. ۱۲۹۹۹۶
- .۴۱ Dev, R. and G. Tiwari, *Annual performance of evacuated tubular collector integrated solar still*. Desalination and water Treatment, ۲۰۱۲. ۴۱(۱-۳): p. ۲۰۴-۲۲۳
- .۴۲ Abad, H.K.S., et al., *A novel integrated solar desalination system with a pulsating heat pipe*. Desalination, ۲۰۱۳. ۳۱۱: p. ۲۰۶-۲۱۰
- .۴۳ Liu, Z.-h, R.-L. Hu, and X.-j. Chen, *A novel integrated solar desalination system with multi-stage evaporation/heat recovery processes*. Renewable energy, ۲۰۱۴. ۶۴: p. ۲۶-۳۳
- .۴۴ Panchal, H.N. and P.K. Shah, *Enhancement of distillate output of double basin solar still with vacuum tubes*. Frontiers in Energy, ۲۰۱۴. ۸(۱): p. ۱۰۱-۱۰۹
- .۴۵ Mamouri, S.J., et al., *Experimental investigation of the effect of using thermosyphon heat pipes and vacuum glass on the performance of solar still*. Energy, ۲۰۱۴. ۷۵: p. ۵۰۱-۵۰۷
- .۴۶ Behnam, P. and M.B. Shafii, *Examination of a solar desalination system equipped with an air bubble column humidifier, evacuated tube collectors and thermosyphon heat pipes*. Desalination, ۲۰۱۶. ۳۹۷: p. ۳۰-۳۷

- .٤٧ Shafii, M., et al., *A modified solar desalination system using evacuated tube collector*. Desalination, ٢٠١٦. ٣٩٦: p. ٣٠-٣٨
- .٤٨ Li, S.-F., et al., *Performance study on a passive solar seawater desalination system using multi-effect heat recovery*. Applied Energy, ٢٠١٨. ٢١٣: p. ٣٤٣-٣٥٢
- .٤٩ Abbaspour, M.J., M. Faegh, and M.B. Shafii, *Experimental examination of a natural vacuum desalination system integrated with evacuated tube collectors*. Desalination, ٢٠١٩. ٤٦٧: p. ٧٩-٨٥
- .٥٠ Kedar, S., K.A. Raj, and A. Bewoor, *Performance analysis of hybrid solar desalination system using ETC and CPC*. SN Applied Sciences, ٢٠١٩. ١(٩): p. ١-١٧
- .٥١ Xu, L.-C., et al., *Performance of solar mid-temperature evacuated tube collector for steam generation*. Solar Energy, ٢٠١٩. ١٨٣: p. ١٦٢-١٧٢
- .٥٢ Essa, M.A., et al., *Performance analysis for an inclined tubular still desalination integrated with evacuated tube collector*. Solar Energy, ٢٠٢١. ٢٢٤: p. ٣٦١-٣٧٢
- .٥٣ Co., Z.H.N.E. *Coefficient of Evacuated Tube*. Available from: https://www.alibaba.com/product-detail/Solar-Water-Heater-Heat-pipe-with_٦٢٥٣٨٠٣٣٨٢٤.html?spm=a٢٧٠٠.pc_countrysearch.main٠٧/٢١١/٥١d٢٦٣٤٤LhvXsk.
- .٥٤ Sinclair, D.R., *Equivalent annual cost: a method for comparing the cost of multi-use medical devices*. Canadian Journal of Anesthesia/Journal canadien d'anesthésie, ٢٠١٠. ٥٧(٥): p. ٥٢١-٥٢٢

Abstract

Water is one of the most important elements of the earth, its saline resources are very high and its sweet resources are very low and difficult to access. Desalination of seawater or effluents is a great alternative to prevent rapid depletion of available freshwater. Conventional desalination processes are associated with high energy consumption. Solar energy can be used to prevent environmental pollution caused by fossil energy consumption. For this purpose, in this research, the evaporative water-desalination system with the simultaneous use of a vacuum tube equipped with a heat and reflector tube has been investigated experimentally. First, the heat absorbed by the vacuum tube is transferred to the evaporator chamber using a heat pipe, and then the water vapor produced will be distilled and fresh water will be produced by passing through a helical coil into the heat exchanger tank. The use of two flat and parabolic reflectors next to the tube without reflectors has been evaluated. Also, two oil and air fluids were used separately as filling fluid inside the vacuum tube and its results on fresh water production were recorded and studied. The experiments were performed in two modes: using a solar simulator in the laboratory environment and outdoor experiments in winter. The results using a simulator showed that the use of flat and parabolic reflectors in high radiation increases production by 3 and 6% and in low radiation by 33 and 67%, respectively. Also, using the oil fluid inside the vacuum tube instead of air improves the performance of fresh water production by up to 64%. Finally, the proposed solar water heater-desalination system based on this method, which includes 40 vacuum tubes with oil fluid equipped with heat tubes and flat reflectors, is proposed and presented.

Keywords (5 to 7 keywords): Desalination, Evacuated Tubes Collector, Heat Pipe, CPC Reflector, Flat Reflector



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Systems Engineering

Energy Technology Orientation

Manufacture of Solar Water Desalination using Evacuated Tube Equipped with Reflector

By: Moein Gholami

Supervisor:

Dr. Ali Abbas Nejad

Advisor:

Dr. Mohammad Zamen

February, 2022