

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه تبدیل انرژی

پایان نامه ارشد کارشناسی ارشد

بررسی و بهبود عملکرد خشک کن های پمپ حرارتی به کمک انرژی

خورشیدی

جواد کاوسی داویجانی

استاد راهنما:

دکتر محمود چهارطاقی

شهریور ۹۴

تقدیم

و بعد از مدتها، پس از آنکه سجدن راهبهای فراوان که با حضور شیرین اساتید عزیزم، بارها بنیادهای فراوانشان و شیفتهای زیبای آن دوران، نگاههای پدر

مادرم، با چشمهای پر از برق شوق، و زیبایی حضور خواجهم در کنارم، که حسگیهای این راه را به امید و روشنی راه تبدیل کرده و امیدوارم بتوانم در آیندهی نزدیک

جوایگوی این همه محبت آنها باشم...

اکنون، با احترام فراوان برای این همه تلاش این عزیزان برای موفقیت من....

این پایان نامه را به پدر و مادرم، اساتید عزیز و خواهرم بانهم تقدیم میکنم

امیدوارم قادر به درک زیباییهای وجودشان باشم

با تشکر....

تشکر و قدردانی

تقدیر و تشکر شایسته از اساتذف فریخته و فرزانه جناب دکتر محمود چهارطاقی که با نکته‌های دلاویز و گفته‌های بلند، صحیفه‌های سخن را علم پرور نمود و به‌نواره راه‌نما و راه‌گشای

نگارنده در اتمام و تکمال پایان نامه بوده است.

مقامت زعرش برتر باد همیشه توست اندیشه ات مظفر باد

تعهدنامه

اینجانب جواد کاوسی داویجانی دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی بررسی و بهبود ضریب عملکرد خشک‌کن پمپ حرارتی به کمک انرژی خورشیدی، تحت راهنمایی دکتر چهارطاقی 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 شاهرود» و یا «University of Shahrood» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی 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

- کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) 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

در دهه اخیر استفاده از خشک‌کن‌های مختلف در صنایع غذایی، بیولوژیکی، دارویی رو به افزایش بوده است. استفاده از سیکل‌های با توانایی بازیابی انرژی به منظور بالا نگه داشتن کیفیت محصولات و بهره‌گیری از انرژی نو و تجدیدپذیر خورشیدی می‌تواند دستاورد مفیدی در تکنولوژی خشک‌کردن باشد. سوخت تمیز و پاک انرژی خورشیدی بدون تولید آلاینده‌های مضر امروزه در تمامی صنایع فناوری جدیدی محسوب می‌شود. در تحقیق حاضر خشک‌کن پمپ حرارتی به کمک انرژی خورشیدی در نوع مستقیم اواپراتور-کلکتور مورد تحقیق و ارزیابی قرار گرفت. پارامترهای مؤثر در خروجی این سیکل ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت می‌باشد که تأثیر عوامل گوناگون مانند دمای کندانسور، رطوبت نسبی هوای پیرامون، نرخ جابه‌جایی حجمی کمپرسور، دمای اواپراتور بر این توابع بررسی گشت. برای محاسبه تشعشع جذب شده در کلکتور از داده‌های میانگین موجود از سایر مراجع کمک گرفته و با کمک روابط موجود این مقادیر برای ملاحظات میانگین یک روز و برای ساعت‌های خاصی در شبانه روز بدست آورده شده است. زوایای شیب کلکتور در ماه‌های میانی سال پایین و در ماه‌های زمستان بالاتر انتخاب می‌شوند تا کلکتور بتواند مقدار انرژی بیشتری از خورشید برای بهینه‌سازی سیکل مورد نظر جذب کند. برای مثال در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد کندانسور برای تهران در ماه ژانویه و تشعشع میانگین با افزایش زاویه شیب از ۱۰ به ۴۰ درجه مقدار ضریب عملکرد از ۴ به ۴.۵ افزایش می‌یابد. استفاده از این نوع سیکل در دمای پایین مبرد در کندانسور سبب افزایش ضریب عملکرد و عمر مفید سیال به کار گرفته شده خواهد شد. مقادیر ضریب عملکرد به جذب تشعشع توسط کلکتور بستگی دارد. برای نمونه با نرخ جابه‌جایی حجمی کمپرسور ۰.۰۰۰۵ و تشعشع میانگین، ضرایب عملکرد در ماه ژوئن، شهر تهران از دمای ۶۰ تا ۳۵ درجه کندانسور از مقدار ۵ تا ۸ افزایش می‌یابد. آنالیز سالیانه ضرایب عملکرد در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. ضریب عملکرد در زاویه شیب ۱۰ درجه و دمای کندانسور ۴۰ درجه سانتیگراد از مقدار ۵ در ماه ژانویه تا مقدار ۷ در ماه آگوست (شهر تهران) افزایش می‌یابد. همچنین بازدهی کلکتور از مقدار ۷۰ تا ۸۵ درصد در شرایط گوناگون زمانی، مکانی و دمایی تغییر می‌کند. برای سه شهر بیرجند، شیراز و تهران توابع نهایی بررسی شده است.

واژگان کلیدی: تکنولوژی خشک‌کردن، سیکل پمپ حرارتی، تشعشع جذب شده، زاویه شیب کلکتور،

دمای کندانسور و اواپراتور، ضریب عملکرد

مقالات

جواد کاوسی، محمود چهارطاقی؛ تاثیر پارامترها و عوامل موثر بر بهبود ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت در خشک کن های پمپ حرارتی؛ کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک و صنایع؛ دانشگاه تهران شهریور ۱۳۹۴.

مطالب

-
- فصل ۱ - مقدمه ۱
- ۱-۱ خشک‌کن‌های صنعتی ۲
- ۱-۱-۱ پیش فصل ۲
- ۲-۱-۱ مکانیزم فرآیند، اهمیت موضوع و برخی از خشک‌کن‌ها ۲
- ۳-۱-۱ اصول پایه‌ای و اصطلاحات ۴
- ۴-۱-۱ معرفی چند نمونه از خشک‌کن‌ها ۶
- ۲-۱ خشک کردن به کمک پمپ حرارتی ۹
- ۳-۱ خشک‌کن پمپ حرارتی به کمک انرژی خورشیدی ۱۱
- ۴-۱ جمع بندی این فصل ۱۵
- فصل ۲ - مروری بر تحقیقات پیشین ۱۷
- ۱-۲ مقدمه ۱۸
- ۲-۲ مروری بر تحقیقات صورت گرفته در انتقال جرم و رطوبت ۱۹
- ۳-۲ مروری بر تحقیقات صورت گرفته در خشک‌کن پمپ حرارتی ۲۰
- ۴-۲ مروری بر تحقیقات صورت گرفته در سیستم‌های انبساط مستقیم خورشیدی کمکی به پمپ حرارتی (خشک‌کن‌ها و سایر کاربردها) ۲۳
- ۵-۲ جمع بندی و ضرورت انجام تحقیق ۳۰
- فصل ۳ - مدل‌سازی و معادلات حاکم ۳۳
- ۱-۳ مقدمه ۳۴

- ۳-۲ شماتیک مربوط به سیکل و نحوه گردش جریان ۳۴
- ۳-۳ بررسی ضریب نفوذ و نسبت رطوبت موجود در مواد غذایی ۳۸
- ۳-۳-۱ رابطه فیک در سه مختصات مختلف و حل تحلیلی آن ۳۸
- ۳-۳-۲ تأثیر دما بر ثوابت معادله فیک ۴۱
- ۳-۳-۳ تأثیر دما بر روی ضریب نفوذ مواد غذایی ۴۲
- ۳-۳-۴ جمع بندی ۴۳
- ۴-۳ بررسی معادلات مربوط به پمپ حرارتی و مفروضات مسأله ۴۳
- ۳-۴-۱ مدل ریاضی خشک کن پمپ حرارتی ۴۳
- ۳-۴-۱-۱ فرضیات خشک کن ۴۴
- ۳-۴-۱-۲ معادلات به کار رفته در خشک کن ۴۵
- ۳-۴-۱-۳ معادلات رطوبت زدا ۴۶
- ۳-۴-۱-۴ معادلات کمپرسور ۴۶
- ۳-۴-۱-۵ معادلات کندانسور ۴۷
- ۳-۴-۱-۶ معادلات مربوط به اواپراتور-کلکتور ۴۷
- ۳-۴-۱-۷ معادلات ضریب عملکرد ۴۸
- ۳-۴-۲ معادلات به کار رفته دیگر در این سیستم ۴۸
- ۳-۴-۳ جمع بندی این بخش ۵۲
- ۳-۵ محاسبه انرژی جذب شده خورشیدی بر واحد سطح در کلکتور تخت ۵۳
- ۳-۵-۱ تغییرات انرژی تابشی در خلا ۵۳

- ۳-۵-۲ تعاریف و اصطلاحات ۵۴
- ۳-۵-۳ راستا و جهت تشعشع از نوع تابش مستقیم ۵۵
- ۳-۵-۴ نسبت تشعشع مستقیم در صفحات شیبدار در مقابل به صفحات افقی ۵۸
- ۳-۵-۵ تشعشع بر روی سطوح افقی در خلأ ۶۰
- ۳-۵-۶ سهم تشعشع پراکندگی و مستقیم در تابش روزانه ۶۱
- ۳-۵-۷ تخمین تشعشع در هر ساعت بر اساس داده‌های روزانه ۶۲
- ۳-۵-۸ تشعشع بر روی یک سطح شیبدار: مدل ایزوتروپیک آسمان ۶۳
- ۳-۵-۹ عبور تشعشع از میان پوشش (شیشه) و جذب انرژی ۶۴
- ۳-۵-۱۰ انعکاس و عبور تشعشع ۶۴
- ۳-۵-۱۱ محاسبه ضریب جذب و عبور پوشش ۶۷
- ۳-۵-۱۲ نسبت ضریب جذب به ضریب جذب نرمال ر صفحه بر اساس تابعی از زاویه حادث شده در تشعشع مستقیم ۶۸
- ۳-۵-۱۳ محاسبه زوایای برخورد مؤثر در تشعشع پراکندگی و بازتابش زمین ۶۹
- ۳-۵-۱۴ محاسبه تشعشع جذب شده توسط کلکتور ۷۰
- ۳-۵-۱۵ روابط مربوطه برای محاسبه ضریب هدررفتگی و فاکتور کارایی کلکتور ۷۱
- ۳-۵-۱۶ جمع بندی این بخش: ۷۲
- ۳-۶-۱ الگوریتم حل مساله ۷۳
- ۳-۶-۲ محاسبه دمای کندانسور با توجه به مدل خشک کن و پمپ حرارتی ۷۳
- ۳-۶-۲ الگوریتم محاسبه شدت تشعشع جذب شده (S) ۷۵

۳-۶-۳	الگوریتم نهایی محاسبه ضریب عملکرد و نرخ رطوبت زدایی	۷۶
۳-۶-۴	مفروضات دیگر حل الگوریتم	۷۷
فصل ۴ - نتایج		
۸۱		
۴-۱	مقدمه	۸۲
۴-۲	وابستگی دمای کندانسور به رطوبت نسبی و تقریب‌های به کار گرفته شده در تحلیل	
نتایج		
۸۲		
۴-۳	پارامترهای خروجی در شهر بیرجند	۸۴
۴-۳-۱	خروجی‌های مورد نظر در دمای هوا و شدت تشعشع جذب شده میانگین	۸۴
۴-۳-۲	خروجی‌های دیگر بر اساس داده‌های ماهانه و شدت تشعشع ماکزیمم	۹۰
۴-۴	داده‌های خروجی شهر شیراز	۹۲
۴-۴-۱	خروجی‌های مورد نظر در دمای هوا و شدت تشعشع میانگین	۹۲
۴-۴-۲	خروجی‌های دیگر بر اساس داده‌های ماهانه و شدت تشعشع ماکزیمم	۹۹
۴-۵	داده‌های خروجی شهر تهران	۱۰۲
۴-۵-۱	داده‌های خروجی شهر تهران در دمای هوا و شدت تشعشع میانگین	۱۰۲
۴-۵-۲	داده‌های خروجی بر اساس تشعشع ماکزیمم و عملکرد سالیانه	۱۰۸
۴-۶	مقایسه نتایج کلی سه شهر و تأثیرگذاری عوامل دیگر	۱۱۱
۴-۶-۱	مقایسه ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت در ماه‌های گوناگون	۱۱۱
۴-۶-۲	تأثیر افزایش زاویه شیب کلکتور	۱۱۲
۴-۶-۳	تأثیر نرخ جابه‌جایی حجمی کمپرسور	۱۱۵

- ۷-۴ صحت سنجی الگوریتم و داده‌ها ۱۱۷
- ۸-۴ ملاحظات انرژی و تحلیل اقتصادی سیکل ۱۲۰
- ۱-۸-۴ نتیجه‌گیری ملاحظات اقتصادی ۱۲۳
- ۹-۴ استفاده از مبردهای گوناگون و تحلیل کارایی سیکل ۱۲۴
- فصل پنجم - جمع‌بندی و پیشنهادات ۱۲۷
- مراجع ۱۳۱
-

شکل‌ها

- شکل ۱-۱: خشک کن دسته‌ای قفسه‌ای: ۱- پوشش ۲- قفسه و حمل کننده ۳- گرم کن ۴- فن ۵- فیلتر هوا ۶- شیرهای کنترل [۱]..... ۶
- شکل ۱-۲: پیکره یک خشک کن دسته‌ای (برای خشک کردن سرامیک) [۱]..... ۸
- شکل ۱-۳: شماتیک خشک کن سینی دار ناپیوسته [۱]..... ۸
- شکل ۱-۴: شکل ساده شده خشک کن چرخان با منبع حرارتی مستقیم [۱]..... ۹
- شکل ۱-۵: شمای کلی خشک کن پمپ حرارتی [۱]..... ۱۱
- شکل ۱-۶: شمای کلی جریان مبرد در سیستم انبساط مستقیم خورشیدی [۳]..... ۱۴
- شکل ۱-۷: شمایی کلی از یک نوع سیستم خشک کن پمپ حرارتی به کمک انرژی خورشیدی [۳]..... ۱۵
- شکل ۳-۱: شمای کلی سیستم انبساط مستقیم خورشیدی کمکی به خشک کن پمپ حرارتی..... ۳۶
- شکل ۳-۲: نمودار تغییرات دما بر حسب آنتروپی برای مبرد در سیکل پمپ حرارتی..... ۳۷
- شکل ۳-۳: نمودار تغییرات رطوبت مطلق هوا در سیکل انبساط مستقیم خورشیدی کمکی به خشک کن پمپ حرارتی..... ۳۸
- شکل ۳-۴: زاویه اوج، زاویه شیب کلکتور، زاویه سمتی خورشیدی، زاویه سمتی سطح برای یک سطح شیبدار..... ۵۷
- شکل ۳-۵: صفحه ای که در آن زاویه سمتی خورشیدی نمایان است..... ۵۷
- شکل ۳-۶: تشعشع مستقیم در صفحه افقی یا سطح شیبدار..... ۵۹
- شکل ۳-۷: زوایای تابش و بازتابش در دو محیط با ضرایب شکست گوناگون..... ۶۵
- شکل ۳-۸: عبور از پوشش بدون در نظر گرفتن ضریب جذب برای آن..... ۶۷
- شکل ۳-۹: نسبت جذب تشعشع به جذب تشعشع نرمال برای یک جسم سیاه..... ۶۹
- شکل ۳-۱۰: فلوچارت الگوریتم حل توابع نهایی..... ۷۹
- شکل ۳-۱۱: فلوچارت محاسبه دمای کندانسور در خشک کن پمپ حرارتی..... ۸۰
- شکل ۴-۱: تغییرات دمای کندانسور و نرخ جریان جرمی هوا در مقابل دمای هوای ورودی و رطوبت نسبی

- ثابت ۲۰ درصد..... ۸۳
- شکل ۲-۴: تغییرات دمای کندانسور بر حسب رطوبت نسبی در دمای ثابت ورودی $30^{\circ}C$ ۸۳
- شکل ۳-۴: شدت تشعشع ورودی و جذب شده میانگین در مقابل ماه‌های سال شهر بیرجند..... ۸۵
- شکل ۴-۴: دمای اواپراتور-کلکتور در مقابل دمای کندانسور در چهار ماه اول سال میلادی شهر بیرجند... ۸۵
- شکل ۵-۴: ضریب عملکرد سیستم نسبت به دمای کندانسور در چهار ماه اول میلادی شهر بیرجند..... ۸۶
- شکل ۶-۴: نرخ جدایش رطوبت در مقابل دمای کندانسور در چهار ماه اول میلادی شهر بیرجند..... ۸۶
- شکل ۷-۴: میزان تغییرات بازدهی کلی کلکتور در مقابل دمای کندانسور در ماه ژانویه شهر بیرجند..... ۸۷
- شکل ۸-۴: تغییرات دمای اواپراتور-کلکتور در مقابل کندانسور چهار ماه دوم سال میلادی شهر بیرجند..... ۸۸
- شکل ۹-۴: تغییرات ضریب عملکرد در مقابل دمای کندانسور چهار ماه دوم سال میلادی شهر بیرجند..... ۸۸
- شکل ۱۰-۴: تغییرات دمای اواپراتور-کلکتور در مقابل دمای کندانسور چهار ماه سوم سال میلادی شهر بیرجند..... ۸۹
- شکل ۱۱-۴: تغییرات ضریب عملکرد در مقابل دمای کندانسور چهار ماه سوم سال میلادی شهر بیرجند... ۹۰
- شکل ۱۲-۴: تغییرات نرخ جدایش رطوبت در مقابل دمای کندانسور چهار ماه سوم میلادی شهر بیرجند... ۹۰
- شکل ۱۳-۴: تغییرات ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت در مقابل دمای کندانسور ۴۰ درجه سانتیگراد در مقابل ماه‌های میلادی در شهر بیرجند..... ۹۱
- شکل ۱۴-۴: شدت تشعشع ورودی و جذب شده ماکزیمم توسط کلکتور که با ساعت وقوع 11.30 در مقابل ماه‌های میلادی در شهر بیرجند..... ۹۱
- شکل ۱۵-۴: تغییرات دمای اواپراتور و ضریب عملکرد در قابل دمای کندانسور در ساعت 11.30 ماه ژولای در شهر بیرجند..... ۹۲
- شکل ۱۶-۴: نمودار توزیع شدت تشعشع میانگین در ماه‌های مختلف سال در شهر شیراز..... ۹۳
- شکل ۱۷-۴: نمودار شدت تشعشع جذب شده چهار ماه اول از ساعت 8.30 تا 11.30 شهر شیراز..... ۹۳
- شکل ۱۸-۴: تغییرات دمای اواپراتور در مقابل دمای کندانسور چهار ماه اول سال میلادی شهر شیراز..... ۹۵
- شکل ۱۹-۴: تغییرات ضریب عملکرد در مقابل دمای کندانسور در چهار ماه اول سال شهر شیراز..... ۹۶
- شکل ۲۰-۴: تغییرات نرخ جدایش رطوبت بر حسب دمای کندانسور چهار ماه اول سال میلادی شهر شیراز

- ۹۶.....
- شکل ۴-۲۱: نمودار تغییرات دمای اواپراتور در مقابل دمای کندانسور چهار ماه دوم سال میلادی شهر شیراز
- ۹۷.....
- شکل ۴-۲۲: نمودار تغییرات ضریب عملکرد در مقابل دمای کندانسور چهار ماه دوم سال میلادی شهر شیراز.....
- ۹۸.....
- شکل ۴-۲۳: تغییرات دمای اواپراتور در مقابل دمای کندانسور در چهار ماه سوم سال میلادی شهر شیراز.....
- شکل ۴-۲۴: تغییرات ضریب عملکرد در مقابل دمای کندانسور در چهار ماه سوم میلادی شهر شیراز.....
- شکل ۴-۲۵: تغییرات نرخ جدایش رطوبت در مقابل دمای کندانسور چهار ماه سوم میلادی شهر شیراز.....
- شکل ۴-۲۶: تغییرات ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت در مقابل دمای کندانسور ۴۰ درجه سانتیگراد شهر شیراز.....
- ۱۰۰.....
- شکل ۴-۲۷: تغییرات شدت تشعشع جذب شده و ورودی بر کلکتور در ماه‌های میانی سال میلادی شهر شیراز.....
- ۱۰۱.....
- شکل ۴-۲۸: تغییرات ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت ماکزیمم در ماه ژوئن شهر شیراز (ساعت ۱۱.۳۰).....
- ۱۰۱.....
- شکل ۴-۲۹: تغییرات دمای اواپراتور-کلکتور و بازدهی کلکتور در مقابل دمای کندانسور در ساعت ۱۱.۳۰ ماه ژوئن شهر شیراز.....
- ۱۰۲.....
- شکل ۴-۳۰: توزیع شدت تشعشع میانگین در واحد سطح در ماه‌های مختلف سال در تهران.....
- ۱۰۳.....
- شکل ۴-۳۱: شدت تشعشع ماه‌های ژوئن تا سپتامبر بر حسب ساعات روز شهر تهران.....
- ۱۰۴.....
- شکل ۴-۳۲: تغییرات دمای اواپراتور در مقابل کندانسور در چهار ماه اول سال میلادی شهر تهران.....
- ۱۰۵.....
- شکل ۴-۳۳: تغییرات ضریب عملکرد در مقابل دمای کندانسور چهار ماه اول سال میلادی شهر تهران.....
- ۱۰۵.....
- شکل ۴-۳۴: تغییرات نرخ جدایش رطوبت در مقابل دمای کندانسور چهار ماه اول سال شهر تهران.....
- ۱۰۶.....
- شکل ۴-۳۵: نمودار تغییرات دمای اواپراتور نسبت به دمای کندانسور چهار ماه دوم سال شهر تهران.....
- ۱۰۶.....
- شکل ۴-۳۶: نمودار تغییرات ضریب عملکرد نسبت به دمای کندانسور چهار ماه دوم سال میلادی شهر تهران.....
- ۱۰۷.....

- شکل ۴-۳۷: تغییرات دمای اوپراتور-کلکتور بر حسب دمای کندانسور چهار ماه سوم سال شهر تهران....۱۰۷
- شکل ۴-۳۸: تغییرات ضریب عملکرد در مقابل دمای کندانسور چهار ماه سوم میلادی، شهر تهران.....۱۰۸
- شکل ۴-۳۹: تغییرات نرخ جدایش رطوبت در مقابل دمای کندانسور چهار ماه سوم سال میلادی شهر تهران
.....۱۰۸
- شکل ۴-۴۰: تغییرات ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت در ماه‌های مختلف سال در دمای کندانسور ۴۰
درجه سانتیگراد.....۱۰۹
- شکل ۴-۴۱: تغییرات ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت در مقابل دمای کندانسور در ماه آگوست و
ساعت ۱۱.۳۰ (بیشترین مقادیر ضریب عملکرد).....۱۱۰
- شکل ۴-۴۲: تغییرات نرخ جریان جرمی مبرد و دمای اوپراتور- کلکتور در مقابل دمای کندانسور در تهران،
ماه آگوست و ساعت ۱۱.۳۰.....۱۱۰
- شکل ۴-۴۳: ضریب عملکرد سه شهر تهران، بیرجند و شیراز در دمای کندانسور ۵۰ درجه سانتیگراد زاویه
شیب کلکتور ۱۰ درجه.....۱۱۱
- شکل ۴-۴۴: نمودار تغییرات نرخ رطوبت زدایی بر اساس ماه‌های میلادی در سه شهر تهران، شیراز و
بیرجند در دمای کندانسور و زاویه شیب ۱۰ درجه.....۱۱۲
- شکل ۴-۴۵: نمودار تغییرات فاکتور تشعشع مستقیم بر اساس ماه‌های میلادی در شهر بیرجند ساعت
۱۱.۳۰.....۱۱۳
- شکل ۴-۴۶: نمودار تغییرات میانگین شدت تشعشع جذب شده بر واحد سطح شهر تهران بر اساس ماه‌های
سال.....۱۱۴
- شکل ۴-۴۷: نمودار تغییرات ماکزیمم شدت تشعشع جذب شده بر واحد سطح در شهر تهران بر اساس
ماه‌های سال.....۱۱۴
- شکل ۴-۴۸: تغییرات دمای اوپراتور در ماه‌های گوناگون در شهر تهران، زوایای شیب مختلف، دمای
کندانسور $50^{\circ}C$ بر اساس شدت تشعشع میانگین بر واحد سطح.....۱۱۵
- شکل ۴-۴۹: نمودار تغییرات ضریب عملکرد در ماه‌های گوناگون در شهر تهران، زوایای شیب مختلف، دمای
کندانسور $50^{\circ}C$ بر اساس شدت تشعشع میانگین بر واحد سطح.....۱۱۵

- شکل ۴-۵۰: تغییرات دمای اواپراتور نسبت به دمای کندانسور در نرخ جابه‌جایی‌های مختلف کمپرسور در شدت تشعشع میانگین ماه ژوئن در شهر تهران..... ۱۱۶
- شکل ۴-۵۱: نمودار تغییرات ضریب عملکرد نسبت به دمای کندانسور در نرخ جابه‌جایی‌های مختلف کمپرسور در شدت تشعشع میانگین ماه ژوئن در شهر تهران..... ۱۱۷
- شکل ۴-۵۲: نمودار تغییرات رطوبت‌زدایی نسبت به دمای کندانسور در نرخ جابه‌جایی‌های مختلف کمپرسور در شدت تشعشع میانگین ماه ژوئن در شهر تهران..... ۱۱۷
- شکل ۴-۵۳: نمودار توزیع شدت تشعشع جذب شده بر واحد سطح میانگین و ماکزیمم شدت تشعشع... ۱۱۸
- شکل ۴-۵۴: ضرایب عملکرد در طول سال در تحقیق حاضر و مرجع [۴۱] در دمای کندانسور ۶۰ درجه و شدت تشعشع میانگین..... ۱۱۹
- شکل ۴-۵۵: مقادیر کار ورودی به کمپرسور در دمای کندانسور ۵۰ درجه سانتیگراد و شرایط میانگین آب و هوایی در تهران در سه مبرد گوناگون..... ۱۲۵
- شکل ۴-۵۶: نرخ رطوبت‌زدایی در ماه‌های گوناگون شهر تهران با دمای کندانسور ۵۰ درجه سانتیگراد و داده‌های آب و هوایی میانگین در سه مبرد گوناگون..... ۱۲۶
- شکل ۴-۵۷: نمودار ضریب عملکرد بر حسب ماه‌های مختلف در شهر تهران و داده‌های میانگین در سه مبرد گوناگون و دمای کندانسور ۵۰ درجه سانتیگراد..... ۱۲۶

جداول

- جدول ۱-۳ انرژی فعالسازی در مواد غذایی گوناگون طبق مراجع مختلف ۴۲
- جدول ۲-۳ ضرایب به کار رفته در محاسبه فشار بخار اشباع دمای ورودی خشک کن ۴۹
- جدول ۳-۳: ضرایب مربوطه برای محاسبه حجم مخصوص، آنتالپی مبرد در کندانسور و اواپراتور در حالت ایده آل ۵۲
- جدول ۴-۳: ضرایب مربوطه برای محاسبه حجم مخصوص و آنتالپی مبرد در خروجی اواپراتور در حالت واقعی ۵۲
- جدول ۵-۳: پارامترهای فرضی در کلکتور در به منظور محاسبه ضریب هدررفتگی کلی ۷۷
- جدول ۶-۳: مقادیر به کار رفته در محاسبه فاکتور بازدهی کلکتور ۷۷
- جدول ۱-۴: داده های آب و هوایی شهر بیرجند ۸۴
- جدول ۲-۴: داده های آب و هوایی شهر شیراز ۹۴
- جدول ۳-۴: داده های آب و هوایی شهر تهران ۱۰۲
- جدول ۴-۴: درصد تغییرات خطای نسبی برای محاسبه ضریب عملکرد در شهر آتلانتا ۱۲۱
- جدول ۵-۴: هزینه های ثابت برای خشک کن پمپ حرارتی به کمک انرژی خورشیدی ۱۲۳
- جدول ۶-۴: محاسبه بار حرارتی سالیانه برای مصرف آب گرم کن در سیکل انبساط مستقیم خورشیدی ۱۲۴

فهرست علائم

ثابت حل معادله لگاریتمی فیک	A
مساحت کلکتور	A_c
ثوابت محاسبه خواص مبرد r134 در حالت ایده آل	a₁ – a₁₈
ثوابت محاسبه خواص مبرد r134 در حالت واقعی	b₁ – b₁₂
شیب لگاریتمی حل معادله فیک	B
فاکتور انشعاب هوا در پمپ حرارتی	BF
ضرایب به کار رفته در محاسبه فشار اشباع	C₁ – C₇
ضریب هدایت اتصال در کلکتور	C_b
ظرفیت حرارتی مخصوص هوای خشک	C_{pa}
ظرفیت حرارتی مخصوص هوای مرطوب	C_{hum}
ظرفیت حرارتی مخصوص بخار آب	C_{pv}
ضریب نفوذ مؤثر در مواد غذایی	D_{eff}
قطر داخلی لوله مبرد (تیوب)	D
پارامتر زمان خورشیدی	E
انرژی فعالسازی یا برانگیختگی	E_a
فاکتور بازدهی کلکتور	F'
تشعشع مستقیم در سطوح افقی در خلأ	G₀
تشعشع خروجی در خلأ در جهت عمود بر صفحه	G_{on}
آنتالپی هوای در حال جریان	H
آنتالپی نهان بخار آب در دمای صفر درجه	h_{fg}
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی باد	h_w
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی درون لوله	h_{fi}
آنتالپی مبرد	H
مقدار تشعشع روزانه در صفحه افقی	H₀
مقدار تشعشع روزانه میانگین در صفحه افقی	\bar{H}
مجموع تشعشع فرودی به صفحه کلکتور	I_t
شدت تشعشع در صفحه افقی	I₀
شدت تشعشع میانگین افقی	\bar{I}

مقدار تشعشع مستقیم	I_b
مقدار تشعشع بازتابش زمین	I_g
مقدار تشعشع پراکندگی	I_d
عدد صحیح مثبت در سری حل معادله فیک	J
ضریب هدایت حرارتی صفحه کلکتور	K
ثابت معادله فیک	k_p
شاخص روشنی در محاسبه شدت تشعشع	K_t
ثابت معادله نمایی و معادله پیچ	k_s
ضخامت ماده در دستگاه کوارتیزین معادله فیک	L
زمان خورشیدی	L_{st}
زمان استاندارد محلی	L_{loc}
محتوای رطوبت	M
محتوای رطوبت بی بعد	MR
محتوای رطوبت بی بعد در ورودی خشک کن	$MR_{\theta i}$
محتوای رطوبت بی بعد در خروجی خشک کن	$MR_{\theta f}$
نمای پلی تروپیک در میرد در حال جریان در کمپرسور	M
نرخ جریان جرمی هوای در حال جریان در سیکل	\dot{m}_a
جرم ماده خشک شونده درون سینی خشک کن	m_p
نرخ جرمی رطوبت جدا شده در سطح رطوبت زدا	\dot{m}_{we}
مقدار جرمی ماده خشک شده پس از فرآیند	m_d
نرخ جریان جرمی میرد	\dot{m}_r
تعداد پوشش به کار رفته در کلکتور	N
ضریب شکست محیط اول در برخورد اشعه	n_1
ضریب شکست محیط دوم در برخورد اشعه	n_2
شماره روز از سال	N
فشار جزئی بخار حباب خشک	p_d
فشار بخار اشباع در شرایط حباب خشک	p_{sd}
فشار اشباع در دمای حباب تر	p_{sw}
توان جذب شده توسط کلکتور	Q_u
حرارت	Q_{eva}

Q_c	حرارت منتقل شده بین مبرد و هوای در حال جریان در کندانسور
R	ثابت جهانی گازها
R_b	فاکتور تشعشع مستقیم
r_c	شعاع در مختصات استوانه ای مربوط به معادله فیک
$r_{ }$	جزء موازی اشعه نامتقارن
r_{\perp}	جزء عمود اشعه نامتقارن
r_t	نسبت تشعشع ساعت به ساعت به تشعشع روزانه
r_d	نسبت تشعشع ساعت به ساعت پراکندگی به تشعشع روزانه پراکندگی
RH	رطوبت نسبی هوای پیرامون
S	تشعشع جذب شده توسط کلکتور
T_{air}	دمای هوای پیرامون
T	دمای مبرد در نقاط گوناگون سیکل
T_5	دمای مبرد در خروجی کندانسور
T_2	دمای مبرد در خروجی اواپراتور
t_r	زمان انجام مرحله به مرحله فرآیند خشک کردن
t	دمای هوای پیرامون در سیکل
t_{di}	دمای ورودی هوای خشک کن
t_{do}	دمای خروجی هوای خشک کن
t_{co}	دمای خروجی هوای کندانسور
t_{deho}	دمای خروجی هوای رطوبت‌زدا
t_{dehs}	دمای سطح رطوبت‌زدا
t_w	دمای حباب تر
T_{pm}	دمای میانگین صفحه جذب کننده کلکتور
U_l	ضریب هدررفتگی در کلکتور
VD	نرخ جابه‌جایی حجمی کمپرسور
w	رطوبت مطلق هوای در حال جریان در سیکل
β_n	ریشه n ام تابع بسل
W	فاصله بین دو تیوب
η_{comp}	بازدهی مکانیکی کمپرسور
η_v	بازدهی حجمی کمپرسور

v	حجم مخصوص مبرد
Δv	اختلاف حجم مخصوص مبرد در خروجی کندانسور در حالت اشباع و مادون سرد
ϕ	زاویه عرض جغرافیایی
δ	زاویه انحراف
β	زاویه شیب کلکتور یا همان زاویه تصادم
γ	زاویه سمتی سطح
γ_s	زاویه سمتی خورشیدی
ω	زاویه ساعت
ω_s	زاویه طلوع خورشید
α	ضریب جذب صفحه کلکتور
α_n	ضریب جذب عمود بر صفحه
α_s	زاویه ارتفاع خورشید
θ	زاویه برخورد موثر برای تشعشع مستقیم
θ_z	زاویه اوج
$\theta_{e,g}$	زاویه موثر بر قسمت بازتابش زمین
$\theta_{e,d}$	زاویه موثر بر قسمت پراکندگی
ρ_g	ضریب انعکاس زمین
τ_{\perp}	ضریب عبور جزء عمود بر صفحه
τ_r	ضریب عبور کلی
τ_{RN}	ضریب عبور برای N پوشش
σ	ثابت استفان بولتزمن
ϵ_g	ضریب صدور پوشش
ϵ_p	ضریب صدور صفحه جاذب
η	بازدهی کلی کلکتور

فصل ۱ - مقدمه

۱-۱ خشک کن های صنعتی

۱-۱-۱ پیش فصل

یکی از صنایع پرکاربرد امروز جهان (به خصوص کشورهای توسعه یافته) خشک کردن^۱ است. حفظ کیفیت محصولات، کاهش وزن و نگهداری از محصولات با ارزش سبب شد تا محققین به طرق مختلفی صنعت خشک کردن را رونق بخشند. در صنایع غذایی کاربرد این فناوری بسیار بالاست. افزایش چشمگیر کاربرد انواع خشک کن ها باعث شده در موادی مانند زغال سنگ، سرامیک، الوارهای چوب و... از روش های جدیدتری استفاده شود.

۱-۱-۲ مکانیزم فرآیند، اهمیت موضوع و برخی از خشک کن ها

در فرآیندهای مختلف خشک کردن، مواد جامد، شبه جامد و مایع با تبخیر مایع درون آنها و تبدیل آن به فاز بخار با اعمال گرما، به محصولات جامد خشک تبدیل می شوند. آب زدایی مناسب از محصولات بسیار حساس به گرما، نیاز به یک منبع گرمای کنترل شده برای تبخیر یا تصعید یا حل همزمان بخار آب ایجاد شده دارد. در خشک کردن انجمادی خلأ، آب یا محلول، از جامد مرطوب به صورت بخار، توسط تصعید از مواد منجمد در یک محفظه خلا زدوده می شود. به عنوان یک مورد خاص، در خشک کردن انجمادی که مایع موجود در مایع در زیر نقطه سه گانه آن منجمد می شود، خشک کردن توسط فرآیند تصعید و تبدیل رطوبت از جامد به بخار به طور مستقیم صورت می گیرد. بنابراین این تعریف، تبدیل مواد مایع به حالت تغلیظ شده (اوپراسیون) و آب زدایی مکانیکی مانند فیلتر کردن، سانتریفوژ کردن، ته نشین کردن، جداسازی فوق بحرانی آب از ژل ها که باعث تولید ژل با تخلخل زیاد (عصاره گیری) می شود و یا خشک کردن مایعات و گازها به وسیله صفحات مشبک مولکولی (جذب سطحی) را شامل نمی گردد. تغییر فاز جامد و ایجاد فاز جامد به عنوان محصول نهایی، هدف اصلی فرآیندهای خشک کردن است. خشک کردن یکی از فرآیندهای مهم در صنایع

¹ -drying

شیمیایی، کشاورزی، بیوتکنولوژی، دارویی، غذایی، پلیمری، کاشی و سرامیک، چوب و کاغذ و تهیه مواد معدنی است. خشک کردن تقریباً یکی از قدیمی‌ترین، عمومی‌ترین و متنوع‌ترین فرآیندهای صنایع شیمیایی است. در متون قدیمی تاکنون به حدود چهارصد نوع خشک کن مختلف اشاره شده است و این در حالی است که در حال حاضر حدود صد نوع خشک کن مختلف در سرتاسر دنیا وجود دارد. این فرآیند به خاطر انرژی نهان تبخیر آب با تقطیر به عنوان یکی از فرآیندهای انرژی بر رقابت دارد و به طور ذاتی فرآیندی با راندمان پایین است. زیرا در آن اکثر موارد از هوای گرم به عنوان واسطه تبادل گرما استفاده می‌شود. مطالعات مختلف، مصرف انرژی جهانی فرآیند خشک کردن صنعتی را بین ۱۵-۱۰ درصد برای آمریکا، کانادا، فرانسه و انگلیس و ۲۵-۲۰ درصد برای دانمارک و آلمان گزارش کرده‌اند. [۱]

میزان مصرف انرژی در فرآیند های خشک کردن از مقدار پایین کمتر از ۵٪ در صنایع شیمیایی تا زیاد بیشتر از ۳۵٪ در فرآیندهای تولید کاغذ است، درجه بندی می‌شود. به عنوان مثال در آمریکا، هزینه خشک کن ها حدود ۸۰۰ میلیون دلار در سال تخمین زده شده‌است. بنابراین هزینه خشک کن‌ها، هزینه عملکردی است که بیشتر از هزینه سرمایه گذاری اولیه آنها می‌باشد.

خشک کردن مواد مختلف ممکن است به یک یا چند دلیل لازم باشد: برای جابه‌جایی آسان جریان آزاد مواد جامد، حفظ و نگهداری، کاهش هزینه‌های حمل و نقل، رسیدن به کیفیت مورد نظر محصول و غیره... در بسیاری از فرآیندها، خشک کردن نامناسب ممکن است باعث صدمات جبران ناپذیر به کیفیت مواد و نیز غیر قابل فروش شدن محصول شود. : قبل از مطالعه و بررسی اصول فرآیند خشک کردن باید ویژگی‌های منحصر به فرد فرآیند خشک کردن را دانست. به منظور چالش کشیدن محققین در این زمینه موارد زیر بیانگر گستره کارکرد فرآیند خشک کردن خواهد بود

۱- اندازه مواد ممکن است از میکرون تا ده سانتی متر باشد (در ضخامت و یا عمق)

۲- تخلخل مواد ممکن است بین صفر تا ۹۹/۹٪ باشد.

۳- زمان خشک کردن ممکن است بین ۰.۲۵ ثانیه (خشک کردن دستمال کاغذی) تا پنج ماه

(برای چوب های سخت) باشد.

۴- ظرفیت تولید ممکن است بین $0.1 \frac{kg}{h}$ تا $100 \frac{ton}{h}$ باشد.

۵- دمای خشک کردن ممکن است کمتر از دمای نقطه سه گانه تا بیشتر از دمای نقطه بحرانی مایع در نظر گرفته شود.

۶- فشار عملکرد ممکن است جزیی از میلی بار تا ۲۵ اتمسفر لحاظ شود.

۷- اعمال گرما ممکن است در حالت پیوسته یا ناپیوسته به صورت جابه جایی، هدایت، تشعشع یا میدان های مغناطیسی باشد.

واضح است که نمی توان از ساختار طراحی یکتایی برای انواع مختلف خشک کردن استفاده کرد. لازم است با مراجعه به اصول انتقال گرما، جرم و مومنتوم که با مفاهیم خواص مواد (کیفیت) به هم پیوند می خورد، نسبت به طراحی یک خشک کن یا بررسی یک نمونه موجود اقدام کرد. به بیان ریاضی، همه فرآیندها، حتی در ساده ترین خشک کن ها، بسیار غیرخطی هستند. در نتیجه توسعه آنها برای موارد بزرگ تر و واقعی تر بسیار مشکل است. انجام آزمایش بر روی نمونه آزمایشگاهی در آزمایشگاه به همراه تجربیات ویژه لازم است تا یک کاربرد جدید خشک کن ها، توسعه داده شود. فروشندگان خشک کن ها، الزاما اختصاصی هستند و دسته کوچکی از تجهیزات مربوط به آنها را پوشش می دهند. همچنین خریداران باید به اندازه کافی آگاه باشند تا بتوانند بر مبنای اصول پایه ای، انتخاب مناسبی از انواع خشک کن ها قبل از سفارش دادن داشته باشند. چرا که، چندین نوع خشک کن می توانند برای یک کاربرد خاص کارآیی داشته باشند.

۱-۱-۳ اصول پایه ای و اصطلاحات

خشک کردن فرآیند پیچیده است که شامل انتقال گذرای گرما و جرم به همراه چندین فرآیند دیگر مانند تغییرات فیزیکی و شیمیایی است که خود آنها نیز باعث تغییر در کیفیت محصول و نیز مکانیزم های انتقال گرما و جرم می شوند. تغییرات فیزیکی ممکن شامل: منقبض شدن، پف کردن،

کریستالی شدن و انتقال شیشه‌ای است. در بعضی موارد، واکنش‌های مطلوب و نامطلوب شیمیایی یا بیوشیمیایی ممکن است رخ دهد و باعث تغییر در رنگ، بافت، رایحه و یا دیگر خواص ماده جامد گردد. برای مثال، در تولید کاتالیست‌ها، شرایط خشک کردن باعث ایجاد تفاوت‌های اساسی در فعالیت کاتالیست یا تغییرات داخلی آنها می‌شود.

خشک کردن با تبخیر مایع در اثر اعمال گرما به ماده مرطوب رخ می‌دهد. گرما ممکن است توسط جابه‌جایی (خشک‌کن‌های مستقیم)، هدایت (خشک‌کن‌های تماسی یا غیرمستقیم)، تشعشع و یا به صورت حجمی با قرار گرفتن ماده مرطوب در میدان الکترومغناطیسی میکروویو یا فرکانس‌های رادیویی اعمال می‌شود. حدود ۸۵٪ خشک‌کن‌های صنعتی از نوع جابه‌جایی هستند که در آنها از هوای گرم یا گازهای احتراقی به عنوان واسطه تبادل گرما استفاده می‌شود و بیشتر از ۹۹٪ آب در آنها از ماده حذف می‌گردد. در همه آنها از هوای گرم به جز نوع دی‌الکتریک (مایکروویو و فرکانس‌های رادیویی)، گرما به بدنه خارجی ماده اعمال می‌شود و بنابراین در داخل آن به صورت هدایت نفوذ می‌کند. مایع باید ابتدا به سطح ماده منتقل گردیده و پس از آن توسط گاز عبوری (یا با اعمال خلاء برای خشک‌کن‌های غیر جا به جایی) به بیرون حمل شود.

انتقال رطوبت در داخل جامد ممکن است توسط یک یا چند فرآیند زیر صورت گیرد:

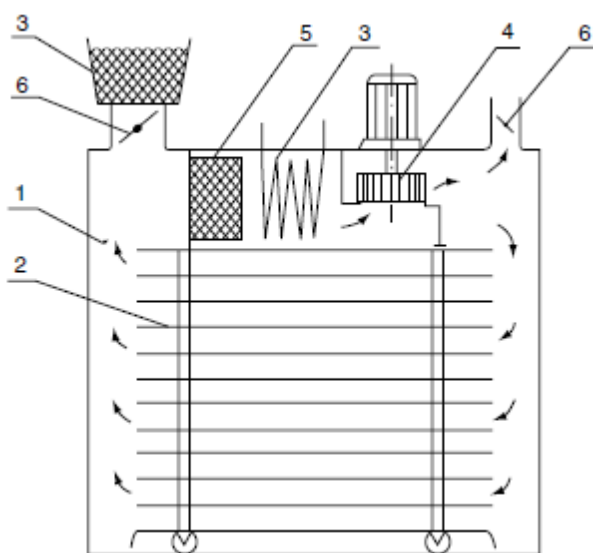
- ۱- دیفیوژن مایع، اگر جامد مرطوب در دمای کم‌تر از دمای جوش مایع درون خود باشد.
- ۲- دیفیوژن بخار، اگر مایع درون جامد تبخیر شود.
- ۳- دیفیوژن نادن^۱، موقعی که خشک کردن در دما و فشار کم صورت گیرد، مانند خشک کردن انجمادی.
- ۴- دیفیوژن سطحی (همیشه رخ می‌دهد و نیاز به بررسی ندارد)
- ۵- اختلاف فشار هیدرو استاتیکی، وقتی که نرخ تبخیر داخلی با نرخ تبخیر از سطح جامد به محیط برابر شود. [۱]

^۱-Knudsen diffusion

انتقال رطوبت در مواد همگن و ناهمگن در تمامی فرآیندهای بالا با قوانین فیک بیان می‌شوند که در فصل سوم به آن اشاره کوتاهی خواهیم داشت.

۱-۱-۴ معرفی چند نمونه از خشک‌کن‌ها

برای روشن تر شدن مطلب به چند نمونه خشک‌کن‌های صنعتی اشاره خواهیم کرد. خشک‌کن‌های دسته‌ای^۱ نقش پررنگی در صنعت خشک‌کردن دارند. بستگی به نوع خشک‌کن‌ها می‌تواند به صورت مستقیم (حرارت مستقیماً به سطح ماده وارد شود) یا به صورت غیرمستقیم به کار روند. یک حمل‌کننده برای توزیع مواد در قفسه‌ها بکار می‌رود. برای مواد دارویی نوع کوره‌ای^۲ این نوع خشک‌کن‌ها توصیه می‌شود. در طول فرآیند، هوای داغ میان قفسه‌ها جریان می‌یابد و همزمان محصولات مورد نظر خشک می‌شوند. فیلتر هوا نیز برای محافظت محصولات از آلودگی‌ها و غبار تعبیه شده است. شکل ۱-۱ شماتیک کلی این نوع خشک‌کن را نشان می‌دهد. کوره‌های مشابه می‌تواند برای سایر محصولات مانند بطری‌ها بکار رود.



شکل ۱-۱: خشک‌کن دسته‌ای قفسه‌ای: ۱- پوشش ۲- قفسه و حمل‌کننده ۳- گرم‌کن ۴- فن ۵- فیلتر هوا ۶- شیرهای کنترل [۱]

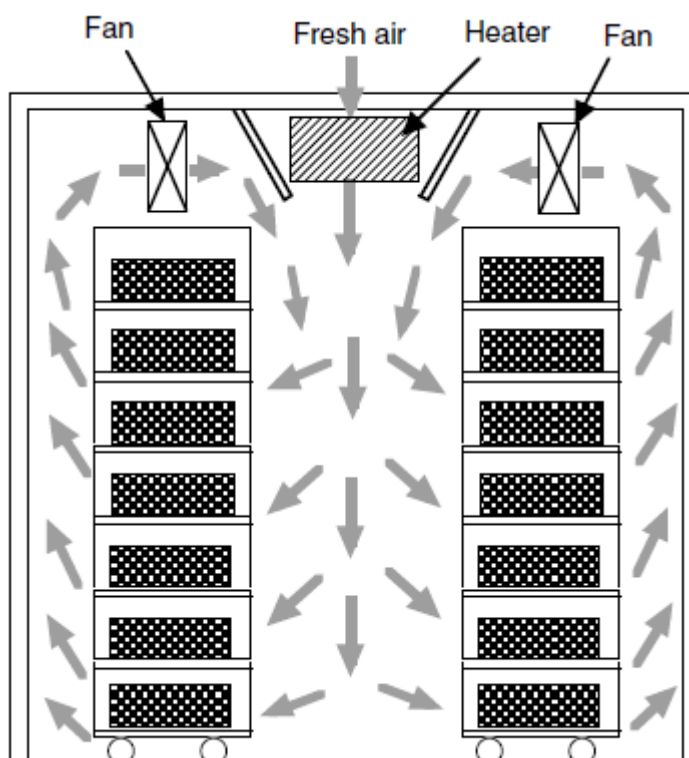
¹ - Batch Dryer
² - oven

شکل ۱-۲ نمونه ای دیگر از این نوع خشک کن را نشان می دهد که در خشک کردن انواع سرامیک از آن استفاده می شود. هوای داغ با کمک دمنده میان قفسه ها جریان می یابد. تمامی خواص مانند نرخ جریان هوا و دما می تواند در قفسه ها کنترل شود. زمان فرآیند در شرایط آزمایشگاهی بدست می آید) زمان فرآیند و بسیاری از پارامترهای دیگر برای اکثر مواد غذایی، صنعتی، دارویی در اکثر خشک کن ها در شرایط آزمایشگاهی بدست می آیند.)

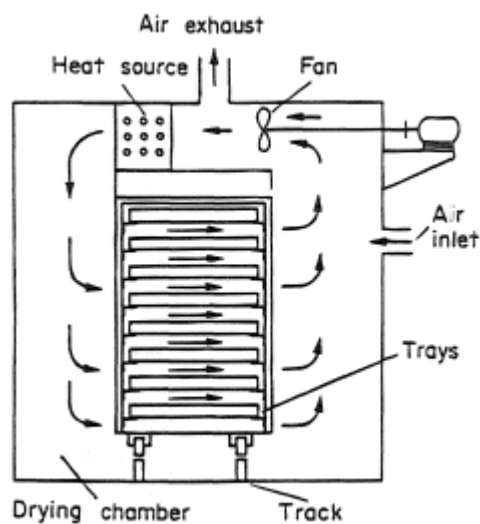
به عنوان یک کاربرد خیلی متداول برای بارگذاری های گرمی کمتر، خشک کن های سینی دار^۱ شامل یک یا چند طبقه در یک محفظه عایق و در هر طبقه چندین سینی که هوای گرم توسط یک فن که در داخل و یا خارج از محفظه خشک کن قرار می گیرد به عنوان هوای برگشتی مورد استفاده قرار می گیرد. معمولاً زمان خشک شدن طولانی و حدود ۱۰ تا ۶۰ ساعت است. شکل ۱-۳ خشک کن سینی دار ناپیوسته را نشان می دهد.

نمونه ای دیگر از خشک کن ها، خشک هایی موسوم به بستر سیال هستند و ویژگی های منحصر به فردی دارند. در سه دهه اخیر به خار مزایای مطلوب خشک کن های بستر سیال در خشک کردن مواد دانه ای با قابلیت شناور شدن بسیار متداول شده اند. ذرات بزرگ که قادر به شناور شدن نیستند را می توان در بستر شناور با ذرات کوچکتر که قابلیت شناور شدن را دارند مخلوط کرد تا خشک شوند. جالب است با شناور کردن بخشی از ذرات بستر در یک زمان مشخص، مانند بسترهای سیال متناوب، می توان به صرفه جویی انرژی قابل توجهی دست یافت. در خشک کن های بستر شناور ناپیوسته، یک استراتژی کنترل که دمای بستر را با تنظیم کردن گرمای ورودی ثابت نگه می دارد، باعث صرفه جویی انرژی (زمان) و بهبود کیفیت مواد حساس به گرما می شود. چنین خشک کن هایی که بر اساس سیستم هوشمند فازی کنترل می شوند در بازار موجود می باشند [۱]

¹ -tray dryer



شکل ۱-۲: پیکره یک خشک کن دسته‌ای (برای خشک کردن سرامیک) [۱]

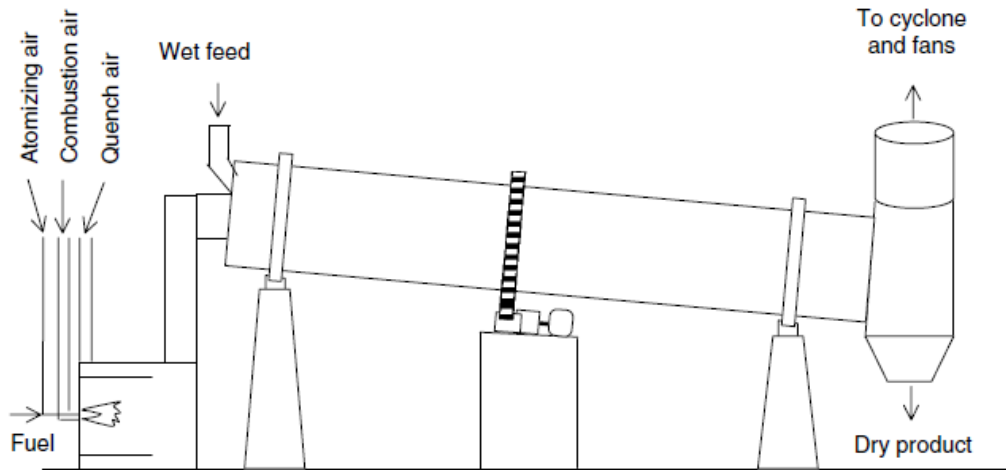


شکل ۱-۳: شماتیک خشک کن سینی دار ناپیوسته [۱]

نمونه‌ای دیگر خشک کن چرخان آبشاری^۱ به صورت پیوسته کار می‌کند و معمولاً شامل یک پیوسته استوانه‌ای با چرخش آرام است که به صورت افقی با شیب کم برای سهولت و کمک به حرکت

^۱ -rotary dryer

مواد نصب می‌شود تا مواد جامد مرطوب ورودی، از بالا وارد و مواد خشک‌شده خروجی از قسمت پایین خارج شود. شماتیک خشک‌کن چرخان در شکل ۴-۱ نمایان شده است.



شکل ۴-۱: شکل ساده شده خشک‌کن چرخان با منبع حرارتی مستقیم [۱]

۲-۱ خشک کردن به کمک پمپ حرارتی

مصرف انرژی فرآیند خشک کردن زیاد است زیرا در آن مقدار مشخصی از آب موجود در محصول ضمن دریافت گرماهای نهان و محسوس تبخیر، بخار می‌شود. اهداف اصلی خشک کردن، طولانی نمودن زمان نگهداری، به حداقل رساندن میزان ضایعات و کاهش هزینه‌های حمل و نقل کالاهای با ارزش است. معمولاً مواد توسط خورشید یا با استفاده از انواع مختلف خشک‌کن‌ها، خشک می‌شوند. دستیابی به موفقیت در خشک کردن با نور آفتاب به میزان قابل توجهی به شرایط غیرقابل پیش‌بینی جوی بستگی دارد که ممکن است این روش به محصولی با کیفیت پایین منجر شود. سطح بهداشت محصولی که با آفتاب خشک می‌شود معمولاً از حد انتظار کمتر است. محدودیت‌های خشک کردن سنتی با آفتاب را می‌توان با به کارگیری روش‌های مناسب خشک کردن، به ویژه در مورد محصولات با ارزش برطرف ساخت. بعضی از خشک‌کن‌ها متداول از هوای داغ محیط برای فرآیند خشک کردن استفاده می‌کنند. کاربرد این روش ساده و موثر از لحاظ هزینه، بیشتر به محصولاتی با ارزش تجاری بالا محدود می‌شود و این به خاطر شرایط دمایی خشک کردن آنهاست که ماکزیمم

دمای مجاز کمی دارند (درجه سانتیگراد ۴۵-۳۰).

خشک کردن در دمای بالا می تواند به ارزش غذایی محصول آسیب رسانده، خواص فیزیکی اش را تخریب و سبب ایجاد بوی ناخوشایندی در آن شود. به علاوه اگر محتوای رطوبت تعادلی بالا باشد ممکن است افزایش دمای خشک کن نیز باعث خشک شدن محصول تا سطح مطلوب نشود. سیستم های خشک کنی که دارای چرخه رطوبت زدایی هستند، که خشک کن پمپ حرارتی^۱ نیز نامیده می شوند نه تنها به منظور سرعت بخشیدن به فرآیند خشک کردن و حفظ کیفیت محصول از طریق خشک کردن در دمای پایین فراهم آمده اند، بلکه سبب ذخیره سازی انرژی فرآیند خشک کردن نیز می شوند. پمپ حرارتی باعث بازیابی گرماهای نهان و محسوس به واسطه چگالش رطوبت هوای خشک کن می شود. بدین ترتیب فشار جزئی بخار در هوای خشک کن کاهش می یابد و باعث افزایش تبخیر رطوبت می شود. گرمای بازیافت شده توسط گرم کردن هوای خشک کن به آن بازگردانده می شود.

خشک کردن به کمک پمپ حرارتی مزایا و معایبی دارد. برخی از این موارد می تواند با استفاده از ترکیب خشک کردن برطرف شود. برخی از این موارد که غالباً در متون به آنها اشاره شده است عبارتند از:

۱- بازده انرژی بالا

۲- کیفیت بهتر محصولات به ویژه در مورد حساس به گرما

۳- دامنه کاری گسترده

همچنین محدودیت های موجود شامل:

۱- بالاتر بودن هزینه های سرمایه گذاری و نگهداری که به خاطر هزینه های نگهداری

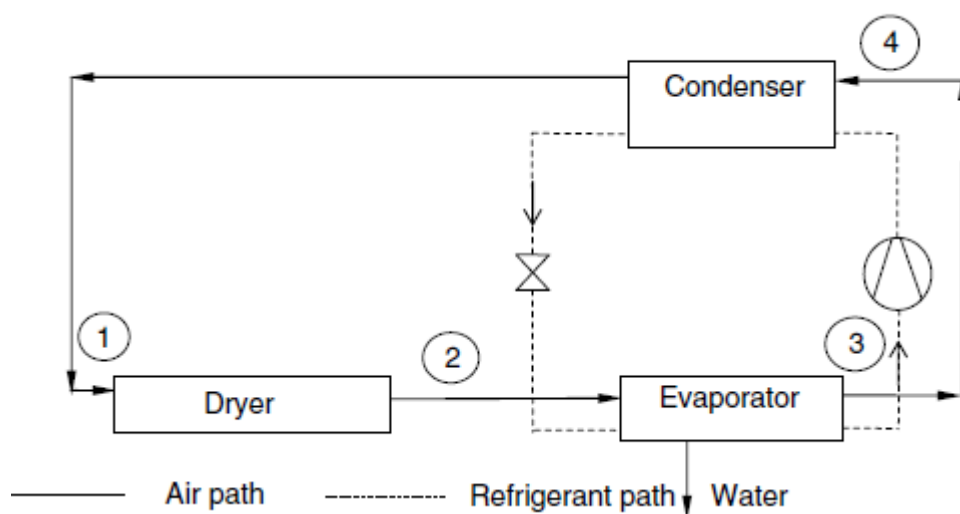
کمپرسور، فیلتر های مبرد و شارژ آن و البته نشت مبرد می باشد.

۲- عملکرد پیچیده این سیستم نسبت به سیستم ساده خشک کن جا به جایی

^۱ -HPD

۳- نیاز به فضای بیشتر [۱]

شکل ۵-۱ نمای کلی یک سیستم خشک‌کن پمپ حرارتی^۱ را نشان می‌دهد. هوای ورودی از میان محفظه خشک‌کن در نقطه ۱ عبور می‌کند و رطوبت را از محصول جدا کرده وارد محفظه مبدل حرارتی اول (اوپراتور) در نقطه ۲ می‌شود که با مبرد در حال جریان در تبادل حرارتی است. دو نوع اوپراتور وجود دارد. در گونه اول مبرد در حالت اشباع قرار داشته با جذب حرارت از هوا به حالت بخار اشباع می‌رسد. از آن سو هوا با از دست دادن حرارت به مرز نقطه شبنم رسیده و رطوبت‌زدایی می‌شود. در گونه دیگر از مدل تبرید جذبی آب برای سرد کردن و رطوبت‌زدایی هوا استفاده می‌شود. در نقطه ۲ به ۳ هوا به مرز نقطه شبنم رسیده، چگالش یافته و آب در مخلوط دوفازی جدا خواهد شد. حرارت جذب شده توسط مبرد سبب مافوق گرم کردن آن می‌شود. هوای سرد و رطوبت‌زدایی شده در فرآیند ۴ به ۱ با جذب گرما از مبرد به دمای مطلوب می‌رسد.



شکل ۵-۱: شمای کلی خشک‌کن پمپ حرارتی [۱]

۳-۱ خشک‌کن پمپ حرارتی به کمک انرژی خورشیدی

بسیاری از منابع انرژی را می‌توان به جای سوخت‌های فسیلی به کار برد. تصمیم‌گیری مبنی بر اینکه از چه نوع منبعی استفاده شود، بر اساس ملاحظات اقتصادی، زیست محیطی و ایمنی صورت

^۱ -Heat Pump Dryer

می‌پذیرد. بخاطر مطلوب بودن و مرغوبیت انرژی خورشیدی در ایمنی و شرایط سازگاری با محیط بسیاری بر این باورند که این نوع منابع باید جایگزین دیگر منابع شود. اگر کشورهای جهان به سرعت به سمت توسعه یافتگی بروند، طبیعتاً تقاضای انرژی افزایش می‌یابد. از جنبه اقتصادی انرژی‌های تجدیدپذیر نهایتاً در بدترین حالت ممکن هزینه‌ای معادل با سایر منابع انرژی را دارند. در اواسط قرن بیست و یکم، منابع انرژی تجدیدپذیر می‌توانند $\frac{2}{5}$ کل مصرف سوخت و $\frac{3}{5}$ کل مصرف انرژی الکتریکی دنیا را مستقیماً تأمین نمایند. افزون بر این در سال ۲۰۵۰ پیش بینی می‌شود دی‌اکسید کربن حاصل شده از گازهای گل‌خانه‌ای تا ۷۵٪ مقدار خود در سال ۱۹۸۵ برسد. بنابراین رقابت انرژی‌های تجدیدپذیر با دیگر منابع معمولی کاملاً منطقی و معقول به نظر می‌آید. در طول دو دهه گذشته در صنعت الکترونیک، بیوتکنولوژی، مهندسی مواد و دیگر رشته‌ها انرژی‌های تجدیدپذیر کارایی دارد و چشم انداز بسیار روشنی برای آن می‌توان متصور شد. به عنوان مثال سلول‌های سوختی برای برنامه‌های هوایی فضایی توسعه یافته‌اند که از هیدروژن به عنوان سوخت تمیز جهت حرکت استفاده می‌شود و ابعاد تجهیزات کوچک است. در اواسط قرن پیش رو انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توانند تا ۳۰٪ انرژی را تأمین کنند. تسهیل در استفاده از سیستم‌های قدرت توربین گازی، هزینه سرمایه‌گذاری پایین، انعطاف‌پذیری بالا در خروجی مدار نسبت به تغییرات سیگنال‌های ورودی در سیستم‌های الکتریکی (متعادل نمودن مدار در اغتشاشات ورودی) از دیگر مشخصه‌های این نوع سیستم‌هاست. در چشم انداز چند ساله انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توان موارد زیر را ذکر کرد.

۱- منابع انرژی گوناگونی (تجدیدپذیر) در دسترس است که می‌تواند در مناطق گوناگون به کار گرفته شود. به عنوان مثال انرژی الکتریکی از ترکیب نیروی هیدروالکتریکی با منابع انرژی مانند خورشید، آب و فوتوولتائیک تولید و سوخت از طریق متانول، اتانول، و هیدروژن الکترولیز شده حاصل می‌شود.

۲- انرژی تجدیدپذیر متناوب، مقدار زیادی از کل انرژی الکتریکی را با هزینه پایین و بدون نیاز به فن‌آوری ذخیره‌سازی فراهم می‌کند. علاوه بر این گاز طبیعی نقش عمده‌ای در حمایت از رشد

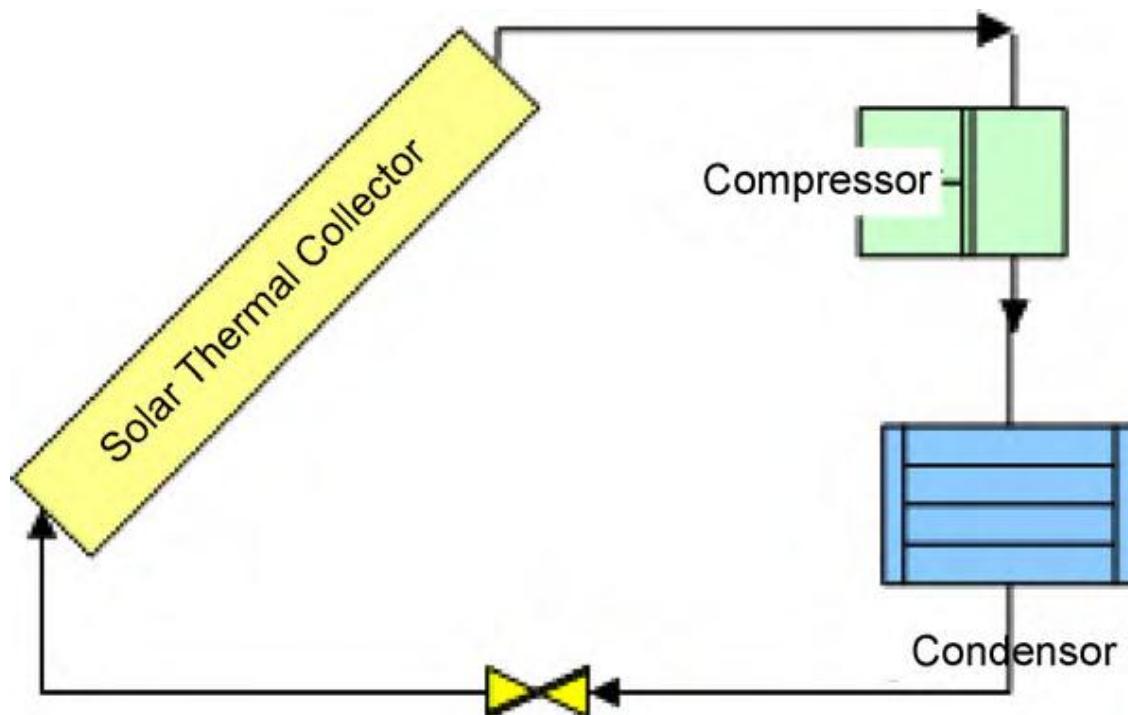
صنعت انرژی تجدیدپذیر ایفا می‌کند که هزینه سرمایه‌گذاری پایینی دارد.

۳- در آینده ای نزدیک انرژی‌های تجدیدپذیر بازار انرژی جهانی را تحت تأثیر قرار داده و انتخاب‌های گوناگونی در این عرصه به متقاضیان انرژی ارائه خواهند داد. تجارت رو به رشد سوخت‌های تجدیدپذیر و گاز طبیعی می‌تواند تنوع معاملات را در بازار جهانی افزایش و منجر به کاهش نوسانات قیمت و متعاقباً سبب تثبیت قیمت انرژی در بازارهای جهانی شود. [۲]

تکنولوژی پمپ حرارتی و انرژی خورشیدی توأم با هم^۱ در حال حاضر گستره وسیعی پیدا کرده است. فرآیند خشک کردن بوسیله پمپ حرارتی در دهه اخیر مورد مطالعه و بررسی به منظور کیفیت محصول بهتر با دمای پایین تر و با کنترل‌های مناسب قرار گرفته است. استفاده از خشک کن‌های پمپ حرارتی معایب و مزایایی دارد. در شکل ۱-۶ شمایی کلی و ساده از سیستم انبساط مستقیم خورشیدی نشان داده شده است.

از مزایای می‌توان، تبدیل ساده انرژی برای حرارت مستقیم و ذخیره انرژی برای بهبود عملکرد سیستم، ابزارهای ساده به منظور کنترل فرآیند، کیفیت محصول بالاتر با زمان بندی مناسب در فرآیند خشک کردن را نام برد. از معایب آن می‌توان به افزایش هزینه‌های نسبت به روش‌های دیگر برای اجزاء اضافه شده مانند: پنل خورشیدی، دمنده، تانک نگهدارنده و غیره...، و استفاده از این نوع فن‌آوری فقط در طول روز اشاره کرد. پارامترهای مهم در این نوع سیستم شامل ضریب عملکرد پمپ حرارتی و میزان رطوبت خارج شده از محمولات خواهد بود. [۳]

^۱ -SAHP



شکل ۱-۶- شمای کلی جریان مبرد در سیستم انبساط مستقیم خورشیدی [۳]

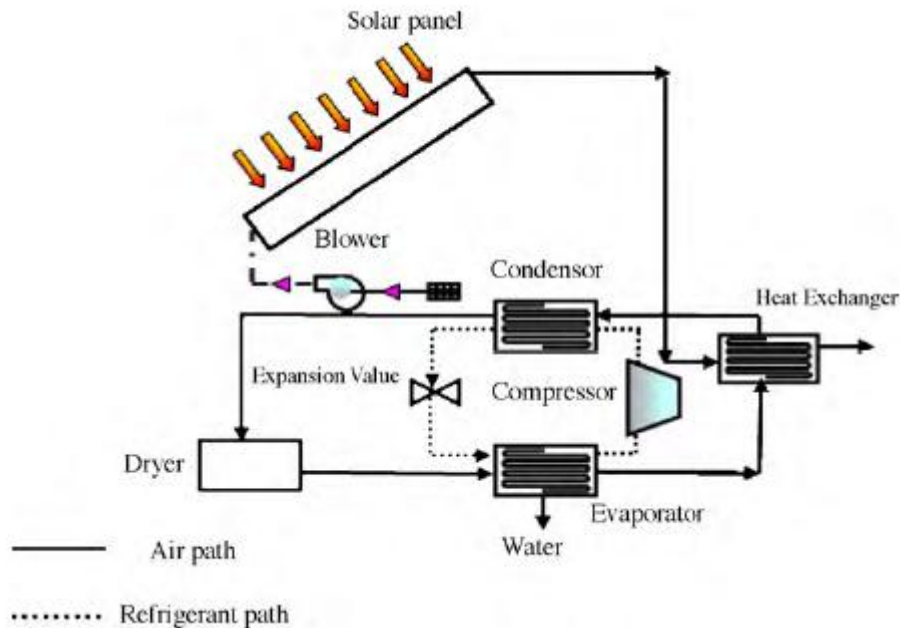
در سیستم های خورشیدی ضریب عملکرد کلی سیستم نسبت به سیستم های دیگر بیشتر است. در واقع با دو نوع سیستم خورشیدی رو به رو هستیم سیکل های انبساط مستقیم^۱ و سیستم های خورشیدی سنتی^۲. در سیکل های انبساط مستقیم گرمای جذب شده توسط کلکتور مستقیماً در محفظه اواپراتور جذب شده و سبب تغییر فاز مبرد به حالت بخار اشباع می شود. در این نوع سیستم عنصر اواپراتور در واقع همان محفظه کلکتور به علاوه کویل های خود اواپراتور است. از یک عنصر کلکتور به عنوان دو هدف می توان بهره برد. یکی جذب گرما و افزایش دمای هوا دیگری استفاده به عنوان اواپراتور) در واقع این نوع سیستم ها ضریب جابه جایی اجباری هوا را افزایش داده، عملکرد این نوع سیکل ها در دمای پایین تری نسبت به مکانیزم های دیگر انجام می شود و عمر مفید سیال مبرد برای سیکل را افزایش می دهد و در نهایت هزینه های مربوط به اواپراتور را کاهش می دهد.

گونه ای دیگر از سیکل های خشک کن پمپ حرارتی به کمک انرژی خورشیدی در شکل ۱-۷ نمایش داده شده است. هوای ورودی پس از عبور از محفظه خشک کن و جدایش رطوبت وارد عنصر اواپراتور

¹ -Direct expansion solar assisted heat pump (DX-SAHP)

² -conventional solar system

شده در این مبدل هوا رطوبت زدایی و پس از سرد شدن تا نقطه شبنم آب موجود در مخلوط هوای خشک-بخار خارج می‌شود. مبرد نیز با جذب حرارت از هوا به حالت بخار اشباع می‌رسد. در کندانسور علاوه بر حرارت آزاد شده از مبرد، گرمای ناشی از تشعشع خورشیدی از کلکتور هوا به حرارت آزاد شده از مبرد اضافه شده و نهایتاً وارد محفظه خشک‌کن می‌شود. [۳]



شکل ۱-۷: شمایی کلی از یک نوع سیستم خشک‌کن پمپ حرارتی به کمک انرژی خورشیدی [۳]

۴-۱ جمع بندی این فصل

خلاصه‌ای از فرآیندهای مورد نظر و کلیات در ابتدای فصل تشریح شد. قانون دوم فیک در انتقال جرم همانند قانون فوریه در انتقال حرارت هدایتی سهم عمده‌ای در فرآیند انتقال جرم دارد. تنوع بالای خشک‌کن سبب شده تا هر سه مکانیزم انتقال حرارت (جاب‌جایی، تشعشع و جابه‌جایی) اغلب در خشک‌کن‌ها رخ دهد حتی از فن‌آوری مویکروویو نیز اخیراً استفاده می‌شود. در این میان استفاده از تکنولوژی‌های جدیدتر مانند استفاده از بخار سوپرهیت بسیار در حال توسعه است. در عین حال به معرفی سه خشک‌کن پرکاربردتر چرخان، سینی دار و دسته‌ای به‌طور خلاصه پرداخته شد. مکانیزمهای متداول خشک‌کن پمپ حرارتی و خشک‌کن پمپ حرارتی به کمک انرژی خورشیدی در

انتهای فصل معرفی گردید. در فصل دوم به مروری بر کارهای انجام شده خواهیم پرداخت. برای سهولت در این فصل مروری بر تحقیقات گذشته به سه زیربخش انتقال جرم و قانون دوم فیک، خشک کن های پمپ حرارتی، سیکل های انبساط مستقیم خورشیدی و کاربردهای آن تقسیم شده است. در فصل سوم بررسی معادلات حاکم بر سیکل و شماتیک و نحوه عملکرد کار حاضر تشریح شده است در انتهای این فصل الگوریتم مربوط به حل توابع نهایی آورده شده است. فصل چهارم نتایج حاصل برای توابع نهایی بر حسب متغیرهای موجود در سه شهر تهران، بیرجند و شیراز آورده شده است. در فصل آخر نیز نتایج کلی و پیشنهادها برای بهبود کار حاضر ارائه شده است. با توجه به نیاز روزافزون جامعه بشری به انرژی های نو و تجدید پذیر و رشد چشمگیر آن در تمامی جوامع (در حال توسعه و توسعه یافته) نیاز به تحقیق بیشتر در این زمینه توصیه می شود.

فصل ۲ - مروری بر تحقیقات پیشین

۲-۱ مقدمه

برای اینکه بتوانیم مروری بر پیشینه تحقیق را بررسی کنیم در ابتدا این موضوع را برای سه قسمت مجزا مورد مطالعه قرار می‌دهیم. در خشک‌کن‌های صنعتی و مواد غذایی فرآیند انتقال جرم درون ماده صورت می‌گیرد. در اغلب موارد انتقال جرم با قانون دوم فیک^۱ بیان می‌شود. تحقیقاتی وسیع در این زمینه صورت گرفته، که در این تحقیق به چند نمونه از آن‌ها اشاره خواهیم کرد. در مرحله بعد مروری بر بررسی‌های صورت گرفته در خشک‌کن پمپ حرارتی ارائه خواهد شد. در این قسمت تأثیر شرایط پیرامونی و محیطی بر ضریب عملکرد، مطالعات موردی و آزمایشگاهی در مواد غذایی، صنعتی ... نحوه آرایش پمپ حرارتی، شبیه‌سازی و مدل کردن عناصر گوناگون در سیکل، بررسی و تحلیل تئوری و آزمایشگاهی قانون دوم ترمودینامیک و آگرژی تشریح شده است. در قسمت سوم نیز مروری بر تحقیقات صورت گرفته بر روی سیستم‌های انبساط مستقیم خورشیدی کمکی به پمپ حرارتی ارائه شده است. با توجه به اینکه قانون اول و ضریب عملکرد حرارتی سیستم‌های خشک‌کن و آب‌گرم‌کن در سیستم‌های انبساط مستقیم تشابه زیادی با هم دارند، بسیاری از تحقیقات مختص آب‌گرم‌کن‌های خورشیدی بوده و البته در اغلب سیستم‌های خشک‌کن نیز فرآیند گرم کردن مبرد دوم (آب) با توجه به استفاده بهینه و به‌جا از انرژی امری اجتناب‌ناپذیر است. البته تحقیقات انجام‌شده در زمینه خشک‌کن سیستم‌های انبساط مستقیم محدود بوده، مطالعات و آنالیزهای آب‌گرم‌کن خورشیدی برای بخش اعظمی از سیکل قابل استفاده است. تحلیل عددی جریان دوفازی در اواپراتور و مطالعات از دیدگاه مکانیک سیالات، تحلیل قانون اول ترمودینامیک و تأثیرات نرخ جریان جرمی، فشار کاری، تحلیل قانون دوم و آگرژی در عناصر مختلف سیکل، تأثیرگذاری انواع مبردها در پارامترهای مؤثر بر سیکل و نهایتاً در خشک‌کن‌های انبساط مستقیم تأثیر عوامل گوناگون بر نرخ رطوبت زدایی و ضریب عملکرد در تحقیقات صورت گرفته است.

¹ -Fick second law

۲-۲ مروری بر تحقیقات صورت گرفته در انتقال جرم و رطوبت

احمت [۴] و همکارانش بر روی تأثیرات هندسه بر روی ضریب نفوذ مؤثر مطالعه کردند. آنها مشاهده کردند که هرچه عمق بستر سیال بیشتر شود ضریب نفوذ مؤثر افزایش می یابد. این تحقیق در رطوبت نسبی ۷۵٪ انجام شد.

عزوز [۵] و همکارانش ارزیابی در مقیاس آزمایشگاهی بر روی سینتیک مواد و خشک کردن دو نوع انگور که وابسته به شرایط محیطی فرآیند بود، انجام دادند. همچنین وابستگی ضریب نفوذ این ماده را به شرایط خشک کردن مورد بررسی قرار دادند. برای بیان کاهش نرخ رطوبت علاوه بر قانون فیک با محاسبه انقباض^۱ مواد به عنوان پارامتری اساسی در حرکت جامد خشک و جنبش ناشی از مرز ماده استفاده کردند.

بالالیس [۶] و همکارش به تأثیرات شرایط خشک کردن بر روی ثوابت جواب معادله فیک و ضریب نفوذ در مدل لایه نازک پرداختند. فرآیند رطوبت زدایی در رنج دمایی ۵۵ تا ۸۵ درجه سانتیگراد و سرعت جریان هوای خشک کن بین ۰.۵ تا ۳ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. هر چقدر دمای فرآیند افزایش یابد ماده در زمان کمتری به رطوبت ایده آل می رسد. همچنین بعد از ۱۰ الی ۱۵ ساعت تأثیرات دما بر روی مقدار رطوبت کاهش می یابد. تأثیرات ثوابت حل معادله فیک بر روی فرآیند نیز نشان داده شد.

دویماز [۷] از گروه مهندسين شیمی دانشگاه Yildiz ترکیه، در فرآیند خشک کردن زردآلو از خواص فیزیکی پتاسیم متا دی سولفید^۲ و اتیل اولیت^۳ استفاده کردند. داده های فرآیند خشک کردن با مدل لایه نازک^۴ برآورد شد. سه روش آماری متفاوت نشان داد که مدل لگاریتمی برای نشان دادن مشخصه های خشک کن بهتر است. ضریب نفوذ بین $675.8 \mu m^2 s^{-1}$ تا 1261.4 تغییر می کند. همچنین ۵ معادله متفاوت برای تحلیل نرخ رطوبت در این تحقیق به کار گرفته شد.

¹ -shrinkage

² - $K_2S_2O_5$

³ - $C_{17}H_{33}COOC_2H_5$

⁴ -Thin layer model

همین نویسنده یعنی دویماز [۸] بر روی مشخصه‌های سنیتیک و خشک کردن نوعی بامیه تحقیقاتی انجام داد. هوای خشک‌کن در رنج دمایی °C ۷۰-۵۰ و رطوبت نسبی ۸ تا ۲۵٪ در شرایط آزمایشگاهی قرار داشت. دو مدل پیچ^۱ و نمایی ساده^۲ در این تحقیق استفاده شده و همچنین انرژی تحریک $51.26 \frac{Kj}{mol}$ در تحلیل ضرب نفوذ استفاده شد.

غضنفری [۹] و همکارانش در دانشگاه باهنر کرمان مدل لایه نازک را برای الیاف کتان به کار بردند. آنها در این تحقیق از تحلیل قانون دوم فیک استفاده کردند. الیاف کتان به ترتیب در دماهای ۳۰، ۵۰، ۷۰، و °C ۱۰۰ با رطوبت مطلق ۰.۰۰۶۵ کیلوگرم آب برای هر کیلوگرم هوای خشک قرار داده شدند. نرخ رطوبت برای هر شرایط دمایی مخصوص با تخمین پنج جمله اول معادله فیک بدست آمد.

۲-۳ مروری بر تحقیقات صورت گرفته در خشک‌کن پمپ حرارتی

ایوب حسین [۱۰] و همکارانش مدل ریاضی برای خشک‌کن پمپ حرارتی در گیاهان خوشبو ارائه دادند. این مدل برای ارزیابی ضریب عملکرد پمپ حرارتی توسعه داده و به سه زیر مدل، مدل خشک‌کن، مدل پمپ حرارتی، مدل عملکرد تقسیم شد. مدل خشک‌کن بر اساس تعادل جرم، تعادل حرارت، انتقال حرارت و معادلات نرخ خشک‌کن بیان شد. زیر مدل پمپ حرارتی شامل روابط تئوری و تجربی برای تخمین پارامترهای اواپراتور، کندانسور، شیر اختناق و کمپرسور می‌شود. زیر مدل عملکرد نیز برای تخمین کارایی خشک‌کردن، ضریب عملکرد و نرخ تغییر رطوبت مخصوص^۳ به کار می‌رود. این تحلیل با داده‌های آزمایشگاهی انطباق خوبی داشت. دمای میانگین خشک کردن °C ۳۶.۸۴ و رطوبت مخصوص ۲۰٪ در نظر گرفته شد. برای آن که رطوبت حاوی ماده از ۸۹٪ به ۹٪

¹ -Page

² -simple exponential model

³ -specific moisture extraction rate (SMER)

کاهش یابد، ۸۹ ساعت زمان نیاز بود. در نهایت ضریب عملکرد COP^۱ و SMER به ترتیب ۵.۴۵ و $0.038 \frac{Kg}{Kwh}$ بدست آمد.

اکتاس [۱۱] و همکارانش به مقایسه خشک کردن قطعه های سیب بین دو مکانیزم خشک کن خورشیدی و خشک کن پمپ حرارتی پرداختند. ضخامت تکه های سیب ۴ mm بود. زمان فرآیند خشک کردن در هر دو نوع سیستم یکسان فرض شد. در خشک کن پمپ حرارتی مقدار رطوبت از $4.8 \frac{g_{water}}{g_{dryair}}$ به مقدار $0.18 \frac{g_{water}}{g_{dryair}}$ می رسید، همچنین سرعت هوای جرمی نیز در رنج Kg/m^2s ۳.۳-۲.۴ بود. در خشک کن خورشیدی مقدار رطوبت از $4.8 \frac{g_{water}}{g_{dryair}}$ به مقدار $1 \frac{g_{water}}{g_{dryair}}$ کاهش می یافت و سرعت جریان جرمی بین Kg/m^2s ۳.۳-۲.۹ تغییر می کرد. همچنین زمان خشک کردن برای هر دو مکانیزمها ۳.۵ ساعت در نظر گرفته شد. ضریب نفوذ مؤثر برای خشک کن پمپ حرارتی 2.3×10^{-8} و در خشک کن پمپ حرارتی 1.03×10^{-8} لحاظ شد. نرخ رطوبت نیز در برنامه های شبه تئوری بدست آمد و مقادیرشان با داده های تجربی مقایسه شد.

دی سی وانگ [۱۲] و همکارانش بر روی امکان پذیر بودن خشک کردن نوعی قرصهای میوه زالزالک در خشک کن پمپ حرارتی تحقیق کردند. خشک کن پمپ حرارتی یکی از مکانیزمهایی است که با محیط زیست سازگار، اقتصادی و کاملاً بهداشتی است که برای خشک کردن برخی از مواد غذایی مانند این گونه قرصها به کار می رود. در این نوشته نیز منحنی های خشک کردن ناشی از داده های آزمایشگاهی خشک کن پمپ حرارتی با مکانیزم سنتی هوای داغ مقایسه شده است. مکانیزم خشک کردن قرصهای زالزالک نیز همانند دیگر مواد غذایی است. اگر دمای خشک کردن بالا رود، فرآیند سریعتر انجام می شود. اما در مراحل اولیه فرآیند مقدار رطوبت موجود وابستگی چندانی به دمای فرآیند ندارد. بنابراین از دمای پایین تر به منظور بهبود ضریب عملکرد به کار گرفته می شود. نتایج تجربی و تحلیل های اقتصادی، انرژی نیز نشان می دهد خشک کن پمپ حرارتی برای این گونه قرصها مفید است.

^۱ -coefficient of performance

ایلههان سیلان [۱۳] و همکارش Mustafa Aktas بر روی خشک کردن فندق به کمک پمپ حرارتی بوسیله شبکه عصبی^۱ مصنوعی تحقیق کردند. شبکه عصبی مصنوعی برای طراحی روابط غیرخطی بین داده‌های ورودی و خروجی است که نیازی به دانستن جزئیات این روابط نیست. این شبکه در خشک‌کن پمپ حرارتی ارائه شد که با کنترلر تناسبی-مشتقی-انتهالی^۲ کنترل می‌شود. این کنترلر سرعت هوا را با توجه به تغییر مقدار درجه حرارت تنظیم می‌کند. خشک‌کن پمپ حرارتی در دماهای هوای ۴۰، ۴۵، و ۵۰ °C آزمایش شد. مقدار رطوبت فندق، سرعت جریان هوا، و مجموع زمان فرآیند برای دماهای ۴۲، ۴۴، ۴۶، ۴۸ در شبکه عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت.

فتوح [۱۴] و همکارانش بر روی خشک کردن گیاهان از طریق خشک‌کن پمپ حرارتی بررسی‌هایی انجام دادند. این پروسه نیز در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. R134A به عنوان مبرد در سیکل کاری پمپ گرما استفاده شد. آزمایش بر روی گل خطمی، نعناع و جعفری انجام شد. تأثیرات اندازه و ابعاد گیاهان، سطح بارگذاری، درجه حرارت هوای فرآیند و سرعت جریان هوا در این مقاله تخمین زده شد. آزمایشات نشان دادند که بار سطحی بیشتر نرخ خشک‌کردن را پایین می‌آورد، در حالی که افزایش دما و سرعت جریان هوای فرآیند نرخ خشک‌کردن را بالا می‌برد. ماکزیمم نرخ خشک‌کردن $5.4 \frac{kg}{m^2h}$ است که در دمای ۵۵ °C، سرعت هوای $2.7 \frac{m}{s}$ و بار سطحی $28 \frac{kg}{m^2}$ بدست آمد. همچنین اگر از گیاه بدون ساقه استفاده شود انرژی کمتری مصرف می‌شود و زمان خشک‌کردن کاهش می‌یابد. گیاه جعفری به پایین تری انرژی مخصوص نیاز داشت این مقدار معادل با Kj/kg_{H_2O} ۳۶۸۴ بود. انرژی مخصوص مصرفی برای نعناع $3982 Kj/kg_{H_2O}$ بود.

پال [۱۵] و همکارانش بر روی خشک‌کن پمپ حرارتی در فلفل سبز تحقیقاتی انجام دادند. آزمایشات در مدل لایه نازک و تحت شرایط دمایی ۳۰ تا ۴۰ °C در پمپ حرارتی و در مکانیزم سنتی جریان هوای داغ با دمای ۴۵ °C با رطوبت نسبی ۱۹ تا ۵۵٪ انجام شد. با افزایش دمای فرآیند شیب

¹ -artificial neural network

² -proportional-derivative-integration (PID)

منحنی خشک کردن تندتر می‌شود، در نتیجه سرعت خشک کردن افزایش می‌یابد. معادله پیچ^۱ نسبت به معادله لوئیس^۲ برای بیان مدل لایه نازک در فرآیند خشک کردن خطای کمتری داشت و مناسب‌تر بود. اگر از پمپ حرارتی با دمای ۴۰ °C استفاده کنیم، زمان خشک کردن و نرخ تبخیر رطوبت نسبت به مکانیزم جریان هوای داغ ۴۵ °C مناسب‌تر است. برای حفاظت کلروفیل برگ‌های فلفل سبز و بیشتر شدن اسید اسکوربیک این ماده غذایی نمی‌توان از جریان هوای داغ با دماهای بالاتر استفاده کرد. به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کیفیت بهتر محصولات خشک‌شده بهتر است از خشک‌کن پمپ حرارتی با دمای ۳۵ °C استفاده کرد.

سائنسابای [۱۶] و همکارش بر روی چیدمان پمپ گرما و تأثیر شرایط پیرامون فرآیند خشک کردن بر روی ضریب عملکرد تحلیل و بررسی‌هایی انجام دادند. اجزاء پنج خشک‌کن پمپ حرارتی بوسیله برنامه کامپیوتری شبیه‌سازی شد. ترتیب چیدمان اجزاء می‌توانست به صورت مکانیزم باز، نیمه باز، بسته با کندانسور خارجی و با خنک‌کننده اضافی باشد. محدوده ۲۰ تا ۴۰ °C برای بررسی ضریب عملکرد به کار گرفته شد. موثرترین و کاراترین نوع پمپ گرما بستگی به نرخ خشک کردن و شرایط پیرامون دارد.

۴-۲ مروری بر تحقیقات صورت گرفته در سیستم‌های انبساط مستقیم خورشیدی کمکی به پمپ حرارتی (خشک‌کن‌ها و سایر کاربردها)

چاتروودی [۱۷] و همکارانش بر روی تحلیل جریان دوفازی کلکتور خورشیدی کمکی به پمپ حرارتی^۳ کار کردند. مدل ترمودینامیکی برای طراحی عملکرد دمایی کلکتور خورشیدی دوفازی توسعه داده شد. مدل تعادل همگن برای این نوع کلکتور به کار گرفته شد. نتایج بوسیله معادلات دیفرانسیل

^۱ -page

^۲ -Lewis

^۳ -Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump (DX-SAHP)

معمولی جهت حل فشار اشباع و کیفیت سیال در لوله‌های کلکتور با روش رانگ کوتای مرتبه چهارم^۱ طی فرایند تکرار بدست آمد. پس از این نتایج برای تعیین ضریب عملکرد و بازدهی این نوع سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. این نتایج نشان داد که می‌توان با استفاده از یک کلکتور بدون پوشش^۲ با قیمت ارزانتر (نسبت به سایر کلکتورها)، ضریب عملکرد حرارتی COP معادل با ۶ بدست آورد، که در شرایط واقعی محیط قابل حصول بود. ظرفیت تبخیر اواپراتور-کلکتور نیز با ظرفیت پمپاژ کمپرسور تطبیق داشت.

عزیز [۱۸] و همکارانش آنالیزی ترمودینامیکی در کلکتورهای خورشیدی به کار رفته در سیستم‌های انبساط مستقیم، صورت داد. در مقاله نوشته شده تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی در کلکتورهای خورشیدی به قسمت‌های جزئی‌تر و خواص نسبی مبردها برای جایگزینی هیدروفلورکربن‌ها در آینده ای نزدیک، موضوع بحث قرار گرفت. روشی محاسباتی برای ابعاد کلکتور خورشیدی بیان شد، که با استفاده از مخلوط دوجزئی مبرد توسعه یافته است. معادله انرژی برای عناصر کلکتور (مخصوصاً حجم کنترل در لوله‌ها) بر اساس مشخصه‌های ترمودینامیکی مبرد دو فازی تشریح شد. در تحلیل انرژی پارامترهای مهم و اساسی از جمله، نرخ جریان جرمی مبرد، فشار کاری، قطر لوله، انرژی جذب شده بر واحد طول لوله، ضریب انتقال حرارت و دمای محلی مبرد، در نظر گرفته شده است.

لای [۱۹] و همکارانش بر روی ضریب عملکرد سیستم‌های انبساط مستقیم خورشیدی به منظور گرم کردن آب بررسی تجربی-آزمایشگاهی انجام دادند. این نوع سیستم شامل 4.2 m^2 سطح تخت برای اواپراتور-کلکتور می‌شد. مبرد R22 در کمپرسور با توان ورودی 0.75 KW و حجم مخزن آب L ۱۵۰ بود که دور آن از 60 m ورقه مس پیچیده به پیرامون محیطش تشکیل می‌شد. شیر اختناق نیز برای تعادل سیکل قرار گرفت. پژوهشهای تجربی نشان داد که در اقلیم آب و هوایی شهر شانگهای چین در فصل بهار مقدار ضریب عملکرد 6.61 است. در این ارزیابی حجم تانک آب L ۱۵۰ است که

¹ -fourth-order Runge Kutta method

² -bare collector

در مدت ۹۴ دقیقه دمای آب را از $13.4^{\circ}C$ به $50.5^{\circ}C$ خواهد رسید. درجه حرارت میانگین هوا $20.6^{\circ}C$ و شدت تابش خورشید $\frac{955}{m^2}$ است. ضریب عملکرد انبساط مستقیم خورشیدی در یک شب بارانی با میانگین دمای هوای $17.1^{\circ}C$ به 3.11 می‌رسد. میانگین فصلی COP مقدار 5.25 بدست می‌آید. تحلیل انرژی نیز برای هر جزء DX-SAHP انجام شد. بر اساس این تحقیق بیشترین اتلاف انرژی در کمپرسور رخ می‌دهد. بعد از آن به ترتیب در اواپراتور-کلکتور، کندانسور و شیر اختناق انرژی از بین می‌رود.

چاتروودی [۲۰] شبیه‌سازی گذرای سیستم انبساط خورشیدی را مورد مطالعه قرار داد و عملکرد بلند مدت حرارتی این نوع سیستم را شبیه‌سازی کرد. این نوع کلکتور خورشیدی بدون پوشش^۱ است و تواما عملکرد اواپراتور را نیز بر عهده دارد. در این بررسی پیکربندی کمپرسور و کلکتور متناسب با ضریب عملکرد طولانی مدت سیستم است. در واقع از کمپرسور رفت و برگشتی چند مرحله‌ای با ظرفیت نوسانی استفاده می‌شود. تأثیر پارامترهای مهم سیستم مانند سطح کلکتور، حجم تانک نگهدارنده، بار حرارتی، سرعت باد، زاویه شیب کلکتور و خصوصیات سیال مورد بررسی قرار گرفت. ضریب عملکرد ماهیانه بوسیله برنامه شبیه‌سازی شده کامپیوتری مطابق با داده‌های هواشناسی تشعی ویرجینیا^۲ در آمریکا به کار گرفته شد.

کوانگ [۲۱] بر روی سیستم انبساط مستقیم انرژی خورشیدی-پمپ گرما به منظور استفاده در آب‌گرم کن مطالعه کردند. در این تحقیق کلکتوری به مساحت $2 m^2$ بدون پوشش به عنوان منبع انرژی برای تبخیر مبرد به کار می‌رود. یک مدل شبیه‌سازی برای پیش‌بینی عملکرد طولانی‌مدت سیستم توسعه داده شد. COP ماهیانه میانگین حدود ۴ تا ۶ بدست آمد. کارایی کلکتور مابین ۴۰ تا ۶۰٪ است. نتایج شبیه‌سازی برای بدست آوردن طراحی بهینه مورد استفاده قرار گرفت. یک استراتژی مناسب برای کنترل سیستم عامل بدست آمد. اثر پارامترهای مختلف از جمله عایق خورشیدی، دمای محیط، سطح کلکتور، حجم تانک نگهدارنده و سرعت کمپرسور بر روی ضریب

¹ -bare

² -Virginia

عملکرد سیکل انبساط مستقیم خورشیدی کمکی به پمپ حرارتی^۱ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که ضریب عملکرد سیستم به شدت به تشعشع خورشید، سطح کلکتور و سرعت کمپرسور وابسته است. نتایج تجربی در شرایط آب و هوایی زمستان بدست آمد که مطابق با برنامه شبیه سازی شده کامپیوتری بود.

کوانگ [۲۲] مطالعه‌ای آزمایشگاهی-تجربی بر روی یک سیستم DX-SAHP برای تامین منابع گرمایی انجام داد. در این مطالعه، مدلی ساده و مقرون به صرفه با کلکتوری تخت و مخزن نگهدارنده آب داغ به منظور منبع انرژی برای پمپ گرما، ارائه شد. عملکرد حرارتی سیستم و اجزاء اصلی آن در شمال چین به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. از داده‌های تجربی بدست آمده، برخی نتایج مهم حاصل شد و پیشنهادات مفیدی جهت کارکرد راحت تر سیستم و طراحی بهینه تر ارائه گشت.

چو [۲۳] مدل سازی و کاربرد سیستم انبساط مستقیم انرژی خورشیدی-پمپ گرما در مکانیزم آب گرم کن مورد بررسی قرار دارند. مصرف آب گرم مستقیماً ۴٪ از انرژی کل کشور هنگ کنگ را تشکیل می‌دهد. حدود ۲۰٪ انرژی نیز در مصارف خانگی کاربرد دارد. عمده منابع انرژی برای تأمین آب گرم، گاز مایع و برق شهری است. استفاده از پمپ‌های گرمایی با کمک انرژی تجدیدپذیر خورشیدی هنوز متداول نشده است. در تحقیق مذکور، کاربردی از یک نوع DX-SAHP مورد مطالعه قرار داده شد. ابتدا مدل عددی معرفی شده با استفاده از داده‌های هواشناسی شبیه‌سازی شد. نتایج بدست آمده نشان داد ضریب عملکرد سیستم در مدت یک سال مقدار ۶.۴۶ است که به مراتب بهتر از پمپ های گرمایی متداول بود.

یومارتاس [۲۴] تجزیه و تحلیل سیستم خورشیدی کمکی به پمپ گرما با ذخیره‌سازی انرژی فصلی در مخازن را انجام داد. او این تحلیل را با کمک مدل کردن سطح مخزن بصورت دایروی و جفت شده با زمین انجام داد. در این تحقیق ضریب عملکرد سالیانه هدف تحقیق قرار گرفت. کلکتور خورشیدی با جذب انرژی تشعشعی در فصل زمستان این مقدار را در مخزن ذخیره می‌کرد. نتایج

^۱ -DX-SAHP

تحلیلی و و عددی وی برای تخمین زدن دمای سطح مخزن، مقدار انرژی جذب شده در هر ماه و ضریب عملکرد سالیانه متناوب سیستم گرمایشی-خورشیدی به کار گرفته شد.

مهنرج [۲۵] بر روی پیش‌بینی عملکرد سیستم انبساط مستقیم خورشیدی کمکی به پمپ گرما بوسیله شبکه عصبی مصنوعی کار کردند. در تحقیق انجام شده از داده‌های شهر کلکته هند (در مدار زاویه عرضی $11.15^{\circ} N$ و زاویه طولی $75.49^{\circ} E$ قرار دارد). استفاده شد. پارامترهای مؤثر مانند توان مصرفی، ظرفیت گرمایی، نرخ کارایی انرژی و دمای تخلیه کمپرسور در DX-SAHP از آزمایشات گوناگون با شدت تشعشع متفاوت و شرایط آب و هوایی محیط در شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفت.

گوروزابل [۲۶] و همکارانش تحلیلی بر سیستم‌های انبساط مستقیم خورشیدی کمکی به پمپ گرما را در چند مبرد مختلف ارائه دادند. در این تحقیق از دو نوع کلکتور استفاده شد. کلکتورهای بدون پوشش و کلکتور با یک پوشش به طور مجزا مورد بررسی قرار گرفت. برنامه‌ای کامپیوتری در موسسه علم و فن آوری ویرجینیا آمریکا توسعه یافت تا بتواند خصوصیات سیالات را پیش‌بینی کرده و در بالانس انرژی کلکتور لحاظ کند. کارایی حرارتی با شاخص ضریب عملکرد (COP) بیان می‌شود. که برای چند مبرد خالص تخمین زده شد. پایین آمدن COP با تغییر مبرد از R12 هیدروفلوروکربن‌های خالص و مخلوط‌های دیگر از این خانواده مورد بررسی قرار گرفت. یک فرآیند گرافیکی برای چندین مبرد و چندین ابعاد سطح کلکتور، و ظرفیت جابه‌جایی کمپرسور برای هر دو نوع کلکتور (با پوشش و بدون پوشش) توسعه و نمایش داده شد.

کوانگ [۲۷] بر روی عملکرد چند منظوره‌ای یک سیستم انبساط مستقیم خورشیدی کمکی به پمپ گرما انجام دادند. این سیستم می‌توانست برای تهویه مطبوع در تابستان، ایجاد گرما در یک محوطه محدود در زمستان و آب گرم کن در طول کل سال مورد استفاده قرار بگیرد. سطح این کلکتور حدود $10.5 m^2$ بود. سرعت کمپرسور متغیر و یک مخزن نگه‌دارنده به حجم $1 m^3$ در نظر گرفته شد. ضریب عملکرد تحت شرایط متفاوت تحلیل و بررسی شد. مقدار COP برای گرم کردن محوطه

در زمستان میانگین روزانه بین ۲.۶ تا ۳.۳ تغییر می‌کرد، در حالی که COP کل سیستم بین ۲.۱ تا ۲.۷ بود. برای گرم کردن آب، دمای نهایی تا $50^{\circ}C$ بالا می‌رفت. در تهویه مطبوع در تابستان کمپرسور فقط در شب کار می‌کرد چرا که در شب هزینه برق پایین بود با پایین آمدن دمای مخزن آب در طول روز تهویه مطبوع در این مکانیزم عملی می‌شد. یک سیستم DX-SAHP چند منظوره می‌تواند در یک شرایط آب و هوایی مشخص در مدت طولانی با هزینه نسبتاً پایین عمل کند.

بکیرچی [۲۸] و همکارش نتایج تجربی عملکرد حرارتی ناشی از پمپ گرما با منبع انرژی خورشیدی به منظور گرمایش مناطق مسکونی در نواحی سردسیر را مورد تحلیل قرار دادند. پمپ گرما با منبع خورشیدی مزایای بسیاری برای پاکیزه نگه داشتن محیط زیست نسبت به سایر سیستم‌های دیگر در کاربردهای مسکونی دارد. مشخصه بارز آند نداشتن گازهای خروجی مضر است. در اغلب موارد هیچگونه تولید گاز گلخانه‌ای مشاهده نمی‌شود. برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر ضریب عملکرد در یک فرآیند تجربی دوازده کلکتور تخت در استان ارزوروم^۱ ترکیه ساخته شد. علاوه بر آن حرارت محسوس تانک نگهدارنده، مبدل حرارتی (هر دو جریان آب)، پمپ حرارتی فشرده سازی (مایع به مایع)، پمپ آب و دیگر تجهیزات اندازه‌گیری در این آزمایش به کار گرفته شد. آزمایش از ژانویه تا ژوئن ۲۰۰۴ انجام شد. بازدهی کلکتور، ضریب عملکرد پمپ حرارتی COP و عملکرد سیستم (COPS) محاسبه شد.

دمای محیط بین $10.8^{\circ}C$ تا $14.6^{\circ}C$ تغییر می‌کند. این آزمایش نشان داد که پمپ گرما با منبع خورشیدی می‌تواند در سردترین نقطه ترکیه به کار رود.

هاولادر [۲۹] و همکارانش بر روی سیستم انرژی خورشیدی با پمپ گرما برای شیرین کردن آب کار کردند. یک واحد آب شیرین کن بر مبنای انرژی خورشیدی و پمپ گرما طراحی و ساخته شد. این سیستم متشکل از یک کمپرسور، کندانسور، اواپراتور، محفظه آب شیرین کن، تانک تغذیه، پمپ خلأ و واحد تقطیر می‌شود. پمپ خلأ به محفظه آب شیرین کن متصل است. یک نازل تزریقی برای تولید

¹ -Erzurum

قطرات آب خوراکی در آب شیرین کن به کار می رود. آب تغذیه قبل از فرآیند پاشش نازل گرم می شود. واحد آب شیرین کن کاربرد در کاهش در ستون تقطیر آب نیز دارد. مجموعه ای از آزمایشات در شرایط آب و هوایی گوناگون در سنگاپور انجام شد. اثر دمای آب تغذیه نیز بررسی شده، نرخ کارایی و ضریب عملکرد (COP) مورد ارزیابی قرار گرفت. نرخ بازدهی^۱ PR ۰.۷۷ تا ۱.۱۵ و ضریب عملکرد بین ۵ تا ۷ طبق آزمایشات بدست آمد.

سفیک و همکارانش [۳۰] برای خشک کردن قارچ از سیستم انبساط مستقیم خورشیدی کمکی به پمپ گرما در مقیاس آزمایشگاهی استفاده کردند. سیستم انرژی خورشیدی و پمپ گرما می توانند بصورت مجزا یا ترکیب با هم مورد استفاده قرار بگیرد. برنامه ای کامپیوتری که شامل تحلیل و بررسی عددی دمای هوای خشک کن، رطوبت نسبی و مقادیر وزنی محصول و سایر پارامترهای دیگر است در این تحقیق توسعه داده شد. از کنترل PLC برای چک کردن مقادیر نیز استفاده می شود. این نوع سیستم ارزان، با کیفیت مناسب خروجی و پایدار است. محصولات می توانند با انرژی کمتر خشک شوند. قارچ در دماهای خشک کن هوای $45^{\circ}C$ و $55^{\circ}C$ ، با نرخ جریان جرمی $\frac{Kg}{h}$ ۳۱۰، با رطوبت اولیه $\frac{gwater}{dry matter}$ ۱۳.۲۴ به رطوبت نهایی $\frac{gwater}{dry matter}$ ۰.۰۷ می رسد. در پمپ گرما زمان کل فرآیند بین ۲۲۰-۲۵۰ دقیقه، در انرژی خورشیدی بین ۱۶۵ تا ۲۷۰ دقیقه و در انرژی خورشیدی کمکی به پمپ گرما بین ۱۹۰ تا ۲۳۰ دقیقه به طول می انجامد. ضریب عملکرد سیستم بین ۲.۱ تا ۳.۱، نرخ بهره برداری انرژی^۲ بین ۰.۴۲ تا ۰.۶۶ و نرخ جدایش رطوبت مخصوص در رنج ۰.۲۶ تا ۰.۹۲ به دست آمد.

هاولادر [۳۱] در سال ۲۰۰۵ بر روی انرژی خورشیدی کمکی به پمپ گرما در خشک کن و آب گرم کن تواما با هم، کار کردند. نتایج آزمایشگاهی با نتایج تحلیلی در شرایط آب و هوایی سنگاپور مقایسه شد. ضریب عملکرد برای سرعت دورانی کمپرسور ۱۸۰۰ دور بر دقیقه، مقدار ۷ بدست آمد. ماکزیمم کارایی کلکتور برای اوپراتور-کلکتور ۰.۸۶ و برای کلکتور هوا(قبل از ورودی هوا به

^۱ -performance ratio

^۲ -Enrgy utilization ratio(EUR)

کندانسور) ۰.۷ بدست آمد. نرخ استخراج رطوبت برای ۲۰ Kg ماده و با سرعت ۱۲۰۰ دور بر دقیقه مقدار $0.65 \frac{Kg}{Kwh}$ بدست آمد. اگر نرخ جریان جرمی هوا افزایش یابد مقدار زمان خشک کردن کمتر می شود. همچنین افزایش درجه حرارت هوا نیز سرعت فرآیند را بالا می برد. پارامترهای مؤثر دیگر به سیستم، مقدار شدت تشعشع خورشید، سرعت کمپرسور، و کل بار جرمی قرارداده شده در خشک کن است. با افزایش سرعت دورانی کمپرسور، بازدهی کلکتور افزایش و مقدار COP و SMER کاهش می یابد.

هاولادر [۳۲] و همکارانش بر روی انرژی خورشیدی کمکی به پمپ حرارتی در خشک کن کار کردند. در این بررسی بر روی بازدهی کلکتور هوا و کلکتور-اوپراتور (تحت شرایط یکسان آب و هوایی برای هر دو نوع کلکتور) تحقیق شد. کلکتور در معرض نور خورشید قرار می گیرد و مبرد در آن مستقیماً تبخیر می شود. دمای مبرد در اوپراتور-کلکتور همواره از دمای محیط پیرامون کمتر است. اگر میزات تلفات گرما در کلکتور هوا کاهش یابد، مقدار راندمان حرارتی کلکتور بالا خواهد رفت. در کلکتور اوپراتور-بازدهی در رنج ۰.۸-۰.۸۶ و در کلکتور هوا بین ۰.۷-۰.۷۶ است.

۲-۵ جمع بندی و ضرورت انجام تحقیق

هاولادر و جهانگیر [۳۲] و [۳۱] مکانیزم جدیدی در سیستم های خشک کن پمپ حرارتی به کمک انرژی خورشیدی ارائه دادند که نزدیکترین تحقیق به کار حاضر بودند. برای تأمین گرمای مورد نیاز هوای مورد نیاز در خشک کن از یک کلکتور هوا و حرارت آزاد شده در رطوبت زدای هوا (این عنصر با شیر کنترلی به کندانسور هوا متصل است) استفاده شد. حرارت آزاد شده از مبرد به منظور تأمین گرم کردن آب مورد استفاده قرار می گیرد. این سیکل به صورت آزمایشگاهی در سنگاپور بررسی شد. کلکتور بدون پوشش^۱ به کار گرفته و تابع هدف برای تحقیق آنها کارایی کلکتور تعریف شد معادلات به کار گرفته شده به تفصیل بیان نشده است. در کار حاضر انرژی آزاد شده در مبرد به

¹ -bare

هوای در حال جریان انتقال می‌یابد و برای بهینه‌سازی انرژی، حرارت آزاد شده از رطوبت زدا به منظور گرم کردن جریان مبرد دوم (آب) مورد استفاده قرار گرفته و با فرض پایایی، مستقیم و پیوسته بودن نوعی از خشک‌کن‌های دسته‌ای سیکل مورد بررسی قرار گرفت. ملاحظات انرژی خورشیدی به تفصیل در فصل سوم بررسی شده است.

در برخی از خشک‌کن‌ها همچنان استفاده از سوخت‌های فسیلی رواج دارد. علاوه بر تجدید ناپذیر بودن این‌گونه منابع انرژی، استفاده از آن اثرات مخربی در آلودگی هوا و گرم شدن تدریجی کره زمین دارد. استفاده از انرژی نو و تجدیدپذیر خورشیدی و استفاده از چرخه رطوبت‌زدایی (پمپ حرارتی) علاوه بر عملکرد بهتر نسبت به سایر سیستم‌های خشک‌کن اثرات مخربی بر محیط‌زیست نخواهد داشت.

استفاده از دمای پایین‌تر مبرد برای خشک کردن و البته کنترل دقیق بر روی پارامترهای خروجی از مشخصه‌های خشک‌کن پمپ حرارتی به کمک سیستم انبساط مستقیم خورشیدی^۱ است. برای تمامی مناطق با اقلیم آب و هوایی گوناگون این نوع مکانیزم استفاده می‌شود. در خشک‌کن پمپ حرارتی^۲ ضرایب عملکرد و نرخ رطوبت‌زدایی به شدت وابسته به رطوبت نسبی هوا هستند به همین علت این تکنولوژی در کشورهایی که رطوبت نسبی بالایی (مانند کشورهای جنوب شرق آسیا) بیشتر به کار می‌رود. سیستم‌های DX-SAHPD علاوه بر استفاده در این نوع اقلیم‌ها در مناطق گرم و خشک نیز کارایی لازم را دارد. در این نوع مناطق کلکتور تخت^۳ انرژی تشعشعی بیشتری جذب کرده، اختلاف دو دمای منبع سرد و گرم کاهش یافته، ضریب عملکرد و عمر مفید مبرد را افزایش می‌یابد و از این نظر انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به HPD دارد. می‌توان با بهینه کردن زاویه شیب کلکتور در ماه‌های سرد سال تشعشع بیشتری از خورشید دریافت کرد. چرخه رطوبت‌زدایی متداوم و بازیابی انرژی نیز در این نوع سیکل همانند HPD وجود دارد. علاوه بر این می‌توان در ساعاتی که کلکتور تخت

^۱- DX-SAHPD

^۲-HPD

^۳-flate plate collector

(نزدیک به ظهر خورشیدی) انرژی تشعشع بیشتری دریافت می کند برای بالا بردن ضریب عملکرد استفاده کرد. تاکنون مکانیزم های متفاوتی در صنعت خشک کردن مانند: بستر سیال^۱، پاششی^۲ تحلیل و بررسی شده است، در زمینه خشک کن پمپ حرارتی و خشک کن ها به کمک انرژی خورشیدی تحقیقاتی صورت گرفته اما بررسی جامعی در زمینه خشک کن های پمپ حرارتی به کمک انرژی خورشیدی (توام با هم) تاکنون صورت نگرفته است. توضیحات مذکور می تواند اهمیت بررسی این موضوع و ضرورت انجام این تحقیق را توجیه کند. جنبه های نوآوری این تحقیق را می توان در موارد زیر خلاصه کرد.

- ۱- استفاده از مکانیزم و چیدمان جدید نسبت به تحقیق [۳۱] و [۳۲]
- ۲- محاسبه دقیق شدت تشعشع و مجموع تشعشع جذب شده در ساعات مختلف شهرهای ایران به منظور محاسبه دقیق ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت صورت پذیرفته است. شایان ذکر است در تحقیقات گذشته برای تشعشع جذب شده معمولاً مقادیر دقیق محاسبه نشده و از مقادیر متداول در محاسبه توابع هدف استفاده شده است.
- ۳- استفاده از سیکل های با توانایی بازیابی انرژی، جنبه انرژی های نو و عدم تولید گازهای سمی در اتمسفر، استفاده از ترکیب پمپ حرارتی و انرژی خورشیدی برای صرفه جویی در مصرف انرژی، استفاده چند منظوره (خشک کردن مواد غذایی و تولید آب گرم خورشیدی) از این نوع سیکل در تحقیقات بسیار اندکی و بدون ذکر معادلات تحلیلی بیان شده است
- ۴- عدم وابستگی نه چندان زیاد این نوع سیکل به رطوبت نسبی و قابل استفاده در تمامی اقلیم های آب و هوایی می تواند فرآیند خشک کردن را در تمامی نواحی آب و هوایی سهولت بخشد. خشک کن پمپ حرارتی به شدت وابسته به رطوبت نسبی است و در کشورهایمانند سنگاپور، مالزی و هند که دارای رطوبت نسبی بالایی هستند قابل استفاده است.

¹ -deep bed drying

² -spray drying

فصل ۳ - مدل سازی و معادلات حاکم

۳-۱ مقدمه

در این فصل معادلات حاکم و الگوریتم نهایی مشخص خواهد شد. در ابتدای فصل به بررسی شماتیک سیکل اصلی و نحوه گردش جریان در آن تشریح شده است. در قسمت دوم به روابط تحلیلی در قانون دوم فیک پرداخته و اثر عوامل گوناگون بر نسبت محتوای رطوبت بررسی شده است. نمونه‌ای خاص از مواد غذایی انتخاب شده را برگزیده و در پارامترهای ورودی در پمپ گرما استفاده می‌شود. روابط و معادلات حاکم در اجزاء سیکل تبرید و پمپ گرمایی با فرض همسو بودن جریان هوا و مبرد در مبدل‌های حرارتی مانند کندانسور، رطوبت زدای هوا، ارائه شده و با داشتن پارامترهای ورودی دمای نقاط مختلف سیکل در هر دو جریان (هوا و مبرد) بدست خواهد آمد. مکانیزم سیستم انبساط مستقیم خورشیدی در خشک‌کن تشریح شده، روابط و محاسبات مربوطه برای محاسبه شدت تشعشع جذب شده در واحد سطح ارائه می‌شود. از فرضیات در نظر گرفته شده در مراجع دیگر برای سطح کلکتور، نرخ جابه‌جایی کمپرسور، دمای میانگین هوا،..... استفاده کرده نهایتاً الگوریتم محاسبه ضریب عملکرد و نرخ رطوبت زدایی در سیستم انبساط مستقیم خورشیدی در خشک‌کن پمپ حرارتی ارائه خواهد شد.

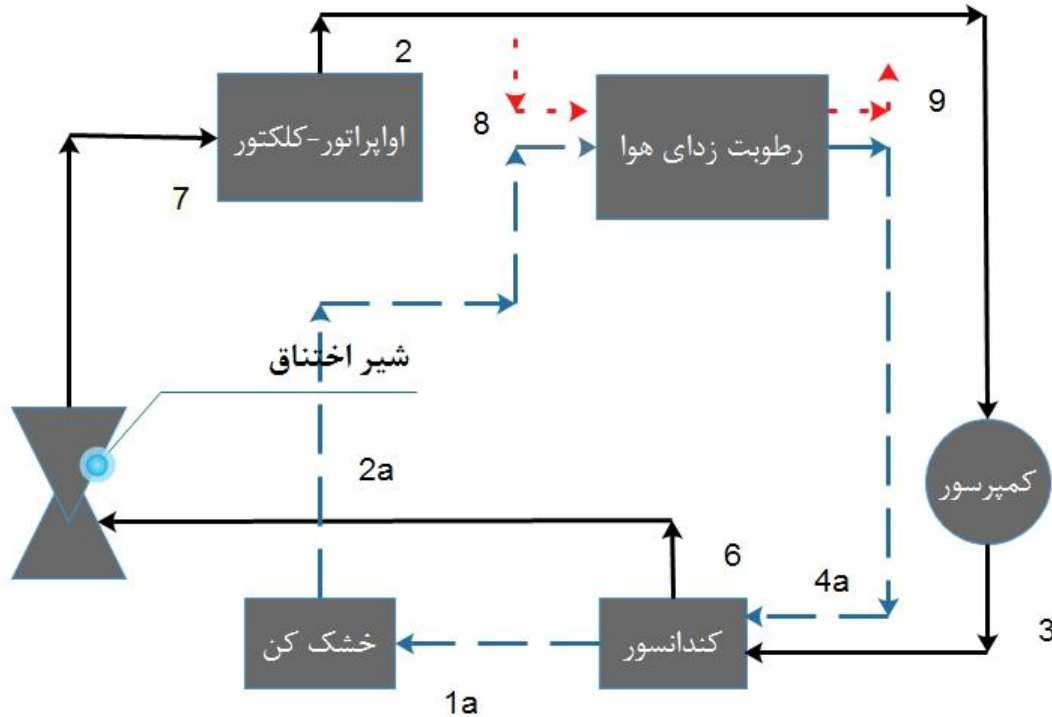
۳-۲ شماتیک مربوط به سیکل و نحوه گردش جریان

فن آوری پمپ حرارتی امروزه در صنعت و خشک کردن مواد غذایی از جمله میوه ها، سبزیجات، ماهی و حتی در زیست شناسی افزایش یافته است.

مزیت اصلی تکنولوژی پمپ حرارتی توانایی نگهداری و ذخیره انرژی و کنترل دما و رطوبت فرآیند است که در شرایط گسترده دمایی می تواند اعمال شود. افزایش درخواست در این گونه سیستم ها به علت تولید محصول با کیفیت بسیار بالا و مناسب است. خشک کن نیز می تواند مستقل از شرایط آب و هوایی پیرامون و محیط اطراف باشد. فن آوری خشک کن و پمپ حرارتی (پنل سولار و انرژی های نو متعاقباً به سیستم مد نظر ما اضافه خواهد شد). سبب بازیابی انرژی نهان و آشکار

هوای خروجی می شود، بنابراین بهبود کارایی دمایی و کنترل شرایط ورودی موثر در خشک کن را سبب می شود. ذخیره انرژی در این گونه سیستم ها ۴۰٪ بیشتر از خشک کن های با کمک انرژی الکتریسیته است. پمپ حرارتی برای مقادیر بالای محصول نیز مناسب و توانایی کنترل فرآیندهای زودگذر دمایی را داراست. رطوبت و سرعت هوای فرآیند نیز می تواند با کیفیت محصول بهینه شود و هزینه طراحی کاهش یابد. دو مزیت اصلی پمپ حرارتی این است که در درجه اول آنتالپی نهان و آشکار هوای خروجی را بهبود می دهد. دیگر مزیت آن توانایی بازیابی انرژی است. مایع شدن رطوبت در محفظه رطوبت زدا صورت می پذیرد که به موجب آن رطوبت هوای عامل کاهش می یابد و سبب کاهش زمان خشک کردن می شود. به طور مثال ذرت تحت دمای ۳۰ تا ۴۵ سانتیگراد دچار تخریب در ساختارش نمی شود. تکنولوژی پمپ حرارتی برای خشک کردن موادی به کار می رود که در دمای پایین تولید می شوند و البته در کشورهایی کاربرد دارد که رطوبت هوای آن بالا باشد. بسیاری از محققان به اهمیت خشک کن پمپ حرارتی در محصولات واقف هستند.

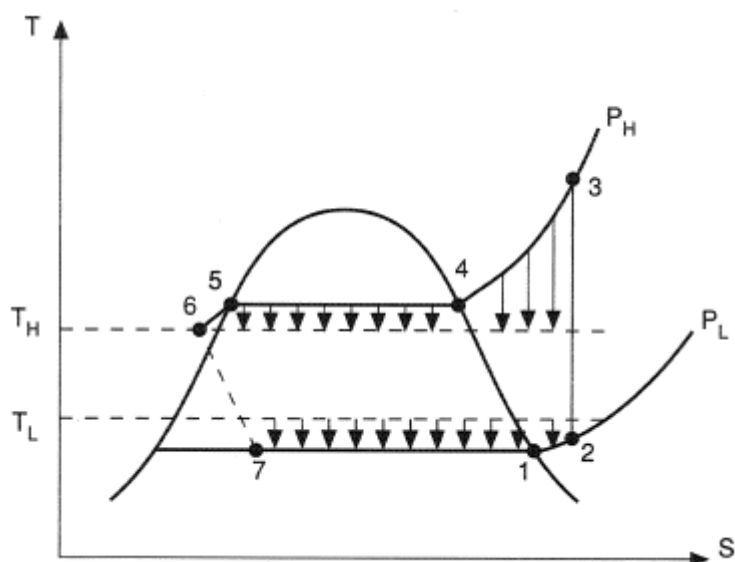
شکل ۱-۳ سیستم انبساط مستقیم خورشیدی کمکی به خشک کن پمپ حرارتی را نشان می دهد. خطوط مشکی رنگ جریان مبرد R134، خطوط آبی رنگ جریان هوا و خط قرمز نشان دهنده مبرد دوم (آب) که با محفظه رطوبت زدای هوا در تبادل حرارتی قرار دارد.



شکل ۳-۱: شمای کلی سیستم انبساط مستقیم خورشیدی کمکی به خشک کن پمپ حرارتی

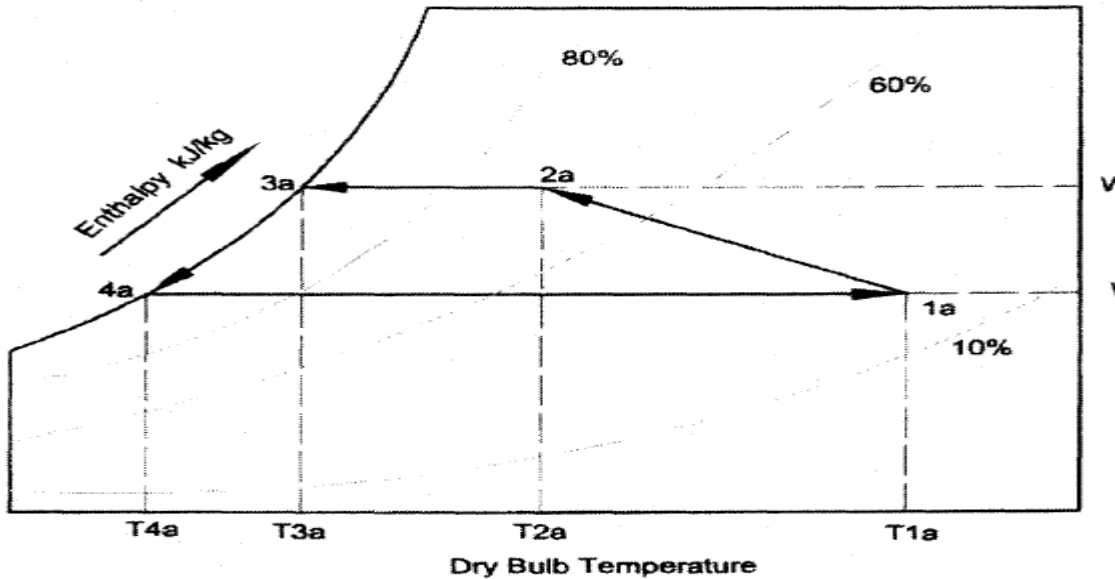
مبرد بعد از خروج از شیر اختناق وارد اوپراتور شده، کلکتور خورشیدی انرژی لازم برای اینکه مبرد به حالت اشباع (مافوق گرم) درآید را فراهم می کند (فرآیند ۲-۷). مبرد بعد از اوپراتور وارد کمپرسور می شود و طی یک فرآیند آیزنتروپیک دما و فشار آن افزایش می یابد (فرآیند ۳-۲). نهایتاً بعد از عبور از کندانسور و سرد شدن آن به حالت اشباع (در این گزارش مادون سرد) درآمده (فرآیند ۶-۳)، بعد از این مرحله وارد شیر اختناق شده و به حالت اشباع رسیده (فرآیند ۲-۷) و سیکل کامل می شود. در این سیکل با توجه به اینکه این حرارت از طریق انرژی خورشیدی تامین می شود رطوبت زدایی در مبدلی دیگر باید صورت بپذیرد و از جریان آب با نرخ جریان جرمی معین استفاده می شود. در واقع این نوع سیستم علاوه بر آنکه ضریب عملکرد بالاتری نسبت به پمپ حرارتی دارد، برای افزایش دمای جریان آب نیز می تواند مورد استفاده قرار بگیرد.

در محفظه کندانسور هوا گرمای آزاد شده از مبرد را دریافت کرده و وارد خشک کن می شود. آب نیز از گرمای آزاد شده از هوا در محفظه رطوبت زدا را جذب کرده و دمایش افزایش می یابد. نمودار دما بر حسب آنترپپی مبرد R134 در شکل ۲-۳ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۳: نمودار تغییرات دما بر حسب آنترپپی برای مبرد در سیکل پمپ حرارتی چارت سایکرومتری سیکل هوا در شکل ۳-۳ نیز نشان داده شده است. (در شکل ۱-۳ نیز نحوه گردش جریان هوا نشان داده شده است نقطه 3a روی شکل ۱-۳ قرار ندارد چرا که در محفظه رطوبت زدا رخ می دهد و در نقطه شبیم همچنان هوا درون رطوبت زدا است) هوای ورودی به خشک کن در نقطه 1a وارد محفظه خشک کن می شود، رطوبت را از محصول جدا می کند. هوای با رطوبت بالا در نقطه 2a وارد رطوبت زدا می شود. در فرآیند 2a-3a هوا در درجه اول تا نقطه شبیم سرد می شود. آب موجود در مخلوط جدا شده و خارج می شود. آنتالپی نهان بخار بوسیله مبرد در حال جوشش جذب می شود. حرارت بازیابی شده وارد کندانسور می شود. هوای سرد و رطوبت زدایی شده در فرآیند حرارت را در کندانسور جذب می کند تا به دمای مطلوب برسد. در سیکل هوا، هوای مرطوب از محفظه خشک کن مستقیماً خارج می شود و وارد محفظه جدایش رطوبت شده که در آن رطوبت زدایی صورت می گیرد. سپس هوای گرم از کندانسور خارج شده تا وارد محفظه خشک کن شود. در

شکل شماره ۳ نمودار تغییر رطوبت مطلق هوا بر حسب آنتالپی آن نمایش داده شده است. فرآیند 1a-2a در محفظه خشک کن رخ می‌دهد. به همین علت رطوبت مطلق هوا افزایش یافته است. همچنین محفظه خشک کن نسبت به محیط پیرامون آدیاباتیک در نظر گرفته می‌شود. نقطه 4a هوای خروجی از رطوبت زدا و نقطه 1a خروجی کندانسور در نظر گرفته شده است [۳۳]



شکل ۳-۳: نمودار تغییرات رطوبت مطلق هوا در سیکل انبساط مستقیم خورشیدی کمکی به خشک کن پمپ حرارتی

۳-۳ بررسی ضریب نفوذ و نسبت رطوبت موجود در مواد غذایی

فرآیند خشک کردن با انتقال جرم همراه است که در ادامه به بررسی جزئی تر این مسأله خواهیم

پرداخت.

۳-۳-۱ رابطه فیک در سه مختصات مختلف و حل تحلیلی آن

خشک کردن میوه‌ها و سبزیجات اغلب در یک مدت زمان مشخص رخ می‌دهند. انتقال رطوبت یا

بخار آب از طریق پخش شدگی^۱ (نفوذ) صورت می‌گیرد. مکانیزم نفوذ شامل پخش مولکولی، پخش

مایع میان منافذ و هسته جامد و نهایتاً تبدیل به بخار می‌شود. نرخ جدایش رطوبت بوسیله پخش

^۱ - Diffiusion

مؤثر^۱ شرح داده می‌شود. بر این مبنا قانون دوم فیک به صورت زیر بیان می‌شود. [۳۴]

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 m \quad (۱-۳)$$

معادله بالا تحلیل بسیار ساده‌ای دارد. البته از اثرات انقباض^۲ (چروکیدگی) نیز باید صرف‌نظر کرد. اگر راستای محصول و جهت فرآیند را یک‌بعدی در نظر بگیریم معادلات در سه دستگاه متفاوت مطابق زیر به دست می‌آیند.

معادلات در دستگاه کوارتزین: تکه نامحدود^۳، معادلات در دستگاه استوانه‌ای و معادلات در دستگاه کروی.

معادله فیک در دستگاه کوارتزین در یک بعد مطابق با فورمول زیر به دست می‌آید.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j-1)^2} \exp\left(- (2j-1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2}\right) \quad (۲-۳)$$

در این معادله $D_{eff} \frac{m^2}{s}$ برابر با ضریب نفوذ موثر، L مقدار ضخامت ماده، MR مقدار نرخ رطوبت

بی‌بعد، n عدد صحیح مثبت، و x مختصاتی است که فرآیند خشک کردن در آن صورت می‌گیرد.

حل معادله در دستگاه استوانه‌ای نامحدود: حل معادله فیک در دستگاه استوانه‌ای به صورت زیر

است:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{4}{\beta_n^2} \exp\left(- \frac{\beta_n^2 D_{eff} t}{r_c^2}\right) \quad (۳-۳)$$

^۱ - effective Diffusivity

^۲ - shrinkage

^۳ - infinite slab

در معادله بالا β_n ریشه n ام تابع بسل و r_c شعاع سیلندر است.

حل معادله در دستگاه کروی: حل این معادله در دستگاه کروی به صورت زیر است.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{j^2} \exp\left(-j^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{r_s^2}\right) \quad (4-3)$$

در این معادله r_s شعاع کره می‌باشد.

برای فرآیندهای طولانی مدت مقدار $MR < 0.6$ می‌باشد. که L ، r_c و r_s مقادیر کوچکی می‌باشند و

t مقدار بزرگی است. اگر تنها یک جمله از حل معادلات فیک را در نظر بگیریم و از باقی جملات

سری‌ها صرف نظر کنیم معادلات در دستگاه کوارتزین، استوانه‌ای و کروی به صورت زیر نوشته می‌شوند.

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2}\right) \quad (5-3)$$

$$MR = \frac{4}{\beta_1^2} \exp\left(-\frac{\beta_1^2 D_{eff} t}{r_c^2}\right) \quad (6-3)$$

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r_s^2}\right) \quad (7-3)$$

معادلات بالا را می‌توان به صورت لگاریتمی و مطابق زیر به دست آورد.

$$\ln(MR) = A - Bt \quad (8-3)$$

ثابت B برای تکه $\frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2}$ ، برای استوانه $-\frac{\beta_1^2 D_{eff} t}{r_c^2}$ ، و برای کره $\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r_s^2}$ است. شیب B برای

محاسبه ضریب نفوذ به کار می‌رود. دانش حرکت شناسی در فرآیند خشک کردن برای طراحی، بهینه

سازی و شبیه‌سازی بسیار مهم است. همچنین هندسه اکثر مواد با هندسه کروی و تکه‌ای (کوارتزین)

مدل می‌شود. منحنی‌های خشک کردن معمولاً با تعریف ثابت نرخ خشک کردن بر اساس سینتیک

مرتبه اول مدل می‌شوند. معادلات نرخ رطوبت معمولاً با دو مدل نمایی ساده و پیچ ارائه می‌شوند.

صورت کلی معادله نمایی ساده به صورت زیر است.

$$MR = \exp(-k_s t) \quad (9-3)$$

مدل نمایی ساده تقریب خوبی برای مراحل ابتدایی فرآیند است. برای حل مشکل این معادله و غلبه بر ضعف‌های آن مدل پیچ توصیه می‌شود که نمای آن در پایه زمان طبق معادله زیر بیان می‌شود.

$$MR = \exp(-k_s t^n) \quad (10-3)$$

این تقریب برای داده‌های آزمایشگاهی مواد غذایی مانند در سیب‌زمینی، انگور، دانه جو توسعه یافته است

۳-۳-۲ تأثیر دما بر ثوابت معادله فیک

ثابت فرآیند یعنی k_s به دمای مربوط هوای خشک کردن وابسته است. هرچقدر دمای فرآیند رو به افزایش یابد مقدار این ثابت بزرگ‌تر خواهد شد. همچنین اگر نسبت ضخامت به طول ماده در سینی زیاد شود، ثابت معادله کم شده و فرآیند دیرتر انجام خواهد شد. البته تأثیر دما به مراتب بالاتر از تأثیر ابعاد ماده مورد نظر در سینی است. برای ثابت معادله پیچ و نمایی می‌توان رابطه زیر را بیان کرد.

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(273.15 + T_{air})}\right) \quad (11-3)$$

در این رابطه k_0 و E_a مقادیر ثابتی هستند. E_a مقدار انرژی برانگیختگی است که برای هر ماده مقداری متفاوت است. به طور مثال این انرژی برای نخود فرنگی بیشتر از سیب‌زمینی و دانه جو است. R نیز ثابت جهانی گازها بر پایه مول است البته تأثیر دما در خشک کردن سیب‌زمینی به مراتب بیشتر از دانه جو و نخودفرنگی است چرا که تکه‌های سیب زمینی بدون پوست و مواد دیگر با پوست درون سینی‌ها قرار می‌گیرند.

۳-۳-۳ تأثیر دما بر روی ضریب نفوذ مواد غذایی

ضریب نفوذ نیز به شدت تحت تأثیر دما است. ضریب نفوذ همانند ثابت خشک کردن رابطه‌ای

نمایی با دما دارد. این معادله طبق نمونه آرنهیوس^۱ از معادله زیر تبعیت می‌کند.

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(273.15 + T_{air})}\right) \quad (۱۲-۳)$$

در این روابط T بر حسب درجه سانتیگراد است. E_a با مقادیر قبلی مربوط k_s تفاوت اندکی دارد

این مقدار برای گیاهان حدود $۲۰ \frac{kJ}{mol}$ ، برای چای سبز $۴۰۶ \frac{kJ}{mol}$ و برای پیاز حدود $۱۲۰۰ \frac{kJ}{mol}$

است. [۳۵] و $R \frac{kJ}{mol}$ ثابت جهانی گازها است. این مقادیر در جدول زیر آمده است. واضح است

افزایش دما سبب بالا رفتن مقدار ضریب نفوذ می‌شود. مقادیر ضریب نفوذ بسته به نوع ماده می‌تواند از

$10^{-8} \frac{m^2}{s}$ تا $10^{-11} \frac{m^2}{s}$ تغییر کند.

جدول ۱-۳ انرژی فعال‌سازی در مواد غذایی گوناگون طبق مراجع مختلف

نوع ماده غذایی	انرژی فعال‌سازی (kJ/mol) E_a	مرجع
فلفل قرمز	۴۱.۹۵	گوپتا(۲۰۰۲)[۳۶]
نخود فرنگی	۲۸.۴۰	سیمال(۱۹۹۶)[۳۷]
لوبیا سبز	۳۹.۴۷	سنادیرا(۲۰۰۳) [۳۴]
هویج	۲۸.۳۶	دویماز(۲۸.۳۶)[۳۸]
نعناع	۸۲.۹۳	پارک(۸۲.۹۳)[۳۹]
بامیه	۵۱.۲۶	دویماز(۲۰۰۵)[۸]

^۱ -Arrhenius-type

۳-۳-۴ جمع بندی

در نهایت با استفاده از معادلات بالا و روش‌های تجربی می‌توان نسبت رطوبت را برای مواد غذایی گوناگون بر اساس دمای پایه تر بر حسب % محاسبه کرد. باید به این نکته توجه داشت بعضی مدل‌های توسعه یافته مختص مواد خاصی هستند. ممکن است از یک مدل برای دو ماده نیز استفاده شود. (مانند مدل GAB که هم در آناناس و هم در انجیر در محاسبه محتوای رطوبت تعادلی به کار می‌رود). بنا به هندسه ماده (ضخامت)، دمای فرآیند، سرعت هوا، و جنس ماده ثوابت موجود در معادله فیک تغییر می‌کنند. برای مدل نهایی داشتن نسبت رطوبت در حالت اول و نهایی (بر اساس دمای پایه تر) الزامی است. بر این مبنا می‌توان این مقدار را از اول فرض کرد یا اینکه در یک نمونه خاص و در شرایط آزمایشگاهی و با داشتن ثوابت معادله فیک (مانند انرژی فعالسازی و ضریب نفوذ در حالت دمای بینهایت) این مقادیر را محاسبه کرد، همچنین زمان کل فرآیند نیز در مدل اولیه باید معلوم و مشخص باشد. جرم ماده در هر سینی جزء مفروضات تابع بهینه سازی است. در این تحقیق به طور کلی پارامترهای ورودی (نرخ رطوبت اولیه و نهایی، زمان کل فرآیند، جرم ماده و دمای فرآیند) را جزء داده‌های ورودی در نظر گرفته برای این منظور از مرجع [۴۰] استفاده خواهیم کرد (نرخ محتوای رطوبت تعادلی از ۹۰٪ به ۱۰٪ در گندم طی مدت زمان حدود ۴۸۰ دقیقه صورت پذیرفته و همچنین مختصات کروی برای تحلیل قانون فیک استفاده شده است).

۳-۴ بررسی معادلات مربوط به پمپ حرارتی و مفروضات مسأله

۳-۴-۱ مدل ریاضی خشک کن پمپ حرارتی

محققین مختلف تئوری‌های گوناگونی ارائه داده اند و طرحهایی برای خشک کن پمپ حرارتی برای مدل کردن آن تا به امروز کشف شده است که اغلب پیکره آن و شرایط واقعی بسیار پیچیده است. بنابراین یک مدل ساده از نوع خشک کن موازی ارائه می‌شود که در شرایط پایا عمل میکند.

خواص بخار و مبرد نیز از روابط تجربی استفاده می شود.

فرضیاتی که برای مدل ریاضی به کار می رود در زیر آورده شده است.

۱- در خروجی اواپراتور و کندانسور مبرد به ترتیب بخار سوپرهیت (با همان فشار اشباع حالت بخار اشباع و اختلاف دمای 5°C) و مایع مادون سرد (با همان فشار اشباع حالت مایع اشباع و اختلاف دمای 5°C) در نظر گرفته می شود.

۲- در کمپرسور فرآیند هم آنتروپپی (یا همان پلی تروپیک و برای مبرد R134 با نمای پلی تروپیک 1.106 و در شیر اختناق فرآیند هم انتالپی است) [۴۱]

۳- لوله های اتصالی به اجزاء پمپ حرارتی عایق و از افت فشار در لوله ها صرف نظر شده است.

۴- دیواره های اجزاء عایق هستند.

۵- پمپ حرارتی در شرایط پایا عمل می کند.

۳-۴-۱-۱-۱ فرضیات خشک کن

۱- لوله های هوا و محفظه خشک کن عایق هستند

۲- شرایط پیرامون و ظرفیت حرارت مخصوص هوا ثابت است.

۳- خشک کن در شرایط پایاست.

۴- فشار کلی هوا در سیستم مقدار ثابت یک اتمفسر است.

۵- فرآیند خشک کردن تحت شرایط پریودیک است و در هر دوره تناوب یا همان پریود زمانی روی خط حباب تر ثابت رو نمودار سایکرومتری است.

۶- تعادل دمایی بین هوا و محصول وجود دارد.

۷- شرایط ورودی در رطوبت زدا دقیقاً مشابه شرایط خروجی خشک کن و شرایط ورودی هوا در خشک کن دقیقاً با شرایط خروجی کندانسور یکسان است.

مدل ریاضی خشک کن پمپ حرارتی از سه زیرمدل ساخته شده است. مدل خشک کن، مدل

پمپ حرارتی، مدل ضریب عملکرد. معادلات تعادل جرم و حرارت در مدل ریاضی رعایت شده است. اساس پمپ حرارتی شامل اجزاء زیر است. اوپراتور-کلکتور، کمپرسور، کندانسور و لوله های مویین (همان شیر انبساط)

البته مشخصه های هندسی سیستم مانند فاکتور انشعاب^۱ شرایط ورودی به اوپراتور به نوبه خود در مدل سازی تأثیر دارند. این مدل می تواند شرایط خروجی کندانسور را مشخص کند و متعاقباً ضریب عملکرد سیستم را مشخص می کند.

۳-۴-۱-۲ معادلات به کار رفته در خشک کن

تعادل جرم و انرژی بین محصول و هوای فرآیند در خشک کردن می تواند با معادلات زیر بیان

شود. [۴۲]

$$\theta_{mr} \dot{m}_a (w_{do} - w_{di}) = \frac{m_p (Mr_{\theta i} - Mr_{\theta f})}{100} = \dot{m}_d \quad (۱۳-۳)$$

در رابطه شماره (۱۳-۳) θ_{mr} مجموع زمان فرآیند خشک کردن، \dot{m}_a نرخ جریان جرمی مبرد بر حسب کیلوگرم بر ثانیه، $Mr_{\theta i}$ و $Mr_{\theta f}$ محتوای رطوبت تعادلی بر حسب درصد دمای حباب خشک در ورودی و خروجی خشک کن و m_p جرم ماده مورد نظر در سینی می باشد.

$$c_{pa} t_{di} + w_{di} (h_{fg} + c_{pvt} t_{di}) = c_{pa} t_{do} + w_{do} (h_{fg} + c_{pvt} t_{di}) \quad (۱۴-۳)$$

همچنین برای محاسبه آنتالپی هوا از معادله (۱۵-۳) باید استفاده شود.

$$h = c_{pa} t + w (h_{fg} + c_{pvt} t) \quad (۱۵-۳)$$

در رابطه (۱۴-۳) c_{pv} ، c_{pa} ، به ترتیب ظرفیت حرارتی مخصوص هوای خشک و ظرفیت حرارت مخصوص بخار آب و مقدار آنها به ترتیب ۱.۰۰۸ و ۱.۷۶۳ کیلوژول بر کیلوگرم کلوین

^۱ -Bypass factor

می‌باشند. همچنین h_{fg} آنتالپی نهان بخار آب در دمای مرجع 0° درجه سانتیگراد و مقدار آن 2503 است [۱۶]. زیرنویس‌های do و di در معادله شماره (۳-۱۴) مربوط به ورودی و خروجی خشک است.

۳-۴-۳ معادلات رطوبت زدا

مدل رطوبت زدا می‌تواند بر اساس تعادل جرم و انرژی بین هوای در حال جریان و سطح مبدل به دست آید. [۱۰]

$$m_{we} = \dot{m}_a(1 - BF)(w_{do} - w_{dehs}) \quad (۳-۱۶)$$

در این رابطه BF فاکتور انعشاب، و زیرنویس $dehs$ مربوط به سطح رطوبت زدا است.

$$\begin{aligned} Q_{deh} &= \dot{m}_a(1 - BF)(h_{do} - h_{dehs}) - m_{we}h_{we} = m_{rwater}(H_8 - H_9) \\ &= \dot{m}_a(h_{deho} - h_{do}) \end{aligned} \quad (۳-۱۷)$$

در رابطه شماره (۳-۱۷) Q_{deh} حرارت آزاد شده در رطوبت زدا، h آنتالپی جریان هوا، H آنتالپی جریان مبرد دوم (آب) و m_{we} نرخ جریان جرمی رطوبت جدا شده از سطح رطوبت زدا با واحد کیلوگرم بر ثانیه است.

۳-۴-۴ معادلات کمپرسور

مدل ریاضی حرکت متناوب کمپرسور برای پیش بینی تغییرات آنتالپی مبرد بین فرآیند فشرده سازی و ملاحظات انرژی صورت می‌گیرد.

$$W_{comp} = \frac{\dot{m}_r(H_3 - H_2)}{\eta_{comp}} \quad (۳-۱۸)$$

در این رابطه \dot{m}_r نرخ جریان جرمی مبرد، η_{comp} بازدهی کمپرسور و H آنتالپی مبرد و در رابطه شماره (۳-۱۹)، η_v بازدهی حجمی کمپرسور، VD جابه‌جایی حجمی کمپرسور و v_{r2} حجم مخصوص

مبرد در حالت شماره ۲ (در دور کمپرسور ثابت) مطابق با شکل ۳-۲ است. [۲۱]

$$\dot{m}_r = \frac{\eta_v VD}{v_{r2}} \quad (۱۹-۳)$$

برای محاسبه اختلاف آنتالپی در خروجی اواپراتور و کمپرسور از رابطه زیر استفاده می‌کنیم.

$$\Delta H = p_2 v_{r2} \left(\frac{n}{n-1} \right) \left\{ \left(\frac{p_7}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right\} \quad (۲۰-۳)$$

در این رابطه n نمای پلی‌تروپیک فرآیند است

۳-۴-۱-۵ معادلات کندانسور

مدل کندانسور برای پیش بینی انرژی منتقل شده و نرخ جریان جرمی سیال در کویل های

کندانسور به کار می‌رود.

$$Q_c = \dot{m}_r (H_6 - H_3) = Q_{eva} + W_{comp} \quad (۲۱-۳)$$

انتقال حرارت جذب شده توسط هوا از معادله زیر تبعیت می‌کند.

$$Q_c = \dot{m}_a (c_{pa} + w_{di} c_{pv}) (t_{co} - t_{deho}) \quad (۲۲-۳)$$

در رابطه بالا Q_c حرارت منتقل شده در کندانسور است که برابر مجموع بار حرارتی در اواپراتور و

کار ورودی به کمپرسور است.

در این سیکل، لوله مویین به عنوان شیر فشار شکن به کار رفته و این فرآیند آنتالپی ثابت است.

۳-۴-۱-۶ معادلات مربوط به اواپراتور-کلکتور

مدل کلکتور- اواپراتور برای تخمین دمای اواپراتور به کار می‌رود. برای محاسبه این پارامتر باید

پارامترهای مهم مربوط به انرژی خورشیدی (متعاقبا در بخش‌های بعدی توضیح داده خواهد شد) و

داده‌های آب و هوایی مانند دمای هوا را در دسترس باشد. در کلکتور-اواپراتور معمولاً دمای هوا از

دمای مبرد بیشتر است. پارامتر جابه‌جایی کمپرسور که در معادله (۳-۱۹) بیان شده، جزء پارامترهای ورودی الگوریتم حل محسوب خواهد شد. انرژی جذب شده توسط مبرد معادل با تفاضل انرژی تشعشعی جذب شده و اتلافات حرارتی در کلکتور است که با معادله زیر بیان می‌شود. [۲۱]

$$\dot{m}_r(H_2 - H_6) = \frac{\eta_v VD}{v_{r2}}(H_2 - H_6) = F' A_c (S - U_l(T_2 - T_a)) \quad (۳-۲۳)$$

۳-۴-۱-۷ معادلات ضریب عملکرد

فرآیند خشک کردن و رطوبت زدایی با ضریب عملکرد^۱ توصیف و ارزیابی شده و نرخ جدایش (بخار شدن) رطوبت از ماده مورد نظر با پارامتر معادله شماره (۳-۲۴) بیان می‌شود. این پارامترها مطابق با معادلات زیر بیان به‌دست خواهند آمد.

$$SMER = \frac{m_{wd}}{W_{comp}} \quad (۳-۲۴)$$

$$COP = \frac{Q_c}{W_{comp}} \quad (۳-۲۵)$$

۳-۴-۲ معادلات به‌کار رفته دیگر در این سیستم

برای محاسبه رطوبت مطلق دمای ورودی از روابط زیر کمک می‌گیریم. [۳۳]

$$\ln(P_{sd}) = \frac{C_1}{t_{di}} + C_2 + C_3 t_{di} + C_4 t_{di}^2 + C_5 t_{di}^3 + C_6 t_{di}^4 + C_7 \ln(t_{di}) \quad (۳-۲۶)$$

این رابطه برای محاسبه فشار بخار اشباع در دمای حباب خشک ورودی به‌کار می‌رود. ضرایب این

معادله مطابق جدول زیر است. (در این معادله دما بر حسب درجه کلوین است)

^۱-coefficient of performance (COP)

2-Specific moisture evaporation rate (SMER)

جدول ۳-۲ ضرایب به کار رفته در محاسبه فشار بخار اشباع دمای ورودی خشک کن

C1=-5.6743E+3	C2=2.074E+00
C3=-9.677E+03	C4=6.221E-07
C5=2.0747E-09	C6=-9.48E-013
	C7=4.1635E+00

$$P_d = RH \times P_{sd} \quad (27-3)$$

در این رابطه P_d فشار جزئی بخار دمای حباب خشک است و RH رطوبت نسبی هوا است.

$$w_{di} = \frac{0.622P_d}{101.325 - P_d} \quad (28-3)$$

معادله بالا رطوبت مطلق در ورودی خشک کن را محاسبه می کند.

فشار اشباع بخار در دمای حباب تر و دمای اشباع مطابق با معادلات زیر به دست می آیند. [۴۲]

$$P_{sw} = \frac{P_{di}(1555.56 - 0.722t_w) + 101.325(t_{di} - t_w)}{1555.56 + t_{di} - 1.722t_w} \quad (29-3)$$

در معادله بالا t_w دمای حباب تر و P_{sw} فشار اشباع (در دمای حباب تر) در نظر گرفته شده است.

$$t_s = \frac{6687.848}{50.10987 - \ln(P_s) - 4.655564 \ln(t_s + 273.15)} - 273.15 \quad (30-3)$$

زیرنویس s مربوط به حال اشباع است. و دمای اشباع در این رابطه بر حسب درجه سانتیگراد

بدست خواهد آمد.

$$C_{hum} = 1.005 + 1.88w_{di} \quad (31-3)$$

در این رابطه C_{hum} ظرفیت حرارتی مخصوص هوا مرطوب است. برای محاسبه دبی جرمی هوای

در حال جریان در سیکل از رابطه زیر استفاده می کنیم.

$$\dot{m}_a = \frac{m_d h_{fg}}{c_{pam}(t_{di} - t_w)} \quad (32-3)$$

در معادله شماره (۳۲-۳) t_w دمای حباب تر در شرایط ورودی است.

$$w_{dehs} = \frac{w_{di} - BF w_{do}}{1 - BF} \quad (۳۳-۳)$$

در رابطه بالا w_{dehs} رطوبت مطلق سطح رطوبت زدا است. فشار جزئی بخار آب سطح رطوبت زدا بر اساس معادله (۳۴-۳) زیر بدست می آید.

$$P_{dehs} = w_{dehs} \times \frac{101.325}{0.622 + w_{dehs}} \quad (۳۴-۳)$$

برای محاسبه دمای خروجی رطوبت زدا از معادله (۳۵-۳) کمک گرفته می شود.

$$t_{deho} = t_{dehs} + BF(t_{do} - t_{dehs}) \quad (۳۵-۳)$$

$$t_{cs} = \frac{t_{di} - BF \times t_{deho}}{1 - BF} \quad (۳۶-۳)$$

در رابطه (۳۶-۳) دمای سطح کندانسور محاسبه خواهد شد.

$$T_5 = t_{cs} + 5 \quad (۳۷-۳)$$

در رابطه مذکور فرض ۵ درجه سانتیگراد اختلاف بین دمای مبرد در قسمت گرم و سطح کندانسور لحاظ شده است.

بعد از محاسبه دمای کندانسور، معادلات مربوط به حجم مخصوص، آنتالپی و فشار اشباع برای مبرد با معادلات زیر بیان می شود. در رابطه (۳۸-۳) T (بدون اندیس فقط در رابطه شماره (۳۸-۳) می تواند دمای اوپراتور یا کندانسور باشد. [۴۳]

$$P_s = \frac{\exp\left(a_1 + \frac{a_2}{T + a_3}\right)}{1000} \quad (۳۸-۳)$$

برای محاسبه دمای سوپرهیت مبرد در اوپراتور-کلکتور (با فرض ۵ درجه سانتیگراد اختلاف دما با حالت بخار اشباع و همان فشار) ابتدا باید آنتالپی مبرد در حالت بخار اشباع را طبق معادله زیر بیابیم.

$$H_1 = \frac{a_8 + a_9 T_2 + a_{10} T_2^2 + a_{11} T_2^3 + a_{12}}{1000} \quad (39-3)$$

حال می توان آنتالپی حالت واقعی مبرد را در خروجی اواپراتور رابدهست آورد. (بر حسب kJ/kg)
اگر اختلاف دما در این حالت را $\Delta T_{2-1} = 5^\circ C$ باشد داریم:

$$H_2 = H_1(1 + b_1 \Delta T_{2-1} + b_2 \Delta T_{2-1}^2 + b_3 \Delta T_{2-1} T_1 + b_4 \Delta T_{2-1}^2 T_1 + b_5 \Delta T_{2-1} T_1^2 + b_6 \Delta T_{2-1}^2 T_1^2) \quad (40-3)$$

که H_2 آنتالپی مبرد در حالت واقعی است. برای محاسبه حجم مخصوص مبرد ایده آل در خروجی اواپراتور از معادله (3-41) استفاده می شود.

$$v_{r1} = \exp\left(a_{13} + \frac{a_{14}}{T_1 + 273.15}\right) \times (a_{15} + a_{16} T_{re} + a_{17} T_{re}^2 + a_{18} T_{re}^3) \quad (41-3)$$

حال می توان رطوبت مخصوص حالت واقعی را محاسبه کرد.

$$v_{r2} = v_{r1}(1 + b_7 \Delta T_{2-1} + b_8 \Delta T_{2-1}^2 + b_9 \Delta T_{2-1} T_1 + b_{10} \Delta T_{2-1}^2 T_1 + b_{11} T_1^2 \Delta T_{2-1} + b_{12} T_1^2 \Delta T_{2-1}^2) \quad (42-3)$$

آنتالپی مبرد در کندانسور در حالت ایده آل مطابق معادله زیر به دست می آید.

$$H_5 = \frac{a_4 + a_5 T_{rc} + a_6 T_{rc}^2 + a_7 T_{rc}^3}{1000} \quad (43-3)$$

در حالت واقعی اگر اختلاف حجم مخصوص های دو نقطه 5 و 6 در شکل 3-2 Δv باشد، می توان از رابطه تقریبی زیر برای محاسبه آنتالپی واقعی استفاده کرد.

$$H_5 = H_4 - P_4 \Delta v \quad (44-3)$$

مقدار ضرایب معادلات از شماره (3-38) تا (3-43) را در جداول زیر آورده ایم.

جدول ۳-۳: ضرایب مربوطه برای محاسبه حجم مخصوص، آنتالپی مبرد در کندانسور و اوپراتور در حالت ایده‌آل

$a_1=21512$	$a_2=2201$	$a_3=246.61$
$a_4=2E+05$	$a_5=1335.29$	$a_6=1.706$
$a_7=7.67E-03$	$a_8=249455$	$a_9=606.163$
$a_{10}=-1.056$	$a_{11}=-1.824E-02$	$a_{12}=149048$
$a_{13}=-12.45$	$a_{14}=2669$	$a_{15}=1.013$
$a_{16}=1.067E-03$	$a_{17}=-9.25E-06$	$a_{18}=-3.2192E-07$

ضرایب بالا منحصر برای محاسبه خواص ترمودینامیکی مبرد R134 در حالت ایده‌آل در سیکل تبرید به کار خواهدرفت.

جدول ۴-۳ ضرایب مربوطه برای محاسبه حجم مخصوص و آنتالپی مبرد در خروجی اوپراتور در حالت واقعی

$b_1=3.48E-03$	$b_2=1.68E-06$	$b_3=9.26E-06$
$b_4=-7.69E-08$	$b_5=1.70E-07$	$b_6=1.21E-09$
$b_7=4.78E-03$	$b_8=-3.96E-06$	$b_9=2.58E-05$
$b_{10}=-1.85E-07$	$b_{11}=8.57E-07$	$b_{12}=-5.4E-09$

در جدول ۴-۳ ضرایب منحصر برای مبرد R134 قابل استفاده است.

۳-۴-۳ جمع بندی این بخش

در این بخش معادلات مربوط به عناصر اصلی پمپ حرارتی بیان شد. معادلات مربوط به مخلوط گازها سهم عمده‌ای در تبیین سیکل پمپ حرارتی دارند چرا که جدایش رطوبت از محفظه خشک‌کن مستلزم آگاهی کافی در روابط ترمودینامیکی مخلوط‌های هوا-بخار است. در این میان معادله (۳-۲۳) از اهمیت ویژه‌ای در کلیه معادلات مذکور برخوردار است چرا که بیانگر ارتباط بین انرژی خورشیدی جذب شده و پارامترهای کلکتور با دمای کندانسور و اوپراتور است. معادلات چندجمله‌ای و گاه غیر خطی برای تخمین خواص مبرد در نقاط مختلف سیکل بیان شده‌است.

۳-۵ محاسبه انرژی جذب شده خورشیدی بر واحد سطح در کلکتور تخت

۳-۵-۱ تغییرات انرژی تابشی در خلا

یکی از منابع تابشی انرژی، تشعشع ساعت شده از خورشید است. گزارشات متناقضی در منابع مختلف بر روی تغییرات زمانی-تناوبی تشعشع خورشید وجود دارد. فعالیت لکه‌های خورشیدی سبب می‌شود تغییرات کوچکی در تناوب زمانی رخ دهد. در اهداف مهندسی، با در نظر گرفتن اصل عدم قطعیت و تغییرات عبور پرتو از اتمسفر، انرژی ساعت شده از خورشید می‌تواند ثابت در نظر گرفته شود. تغییرات فاصله زمین از خورشید بر روی تشعشع خروجی خورشید تأثیرگذار است. براساس شماره روز سال مقدار تشعشع خروجی تغییر می‌کند. دو معادله (۳-۴۵) و (۳-۴۶) زیر برای محاسبه تشعشع حادث شده خلا در جهت عمود بر صفحه بیان می‌شود که معادله (۳-۴۶) از دقت بیشتری برخوردار است. مقدار n شماره روز از سال تعریف می‌شود. [۴۴]

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \quad (۳-۴۵)$$

در این رابطه G_{on} تشعشع حادث شده در خلا در جهت عمود بر صفحه است. مقدار $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ و ثابت تشعشع خورشید نامیده می‌شود.

$$G_{on} = G_{sc} (1.000110 + 0.034221 \cos(B) + 0.001280 \sin(B) + 0.000719 \cos(2B) + 0.000077 \sin(2B)) \quad (۳-۴۶)$$

B نیز از رابطه زیر محاسبه خواهد شد.

$$B = \frac{(n-1)360}{365} \quad (۳-۴۷)$$

۳-۵-۲ تعاریف و اصطلاحات

- تشعشع پرتویی^۱: نوعی از تشعشع خورشید که بدون پراکندگی در محیط جو به سطح می‌رسد. این نوع تشعشع همان تشعشع مستقیم است که برای سردرگم نشدن در اندیس‌های بین تشعشع پرتویی و پراکندگی از اندیس B استفاده می‌شود.
 - تشعشع پراکندگی یا پخشی^۲: نوعی از تشعشع است که با پراکندگی و پخش شدن پرتوها به سطح زمین (یا صفحه) می‌رسد. (در برخی از مراجع به عنوان تابش آسمان یا تابش خورشیدی آسمان تعریف می‌شود).
 - مجموع تشعشع^۳: مجموع تابش خورشیدی که جمع دو مقدار تشعشع مستقیم و تشعشع پراکنده در یک صفحه است. (اغلب این اندازه‌گیری‌ها در صفحه افقی صورت می‌پذیرد).
 - زمان خورشیدی^۴: زمان بر اساس حرکت زاویه‌ای ظاهری خورشید در میان آسمان در مرجع نیم روز خورشیدی (در این زمان به خصوص خورشید در نقطه اوج خود در نصف النهار قرار دارد).
- زمان خورشیدی در تمام روابط بین زوایای خورشید و ساعت مرجع کاربرد دارد، که با زمان عمومی (زمان تعریف شده عام) متفاوت است. لازم است که زمان استاندارد و زمان خورشیدی را بوسیله بکاربردن دو مدل تصحیح به هم تبدیل کرد. در وهله اول، یک رابط تصحیح ثابت برای تفاوت در طول جغرافیایی بین نصف النهار ناظر (طول) و نصف النهار که زمان استاندارد محلی مقرر شده به کار گرفته خواهد شد.^۱ خورشید ۴ دقیقه طول می‌کشد تا به عرض 1° برسد. دومین رابط تصحیح مربوط به اغتشاشات ناشی از نرخ چرخش زمین است که در زمان عبور خورشید از نصف النهار از دید

¹ -beam radiation

² -diffuse radiation

³ -total radiation

⁴ -solar time

ناظر تاثیرگذار است. تفاوت میان زمان خورشیدی و زمان استاندارد از رابطه زیر به دست می آید.

$$\text{زمان خورشیدی} - \text{زمان استاندارد} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E$$

که L_{st} نصف النهار استاندارد برای زمان محلی است، L_{loc} مکان طول جغرافیایی است و زوایای طولی در مرجع غربی محسوب می شود، که در بازه $0^\circ < L < 360^\circ$ قرار دارد. پارامتر E معادله زمان (بر حسب دقیقه) که از رابطه زیر قابل حصول است.

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B) \quad (3-48)$$

که B از رابطه (3-47) به دست می آید و n روز مشخصی در سال است (سال کبیسه لحاظ نخواهد شد از این رو $1 \leq n \leq 365$)

معادله زمان و تغییر مکان از نصف النهار استاندارد هر دو بر حسب دقیقه هستند و در آن 60 دقیقه تفاوت بین زمان استاندارد و زمان طلوع خورشید است. زمان معمولاً بر حسب دقیقه و ساعت است. در کاربرد از اصلاحات توجه داشته باشید که مجموع آنها بیشتر از 60 دقیقه هم می تواند باشد. در این پایان نامه زمان فرضی نشان دهنده زمان خورشیدی است مگر اینکه در همان موضوع خلاف آن ذکر شود.

۳-۵-۳ راستا و جهت تشعشع از نوع تابش مستقیم

روابط هندسی بین یک صفحه از هر جهت دلخواه نسبت به زمین در هر زمان مشخص (صفحه چه ثابت و چه متحرک نسبت به زمین باشد) و تشعشع خورشیدی مستقیم، که موقعیت نسبی خورشید به آن صفحه است می تواند با تعریف چند زاویه کاملاً معلوم و مشخص شود. بعضی از زوایا در (شکل 3-4) نشان داده شده اند. زوایا و تعاریف آن عبارت اند از:

• ϕ^1 : عرض جغرافیایی، مکان زاویه ای شمال یا جنوب نسبت به خط استوا، برای

¹ -latitude angle

- مکانهای شمالی نسبت به استوا مثبت است؛ $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.
- δ^1 : زاویه انحراف، موقعیت زاویه ای خورشید نسبت به مرجع خورشید (نیم روز). بازه این زاویه بین $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$ قرار دارد.
 - β^2 : زاویه شیب، زاویه بین صفحه کلکتور نسبت به سطح افق $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$) اگر زاویه شیب بیشتر از 90° درجه باشد، به این معنی است که صفحه رو به پایین چرخیده است)
 - γ^3 : زاویه سمت سطح، انحراف از تصویر صفحه افقی به سطح نرمال در مکان نصف النهار محلی، این زاویه در نیمکره سمت راست زمین مثبت و در نیمکره سمت چپ زمین منفی است. بازه این زاویه $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ است.
 - ω^4 : زاویه ساعت، جابجایی زاویه ای خورشیدی شرق یا غرب از خط نصف النهار محلی با توجه به چرخش زمین که برای هر ساعت، 15° درجه است؛ برای قبل از زمان اوج خورشید (ساعت ۱۲ ظهر) منفی و و برای بعد از زمان اوج خورشید مثبت است.
 - θ^5 : زاویه وقوع تابش، زاویه بین تابش مستقیم بر روی یک سطح با خط عمود بر آن
- زوایای اضافی که بیانگر موقعیت خورشید در آسمان است مطابق زیر تعریف می شود:
- θ_z^6 : زاویه اوج، زاویه بین خط عمودی و خط متصل به خورشید، که زاویه برخورد شعاع پرتو تابش بر روی سطح افقی است.
 - α_s^7 : زاویه ارتفاع خورشید، زاویه بین خط افقی و خط متصل به خورشید که مکمل زاویه اوج است.

¹ -Declination angle

² - slope angle

³ -surface azimuth angle

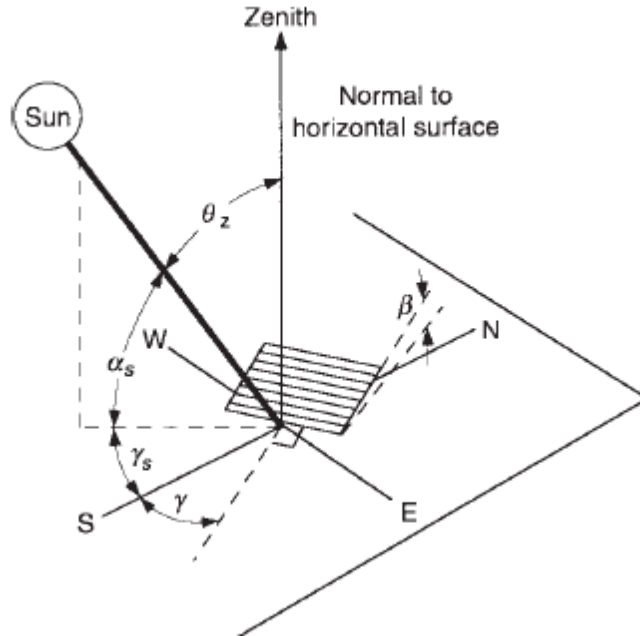
⁴ -hour angle

⁵ -angle of incidence

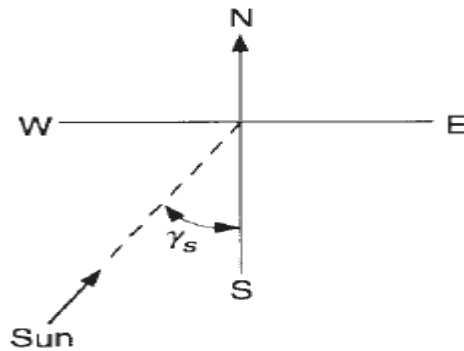
⁶ -zenith angle

⁷ -solar altitude angle

- γ_s^1 : زاویه سمتی خورشیدی، زاویه جابجایی از سمت جنوب بر روی تصویر تشعشع مستقیم در صفحه افقی طرح پرتو تابش روی سطح افقی نشان داده شده



شکل ۳-۴: زاویه اوج، زاویه شیب کلکتور، زاویه سمتی خورشیدی، زاویه سمتی سطح برای یک سطح شیبدار



شکل ۳-۵: صفحه ای که در آن زاویه سمتی خورشیدی نمایان است.

زاویه انحراف δ از رابطه زیر بدست می آید.

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (3-49)$$

¹ - solar azimuth angle

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right)(0.006918 - 0.399912 \cos B + 0.070257 \sin B - 0.006758 \cos 2B + 0.000907 \sin 2B - 0.002697 \cos 3B + 0.00148 \sin 3B) \quad (50-3)$$

مقدار B از معادله شماره (3-47) بدست می‌آید. عدد n می‌تواند غیر صحیح انتخاب شود، اما در محاسبات مهندسی این عدد صحیح انتخاب شده همچنین حداکثر زاویه انحراف در طول ۲۴ ساعت مقدار 0.4° است.

زاویه حادث شده در تشعشع مستقیم بر اساس رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\cos \theta = \sin \theta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (51-3)$$

برای بدست آوردن زاویه حادث در تشعشع مستقیم باید روز مورد نظر در سال، زاویه عرض جغرافیایی (مکان مورد نظر)، ساعت مورد نظر، زاویه سمت سطح، زاویه شیب کلکتور را داشته باشیم.

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_z - \gamma) \quad (52-3)$$

زاویه θ ممکن است از 90° تجاوز کند که به معنی آن است که خورشید پشت سطح قرار گرفته است. همچنین، به هنگام استفاده از معادله (3-52) لازم است که مطمئن شوید زمین خورشید را مسدود نکرده است (زاویه ساعت بین طلوع و غروب خورشید باشد). زاویه طلوع خورشید نیز بر اساس رابطه زیر بدست می‌آید. (در این زمان $\theta_z = 90^\circ$)

$$\cos(\omega_s) = -\tan(\phi) \tan(\delta) \quad (53-3)$$

در صفحات افقی، زاویه تشعشع ورودی در زمانی که خورشید در نقطه اوج خود قرار دارد زاویه θ_z تعریف می‌شود که مقدار آن بین 0 تا 90 درجه تغییر می‌کند. در این حالت زاویه $\beta = 0$ است و زاویه اوج مطابق با معادله زیر بدست می‌آید.

$$\cos(\theta_z) = \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\delta) \quad (54-3)$$

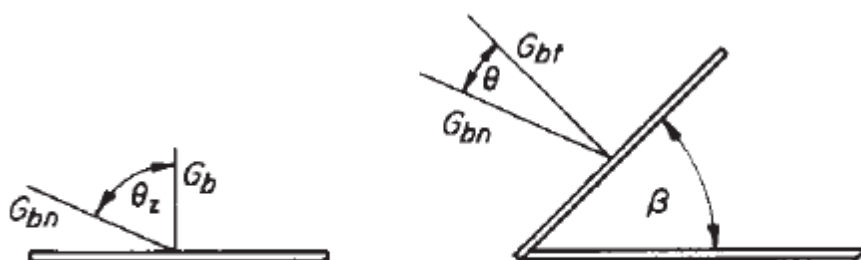
۳-۵-۴ نسبت تشعشع مستقیم در صفحات شیبدار در مقابل به

صفحات افقی^۱

برای اهداف طراحی فرآیندهای خورشیدی و محاسبات عملکرد، که اغلب محاسبه تشعشع در یک ساعت خاص بر روی یک صفحه شیبدار در کلکتور است به کمک تخمین تابش نور خورشید بر روی سطح افقی انجام خواهد شد. اغلب داده های در دسترس تشعشع کلی برای ساعت ها یا روزهای متفاوت سال روی سطح افقی هستند، در حالی که برای محاسبه تشعشع مستقیم و پراکندگی^۲ روی یک صفحه از کلکتور مورد نیاز است.

پارامتر هندسی R_b ، نسبت تشعشع مستقیم روی سطح شیبدار در مقابل تابش (تشعشع) یک سطح افقی برای یک زمان خاص تعریف شده و در (شکل ۳-۶) زاویه برخورد تابش پرتو روی سطح افقی و مورب را نشان می دهد.

$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G_{b,n} \cos \theta}{G_{b,n} \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (۵۵-۳)$$



شکل ۳-۶ تشعشع مستقیم در صفحه افقی یا سطح شیبدار

در رابطه شماره (۵۵-۳)، مقادیر $\cos(\theta)$ و $\cos(\theta_z)$ از معادلات شماره (۵۱-۳) و (۵۴-۳) بدست می آید. زاویه سمتی γ بهینه برای کلکتورهای تخت در نیمکره شمالی معمولاً صفر درجه و در نیمکره جنوبی ۱۸۰ درجه در نظر گرفته می شود. بنابراین یک فرض متداول در محاسبات مهندسی صفر در نظر گرفتن زاویه سمتی γ (در نیمکره شمالی و ۱۸۰ درجه در نیمکره جنوبی است). بنابراین شکل

^۱ -Beam radiation factor or direct radiation factor

^۲ -Diffuse

معادله (۵۵-۳) برای نیمکره شمالی

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos\delta \cos\omega + \sin(\phi - \beta) \sin\delta}{\cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta} \quad (۵۶-۳)$$

و برای نیمکره جنوبی

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos\delta \cos\omega + \sin(\phi + \beta) \sin\delta}{\cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta} \quad (۵۷-۳)$$

در قسمت‌های بعد، محاسبات عملکرد فرآیند‌های خورشیدی اغلب بر اساس ساعات روز انجام خواهد شد. $\cos\theta_z$ برای نقاط میانی بین دو ساعت متوالی در طول روز در نظر گرفته شده و مقادیر محاسبه شده در تخمین پارامتر R_b از آنها در این ساعات به کار می‌روند.

ذکر این نکته خالی از لطف نیست این روش برای بیشتر ساعات‌های روز رضایت بخش است، اما در ساعات‌هایی مثل طلوع و غروب آفتاب، مقادیر غیرمعمولی برای R_b به دست می‌آید. جذب انرژی خورشیدی در این ساعات بیشتر مواقع صفر یا یک مقدار ناچیز است. با این حال در نظر داشته باشید که مقادیر غیر واقعی و نامعقول برای R_b محاسبه مقدار تشعشع مستقیم به کار گرفته نمی‌شود.

۳-۵-۵ تشعشع بر روی سطوح افقی در خلأ

انواع گوناگونی از تشعشع با استفاده از راستای عمود تابش به راحتی محاسبه می‌شوند، نرخ تشعشع بر روی سطح به صورت تئوری به دست آمده و البته به یک روش محاسباتی برای تشعشع در هر زمان نیاز است، تشعشع خورشیدی حادث شده عمود به صفحه‌ای افقی در خلا طبق معادله زیر به دست می‌آید.

$$G_0 = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \cos(\theta_z) \quad (۵۸-۳)$$

که G_{sc} ثابت و n شماره روز از سال است. اگر به جای $\cos(\theta_z)$ مقدار معادلش را از معادله (۵۴-۳) جایگزین کنیم مقدار G_0 برای صفحه افقی در هر زمان بین طلوع آفتاب تا غروب خورشید مطابق با

معادله (۵۹-۳) بدست خواهد آمد.

$$G_0 = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta) \quad (۵۹-۳)$$

تشعشع خورشیدی روزانه (در حالت کلی)، از تابش خورشیدی در خلا بر روی صفحه اصلی به دست می‌آید. از انتگرال گیری مقادیر معادله بالا از طلوع خورشید تا غروب خورشید مقدار تشعشع خورشیدی از معادله زیر قابل حصول است که واحد G_0 وات بر مترمربع و واحد H_0 ژول بر متر مربع (برای هر روز) است.

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times \left(\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \frac{\pi\omega_s}{180} \sin\phi \sin\delta \right) \quad (۶۰-۳)$$

مقدار ω_s زاویه ساعت طلوع خورشید بر حسب درجه معمولا محاسبه شده و برای برآوردهای مهندسی بدست آوردن مقدار تشعشع روزانه (با استفاده از داده‌های ماهیانه) مناسب است. برای زوایای عرضی در محدود -۶۰ تا $+۶۰$ درجه معادله بالا به کار رفته همچنین می‌توان تشعشع مجموع در خلا برای یک ساعت خاص در روز بدست آورد. برای این منظور از معادله (۵۹-۳) از مقدار زاویه ساعت ω_1 تا زاویه ساعت ω_2 انتگرال گیری کرد. (مقدار قدر مطلق ω_2 بزرگ‌تر است.) در معادله زیر تشعشع در ساعت میانی (میانگین دو زاویه ساعت متوالی) تخمین زده می‌شود.

$$I_0 = \frac{12 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times \left(\cos\phi \cos\delta \sin(\omega_2 - \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin\phi \sin\delta \right) \quad (۶۱-۳)$$

۳-۵-۶ سهم تشعشع پراکندگی و مستقیم در تابش روزانه

در این بخش روشی برای تخمین درصد تشعشع مستقیم و تشعشع پراکندگی ارائه می‌دهیم. روش اول محاسبه تشعشع کل در تمامی جهات بر اساس داده‌های موجود در صفحه افقی است منوط بر

اینکه رفتار مجزای تشعشع مستقیم و پراکندگی را بدانیم. روش دوم بررسی عملکرد بلند مدت کلکتورها بر اساس داده‌های موجود تابش مستقیم است. در عین حال باید با استفاده از داده‌های موجود تغییرات پارامترهای مهم و اساسی را بیابیم. روش متداول تعیین نسبت $\frac{I_d}{I}$ است. همچنین پارامتر دیگری تحت عنوان K_T تحت عنوان شاخص روشنی ساعت تعریف می‌شود. این پارامتر در واقع نسبت تشعشع در صفحه افقی به تشعشع در خلأ است.

$$K_T = \frac{H}{H_0} = \frac{I}{I_0} \quad (۶۲-۳)$$

برای مثال اگر در یک روز خاص هوا صاف و در ساعت دیگر هوا به شدت ابری باشد سهم تشعشع پخشی کم خواهد بود. در صورتی که $K_T = 0.5$ باشد لایه ای نازک از ابر آسمان را پوشانده است. معادله زیر برای بیان نسبت $\frac{I_d}{I}$ به صورت زیر نوشته می‌شود. مقدار تشعشع مستقیم I_b تفاضل تشعشع کل از تشعشع قسمت پراکندگی است.

$$1.0 - 0.09K_T$$

$$K_T \leq 0.22$$

$$0.9511 - 0.1604K_T + 4.388K_T^2 - 16.138K_T^3 + 12.336K_T^4$$

$$0.22 < K_T < 0.8$$

(۶۳-۳)

$$0.165$$

$$K_T > 0.8$$

۳-۵-۷ تخمین تشعشع در هر ساعت بر اساس داده‌های روزانه

زمانی که نیاز به بررسی عملکرد در هر ساعت باشد، باید از داده‌های روزانه استفاده شود تا پارامترهای مربوط به یک ساعت مشخص را قابل بررسی باشد. البته این مدل دقیق نیست. مقادیر تابش روزانه بین مقادیر تشعشع کل در روزهای صاف و روزهای کاملاً ابری است. اگر فرضاً چند روز متوالی هوا صاف باشد یا هوا شدیداً ابری باشد این مدل پاسخگو نخواهد بود. البته راهی برای لحاظ کردن اینگونه شرایط وجود نداشته و این تقریب در روزهای صاف نتایج دقیق تری ارائه داده و برای بیان عملکردهای

بلند مدت مناسب بوده و بر این اساس تشعشع یک ساعت مشخص از تابش یک روز کامل تابعی از زاویه ساعت طلوع خورشید و زاویه ساعت مورد نظر است. البته زاویه ساعت نیز میانگین دو زاویه پشت سرهم در نظر گرفته می‌شود.

$$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\bar{I}}{\bar{H}} \quad (64-3)$$

پارامتر r_t نسبت تشعشع ساعت به ساعت در مقابل تشعشع روزانه است و در این معادلات از میانگین مجموع تشعشع در یک روز کامل (\bar{H}) در صفحه افقی استفاده خواهد شد و متعاقباً تشعشع لحظه ای \bar{I} را محاسبه و در معادلات بعدی لحاظ می‌کنیم.

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (65-3)$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60)$$

می‌توانیم همین تحلیل را برای تشعشع پراکندگی برای یک ساعت خاص نسبت به مجموع تابش در یک روز بدست آورد.

$$r_d = \frac{I_d}{H_d}$$

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (66-3)$$

۳-۵-۸ تشعشع بر روی یک سطح شیبدار: مدل ایزوتروپیک^۱ آسمان

می‌توان ترکیب تشعشع پراکندگی و انعکاس زمین را ایزوتروپیک فرض کرد. همچنین دو جزء ذکر

^۱ -isotropic sky

شده مستقل از جهت در نظر گرفته می‌شوند. می‌توان از اثرات تشعشع پراکندگی و بازتاب زمین صرف‌نظر کرد اما بهتر است مجموع این دو جزء در تابش در نظر گرفته شود. سهم اصلی تشعشع، تابش مستقیم است که مقدار آن I_{BRB} است. اگر سطح شیبدار در زاویه β قرار داشته باشد، فاکتور دید قسمت پراکندگی در محاسبه شدت تشعشع مقدار $\frac{1+\cos(\beta)}{2}$ خواهد بود. برای قسمت انعکاس زمین، اگر ضریب بازتابش را ρ_g فرض کنیم، مقدار فاکتور دید $\frac{1-\cos(\beta)}{2}$ و کل تشعشع بازتاب شده از زمین مقدار $I\rho_g \frac{1-\cos(\beta)}{2}$ خواهد بود. بنابراین برای یک سطح شیبدار در یک ساعت مشخص مقدار مجموع تشعشع خورشیدی از معادله زیر بدست می‌آید که مجموع سه ترم تشعشع مستقیم، بازتابش از زمین و تشعشع پراکندگی می‌شود.

$$I_T = I_{BRB} + \frac{I_d(1 + \cos(\beta))}{2} + \frac{I\rho_g(1 - \cos(\beta))}{2} \quad (۶۷-۳)$$

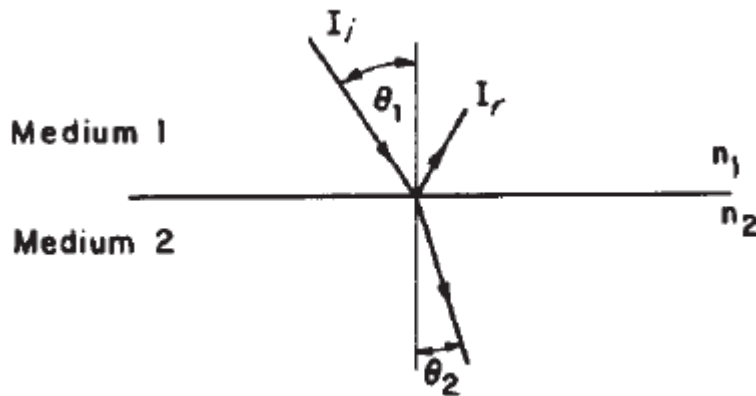
۳-۵-۹ عبور تشعشع از میان پوشش (شیشه) و جذب انرژی

عبور، انعکاس و جذب انرژی خورشیدی در وجوه گوناگون کلکتور تخت بسیار بااهمیت هستند که در نهایت موجب به تخمین بازدهی کلکتور می‌شوند. ضریب عبور، انعکاس، و جذب تابعی از تشعشع ورودی، ضخامت، ضریب شکست و ضریب خاموشی ماده (پوشش) هستند. ضریب شکست و ضریب خاموشی نیز تابعی از طول موج تابش می‌توانند باشند، اما در این تحقیق تمامی مقادیر اولیه مستقل از طول موج تابش فرض خواهند شد. برای شیشه عدم وابستگی به طول موج بسیار ایده‌آل و منطقی است گرچه بسیاری دیگر از خواص نوری مواد پوشش دهنده وابسته به طول موج و خواص طیفی می‌باشد.

۳-۵-۱۰ انعکاس و عبور تشعشع

شکل زیر شکل زیر بیانگر نحوه تابش و بازتابش در دو محیط متفاوت و زوایای برخورد متفاوت است. برای سطح تخت رابطه‌ای برای تابش نامتقارن از جسم ۱ به جسم ۲ با دو شاخص n_1 و n_2

داریم



شکل ۳-۷: زوایای تابش و بازتابش در دو محیط با ضرایب شکست گوناگون

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (۶۸-۳)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (۶۹-۳)$$

$$r = \frac{I_r}{I_i} = \frac{r_{\perp} + r_{\parallel}}{2} \quad (۷۰-۳)$$

که θ_1 و θ_2 زوایای ساخته شده با خط عمود بر سطح هستند. معادله (۶۸-۳) نشان دهنده جزء عمودی تشعشع مستقیم نامتقارن و معادله (۶۹-۳) نشان دهنده جزء موازی تشعشع نامتقارن است. معادله (۷۰-۳) بیانگر این است انعکاس نامتقارن تشعشع که میانگین دو جزء عمودی و افقی است. اگر زاویه θ_1 و θ_2 زاویه شکست با خط عمود باشند داریم

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \quad (۷۱-۳)$$

اگر زوایای برخورد و شکست مشخص باشند از معادله (۶۸-۳) تا (۷۱-۳) برای بدست آوردن بازتابش یک صفحه استفاده می کنیم. برای تشعشع عمود بر صفحه (زوایای برخورد هر دو صفر

هستند) داریم

$$r(0) = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (72-3)$$

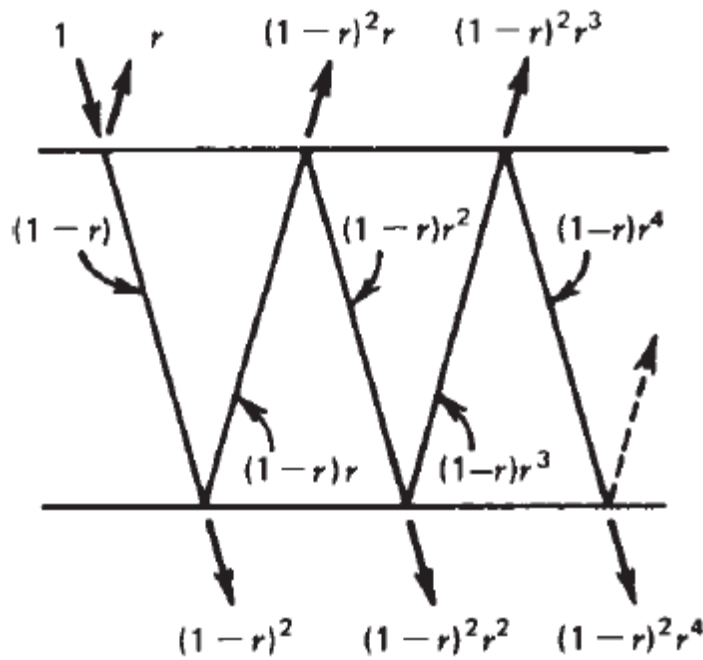
اگر یک سمت از سطح مشترک هوا باشد داریم.

$$r(0) = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \quad (73-3)$$

در کاربردهای انرژی خورشیدی، عبور تشعشع میان یک بخش یا فیلم از ماده رخ می‌دهد. اگر دو وجه مشترک و تعداد محیطها افزایش یابد بازگشت تشعشع سخت‌تر می‌شود. اگر زاویه برخورد صفر نباشد، اشعه بازگشتی در وجه مشترک برای هر جزء متفاوت است. بنابراین ضریب عبور و انعکاس متفاوت خواهد شد.

در شکل ۸-۳ از جذب تشعشع توسط پوشش صرفنظر می‌کنیم. اگر فرض کنیم تنها جزء عمودی از تشعشع ورودی در یک لحظه در وجه اول وارد شود، مقدار $1 - r_{\perp}$ از پرتو مستقیم به وجه دوم می‌رسد. در وجه دوم مقدار $(1 - r_{\perp})^2$ عبور کرده و $r_{\perp}(1 - r_{\perp})$ به وجه اول بازتابیده می‌شود. اگر همه ترمهای ضریب عبور را جمع کنیم داریم:

$$\tau_{\perp} = (1 - r_{\perp})^2 \sum_{n=0}^{\infty} r_{\perp}^{2n} = \frac{(1 - r_{\perp})^2}{1 - r_{\perp}^2} = \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \quad (74-3)$$



شکل ۳-۸ عبور از پوشش بدون در نظر گرفتن ضریب جذب برای آن نتایجی مشابه برای جزء موازی در نظر گرفته می‌شود و ضریب عبور نامتقارن، میانگین دو جزء ضریب عبور موازی و عمودی است.

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \right) \quad (75-3)$$

برای سیستمی که N پوشش داشته باشد تحلیل مشابه آنچه گفته شد و می‌توان رابطه زیر را بدست آورد.

$$\tau_{rN} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - r_{\parallel}}{1 + (2N - 1)r_{\parallel}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + (2N - 1)r_{\perp}} \right) \quad (76-3)$$

۳-۵-۱۱ محاسبه ضریب جذب و عبور پوشش

جذب تشعشع در یک جزء شفاف با قانون بوگر^۱ بیان می‌شود. بر این اساس فرض می‌شود تشعشع جذبی متناسب با شدت تشعشع محلی در راستای تشعشع است. بر طبق این قانون معادله زیر را

^۱ -Bouguer

داریم:

$$dI = -IKdx \quad (۷۷-۳)$$

ضریب K مقداری ثابت است. این مقدار برای یک طیف وسیع امواج ثابت است. اگر از معادله دیفرانسیل در راستای انتگرال گیری کنیم

$$\tau_a = \frac{I_{transmitted}}{I_{incident}} = \exp\left(-\frac{KL}{\cos\theta_2}\right) \quad (۷۸-۳)$$

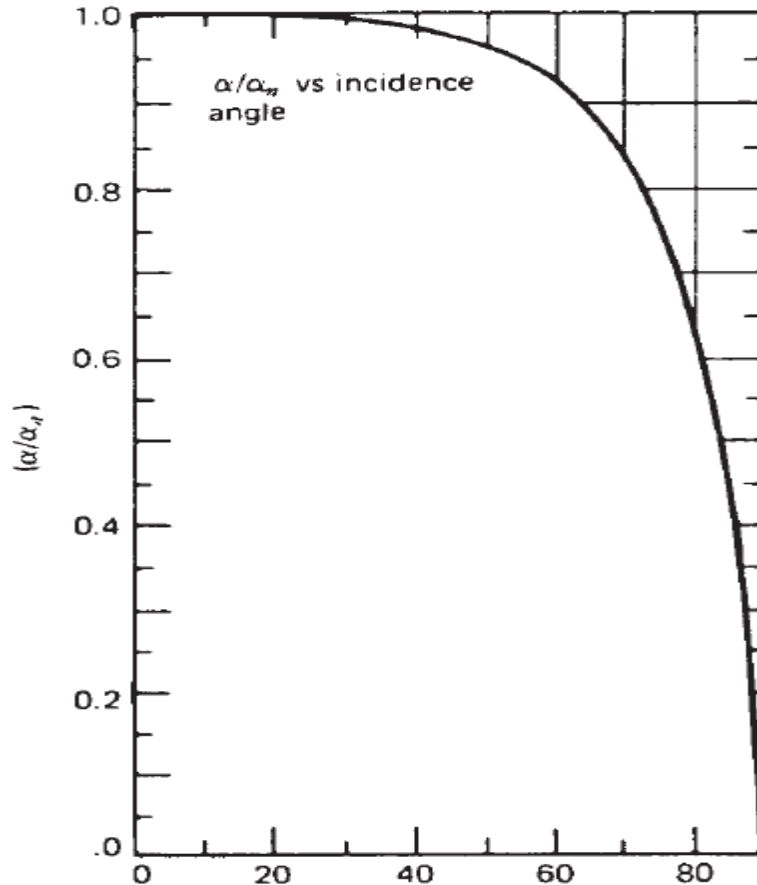
اندیس a نشان دهنده این است که تشعشع جذبی تلف شده لحاظ شده است. مقدار K برای شیشه سفید حداقل $4 m^{-1}$ و برای اکسید آهن $32 m^{-1}$ (حداکثر مقدار K است) در نظر گرفته می شود. در نهایت برای یک پوشش می توان تقریب زیر را به کار برد.

$$\tau \cong \tau_a \tau_r \quad (۷۹-۳)$$

۳-۵-۱۲ نسبت ضریب جذب به ضریب جذب نرمال ر صفحه بر اساس تابعی از زاویه حادث شده در تشعشع مستقیم

در اغلب صفحات جذب صفحه بر اساس تابعی از زاویه برخورد موجود نیست. ضریب جذب جهتی تشعشع برای اجسام سیاه تابعی از زاویه ورودی به صفحه است. بعضی سطوح مشابه اجسام سیاه عمل می کنند. برای این سطوح منتخب چند جمله زیر بر اساس تعریف ضریب جذب نرمال تعریف می شود. همچنین شکل ۳-۹ نسبت ضریب جذب به ضریب جذب نرمال نسبت به زاویه حادث شده را نشان می دهد.

$$\frac{\alpha}{\alpha_n} = 1 - 1.5879 \times 10^{-3}\theta + 2.7314 \times 10^{-4}\theta^2 - 2.3026 \times 10^{-5}\theta^3 + 9.0244 \times 10^{-7}\theta^4 - 1.8000 \times 10^{-8}\theta^5 + 1.7734 \times 10^{-10}\theta^6 - 6.9937 \times 10^{-13}\theta^7 \quad (۸۰-۳)$$



شکل ۳-۹: نسبت جذب تشعشع به جذب تشعشع نرمال برای یک جسم سیاه در نهایت می‌توان تقریب زیر را در محاسبات مربوطه لحاظ کرد.

$$(\tau\alpha) \cong 1.01\tau\alpha \quad (۸۱-۳)$$

۳-۵-۱۳ محاسبه زوایای برخورد مؤثر در تشعشع پراکندگی و بازتابش

زمین

قبل از بررسی برای تحلیل عبور تابش مستقیم به سطح، زوایای عبور تابش پراکندگی و بازتابش انعکاس از زمین را بررسی می‌کنیم. مقدار تشعشع عبوری از یک پوشش با جمع کردن تابش عبوری از تمام زوایا بدست می‌آید. چگونگی بررسی این زوایا و پراکندگی آنها شناخته شده نیست. برای تشعشع همگن (مستقل از زاویه) می‌توان انتگرال گیری کرد. ضریب عبور پراکندگی را می‌شود با تعریف زاویه معادل محاسبه کرد. برای یک گستره وسیع در کلکتورهای تخت این زاویه معادل با 60° است.

تابش پراکندگی در صفحه افقی از تشعشع کل کمتر است. تابش پراکندگی و بازتابش تشعشع از زمین ایزوتروپیک فرض می‌شوند. دو رابطه زیر زوایای مؤثر بر قسمت‌های بازتابی از زمین و پراکندگی را نشان می‌دهند. همچنین یک تقریب منطقی و معمول برای محاسبه ضریب عبور پوشش و ضریب جذب صفحه وجود دارد بر طبق این فرضیه

$$\theta_{e,g} = 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2 \quad (۸۲-۳)$$

در این معادله $\theta_{e,g}$ زاویه مؤثر برخورد برای قسمت انعکاس زمین است.

$$\theta_{e,d} = 59.7 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2 \quad (۸۳-۳)$$

در رابطه شماره (۸۳-۳) $\theta_{e,d}$ زاویه برخورد مؤثر برای قسمت پراکندگی است.

۳-۵-۱۴ محاسبه تشعشع جذب شده توسط کلکتور

پیش بینی کارایی کلکتور به انرژی جذب شده در کلکتور بستگی دارد. انرژی تشعشعی در بخش قبل محاسبه شد اما قسمتی از این انرژی توسط کلکتور جذب می‌شود. این مقدار در سه بخش مستقیم، انتشاری، و انعکاس زمین تقسیم می‌شود. مدل همگن برای ساعت‌های مختلف در این بخش به کار می‌رود. نهایتاً معادله زیر برای بیان تشعشع جذب شده به کار می‌رود.

$$S = I_b R_b (\tau\alpha)_b + I_d (\tau\alpha)_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \rho_g I (\tau\alpha)_g \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \quad (۸۴-۳)$$

در این رابطه مقادیر $(\tau\alpha)$ برای هر یک از قسمت‌های مستقیم، پراکندگی و بازتابش از زمین با توجه به زوایای مؤثر که در بخش‌های قبل بیان شده است محاسبه می‌شود. مقدار ضریب عبور نیر با توجه با زاویه برخورد هر قسمت محاسبه می‌شود (τ_r). یکی دیگر از پارامترهای مهم که در آنالیز انرژی خورشیدی به کار می‌رود، کارایی کلی کلکتور است که نرخ انرژی مفید بدست آمده بر کل انرژی فرود آمده بر سطح کلکتور است که مطابق با معادله زیر بدست خواهد آمد.

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T A_c} \quad (۸۵-۳)$$

۳-۵-۱۵ روابط مربوطه برای محاسبه ضریب هدررفتگی و فاکتور کارآیی کلکتور

رابطه تجربی برای محاسبه ضریب هدر رفتگی کلی وجود دارد که در این پایان‌نامه از آن استفاده خواهد شد.

$$U_t = \left(\frac{N}{\left(\frac{T_{pm} - T_a}{N + f} \right)^e \left(\frac{C}{T_{pm}} \right)} + \frac{1}{h_w} \right)^{-1} \quad (۸۶-۳)$$

$$+ \frac{(\sigma(T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2))}{\frac{1}{\epsilon_p + 0.00591Nh_w} + \frac{2N + f - 1 + 0.1334\epsilon_p}{\epsilon_g} - N}$$

در این رابطه ϵ_g ضریب صدور پوشش، ϵ_p ضریب صدور صفحه، N تعداد پوشش‌ها (معمولا یک در نظر گرفته می‌شود)، h_w ضریب جابه‌جایی انتقال حرارت باد، T_a دمای هوای پیرامون، T_{pm} دمای میانگین صفحه است. همچنین دو پارامتر f و C بر اساس معادلات زیر بیان می‌شود.

$$f = (1 + 0.089h_w - 0.1166h_w\epsilon_p)(1 + 0.07866N) \quad (۸۷-۳)$$

$$C = 520(1 - 0.000051\beta^2) \quad (۸۸-۳)$$

که β زاویه شیب کلکتور است.

برای بدست آوردن فاکتور کارآیی کلکتور رابطه زیر نوشته می‌شود.

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[\frac{1}{U_L[D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi Dh_{fi}} \right]} \quad (۸۹-۳)$$

در این معادله D قطر داخلی تیوب، W فاصله بین دو تیوب، U_L ضریب هدررفتگی کلی، C_b ضریب

هدایت اتصال و پارامتر F طبق دو معادله زیر تعریف می‌شود.

$$m = \sqrt{\frac{U_t}{k\delta}} \quad (90-3)$$

که δ ضخامت و k ضریب هدایت حرارتی صفحه است.

$$F = \frac{\tanh\left(\frac{m(w-D)}{2}\right)}{\frac{m(w-D)}{2}} \quad (91-3)$$

ارزیابی فاکتور F' دشوار نخواهد بود چرا که این پارامتر تابعی از U_t و h_{fi} است که هرکدام از آنها تابع دما است ولی وابستگی این دو پارامتر به دما آنچنان زیاد نیست رسانایی رابط نیز عددی بسیار بزرگ میتواند در نظر گرفته شود. در این حالت $\frac{1}{c_b} = 0$ است. پارامتر مهم دیگر $k\delta$ است که ضریب هدایت حرارتی در ضخامت ورقه است. برای یک صفحه مس با یک میلیمتر ضخامت $k\delta = 0.4 \frac{w}{mc}$ است، برای استیل با ۰.۱ میلیمتر این مقدار ۰.۰۰۵ است. ضریب انتقال حرارت جابه جایی درون تیوب سه مقدار ۳۰۰ و ۱۰۰ و ۱۰۰۰ در یک مدل جریان توربولانس در نظر گرفته می‌شود. افزایش h_{fi} مطابق انتظار سبب افزایش F' می‌شود. همچنین فاکتور کارایی کلکتور با افزایش مرکز به مرکز تیوب‌ها، کاهش و با افزایش ضریب هدایتی و ضخامت ماده افزایش می‌یابد.

۳-۵-۱۶ جمع بندی این بخش:

در بخش مذکور ابتدا زوایای مؤثر بر انرژی تابشی معرف و مفهوم زمان خورشیدی تا حدودی توضیح داده شد. فاکتور نسبت تشعشع مستقیم نیز تعریف و معادلات آن بیان شد. تشعشع وارد بر شده بر کلکتور از سه نوع متفاوت تشکیل و معادلات حاکم بر آن تشریح شد. خواص نوری مربوط به پوشش و جذب صفحه (در هر سه نوع تشعشع که مستقل از طول موج هستند) و تاثیرگذاری آنها نیز بیان شد. در نهایت با استفاده از مدل ایزوتروپیک آسمان و استفاده از معادله (۳-۸۴) تشعشع جذب شده تخمین زده شد. در نهایت پارامترهایی چون ضریب اتلاف و فاکتور کارایی کلکتور بیان و

فرضیات ارائه شده تبیین شد.

۳-۶ الگوریتم حل مساله

برای بهینه کردن ضریب عملکرد COP و نرخ رطوبت‌زدایی SMER در گام اول دمای مبرد کندانسور را برآورد کرده، در مرحله بعد شدت تشعشع جذب شده را از قسمت مربوطه محاسبه و با جایگذاری در رابطه (۳-۲۳) دمای اواپراتور در نهایت ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت قابل محاسبه است. بنابراین این بخش به سه زیر بخش تقسیم خواهد شد.

۳-۶-۱ محاسبه دمای کندانسور با توجه به مدل خشک‌کن و پمپ

حرارتی

در ابتدا فرضیات مربوط به داده‌های ورودی بیان می‌شود.

- دمای هوای خشک کردن و رطوبت نسبی هوا
 - مقدار ماده مد نظر برای خشک کردن در محفظه
 - محتوای رطوبت ماده در حال اولیه و نهایی
 - مجموع زمان خشک کردن
 - فرض اختلاف دمای ۵ درجه سانتیگراد بین مبرد و سطح مبدل حرارتی (در کندانسور)
 - فاکتور انشعاب با بازگشت‌پذیری هوا در حالت کلی بین ۰.۱ تا ۰.۲ [۴۲]. (مقدار ۰.۲ انتخاب خواهد شد)
 - کارایی کمپرسور ۸۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. [۴۱]
 - بازدهی حجمی کمپرسور η_v را ۰.۹ در نظر می‌گیریم (این پارامتر تابعی از نسبت از نسبت فشار و توان پلی‌تروپیک است و با کاهش دمای کندانسور، دمای اواپراتور نیز کاهش می‌یابد و این نسبت تغییر چندانی نخواهد کرد)
- گام‌های زیر تا بدست آوردن دمای کندانسور طی می‌شود.

۱- نرخ جرمی رطوبت جدا شده از ماده m_d مطابق با معادله (۳-۱۳) بدست می‌آید.

- ۲- رطوبت مطلق هوای ورودی مطابق با معادلات (۲۶-۳) تا (۲۸-۳) قابل محاسبه است.
- ۳- برای یافتن دمای حباب تر یک مقدار فرضی از این دما (t_{start}) در معادله (۲۹-۳) قرار داده شده، فشار اشباع در دمای حباب تر بدست آمده، این مقدار با فشار اشباع (حالت عمومی) برابر قرار داده می‌شود یعنی $p_s = p_{sw}$ (یا به اصطلاح برنامه نویسی مقدار p_{sw} را در p_s میریزیم). در معادله غیرخطی شماره (۳۰-۳) مقدار دمای اشباع را بدست آورده و t_{wets} می‌نامیم (با روش نیوتن-رافسون) و با مقدار فرضی t_{start} مقایسه کرده، این فرآیند را تا جایی ادامه می‌دهیم که $t_{wets} - t_{strat} < 0.2$ شود. نهایتاً مقدار t_{wets} همان دمای حباب تر یا t_w است.
- ۴- از معادله شماره (۳۱-۳) مقدار ظرفیت حرارتی مخصوص هوای مرطوب و از شماره (۳۲-۳) مقدار نرخ جریان جرمی هوا را بدست می‌آید.
- ۵- رطوبت مطلق و دمای هوای خروجی از معادلات (۱۳-۳) و (۱۴-۳) بدست می‌آید.
- ۶- فشار جزئی هوای خروجی را با رطوبت مطلق محاسبه شده در مرحله قبل بدست آورده با استفاده از معادلات (۳۳-۳) و (۳۴-۳) رطوبت مطلق و فشار جزئی سطح رطوبت‌زدا را محاسبه کرده، مقدار دمای سطح رطوبت‌زدا مشابه دمای حباب تر بدست می‌آید. مقدار فرضی t_{start1} و فشار جزئی سطح رطوبت‌زدا را در معادله (۲۹-۳) (اندیس‌ها را عوض می‌کنیم) قرار داده فشار اشباع حباب تر بدست آمده را در معادله (۳۰-۳) جایگزین کرده و دما را در معادله غیرخطی (با روش نیوتن-رافسون) محاسبه می‌کنیم. این فرآیند را تا جایی ادامه می‌دهیم تا اختلاف دمای سطح بدست آمده با دمای فرض اولیه کمتر از ۰.۲ سانتیگراد شود. دمای خروجی رطوبت‌زدا (بعد از بدست آوردن دمای سطح آن) از معادله (۳۵-۳) به دست می‌آید.
- ۷- نهایتاً از معادله (۳۶-۳) و (۳۷-۳) دمای کندانسور محاسبه می‌شود.

۳-۶-۲ الگوریتم محاسبه شدت تشعشع جذب شده (S)

در ابتدا لازم به توضیح است روزهای مورد نظر در ماه‌های میلادی مطابق با همان روزهایی است که بصورت میانگین در مرجع [۴۴] آورده شده است. این الگوریتم برای محاسبه انرژی جذب شده کلکتور در هر موقعیت مکانی و زمانی قابل استفاده است. البته در این پایان‌نامه محاسبات از ساعت ۸ صبح الی ۴ بعد از ظهر قابل استناد است منوط بر اینکه کلیه خواص و داده‌های ورودی و خروجی نسبت به ظهر خورشیدی (ساعت ۱۲ ظهر) متقارن است. (به عنوان مثال مقدار تشعشع جذب شده یا ورودی به کلکتور در ساعت‌های ۱۰.۳۰ و ۱۳.۳۰ با هم برابر است.) میانگین تشعشع جذب شده (مقادیر متوسط در بازه‌های زمانی یک ساعته) از ۸ صبح الی ۱۶ بعد از ظهر محاسبه خواهد شد.

۱- محاسبه زاویه انحراف، زاویه برخورد تشعشع مستقیم و زاویه طلوع خورشیدی بر اساس روابط

$$(۴۹-۳) \text{ تا } (۵۳-۳)$$

۲- محاسبه نسبت تشعشع مستقیم به تشعشع صفحه افقی با توجه به موقعیت جغرافیایی طبق

$$\text{روابط } (۵۵-۳) \text{ تا } (۵۷-۳)$$

۳- محاسبه تشعشع مجموع برای یک روز و در یک ساعت مشخص (I_0 و H_0) بر اساس روابط

$$(۶۰-۳) \text{ و } (۶۱-۳)$$

۴- محاسبه r_t بر اساس رابطه (۶۴-۳) و متعاقباً نسبت تشعشع ساعت به ساعت بر اساس معادله

$$(۶۳-۳)$$

۵- محاسبه شاخص روشنی K_t بر اساس معادله (۶۲-۳) و تشتت پراکندگی و مستقیم از

$$\text{رابطه } (۶۳-۳)$$

۶- محاسبه زوایای مؤثر بر قسمت بازتابش زمین و پراکندگی از روابط (۸۲-۳) و (۸۳-۳)

۷- جایگذاری زوایای مؤثر (هر سه قسمت مستقیم، پراکندگی و بازتابش زمین) در معادله (۷۹-۳)

و محاسبه ضریب جذب برای هر سه نوع تشعشع (زاویه مؤثر تشعشع مستقیم در مرحله اول

- محاسبه شده و ضریب جذب نرمال 0.93 در نظر گرفته شده است).
- ۸- محاسبه زاویه بعد از عبور از سطح مشترک θ_2 بر اساس رابطه (۷۱-۳). n_1 برای یک سمت که هوا قرار دارد یک است و برای قسمت دیگر مقدار n_2 برابر 1.526 برای شیشه، همچنین ضخامت پوشش دو میلیمتر و ضریب خاموشی $16 m^{-1}$ در نظر گرفته خواهد شد.
- ۹- محاسبه ضریب عبور نامتقارن با کمک روابط (۶۸-۳)، (۶۹-۳)، (۷۵-۳)، (۷۸-۳) و تقریب در نظر گرفته شده در رابطه (۷۹-۳) (برای یک پوشش محاسبات انجام می شود)
- ۱۰- محاسبه شدت تشعشع وارد شده I_t بر کلکتور طبق معادله (۶۷-۳)
- استفاده از تقریب رابطه (۸۱-۳) و نهایتاً محاسبه تشعشع جذب شده بر اساس رابطه (۸۴-۳)

۳-۶-۳ الگوریتم نهایی محاسبه ضریب عملکرد و نرخ رطوبت زدایی

- در آخرین الگوریتم نرخ جدایش رطوبت و ضریب عملکرد محاسبه می شود.
- ۱- دمای کمپرسور از مرحله اول در معادله (۲۳-۳) قرار گیرد
- ۲- مقدار VD و بازدهی حجمی کمپرسور به عنوان مفروضات وارد معادله (۲۳-۳) شود.
- ۳- یک مقدار فرضی برای دمای اوپراتور T_2 در نظر گرفته شده و خواص از جمله آنتالپی و حجم مخصوص بر اساس معادلات (۳۹-۳) تا (۴۴-۳) محاسبه شود و در معادله (۲۳-۳) قرار گیرد نهایتاً به روش تکرار دمای اوپراتور به گونه ای انتخاب شود تا دو طرف معادله (۲۳-۳) با هم برابر باشد.
- ۴- کار ورودی به کمپرسور بر اساس معادله (۲۰-۳) تعیین شده و با داشتن m_d (نرخ جرمی رطوبت جدا شده از الگوریتم اول) نرخ SMER بدست خواهد آمد.
- ۵- گرمای آزاد شده در کندانسور مجموع گرمای اوپراتور و کار ورودی به کمپرسور خواهد بود و بر اساس معادله (۲۵-۳) ضریب عملکرد COP برآورد خواهد شد.

۳-۶-۴ مفروضات دیگر حل الگوریتم

برای حل الگوریتم باید مفروضاتی را مد نظر قرار داد. این مفروضات بر اساس داده‌های به کار رفته

در مراجع دیگر در این پایان نامه استفاده خواهد شد. در کلکتور فرضیات زیر را به کار رفته است. [۴۴]

جدول ۳-۵ پارامترهای فرضی در کلکتور در به منظور محاسبه ضریب هدررفتگی کلی

پارامتر	مقدار
ضریب صدور صفحه	۰.۹۵
ضریب صدور پوشش	۰.۸۸
دمای هوای پیرامون	۱۵ درجه سانتیگراد
دمای میانگین صفحه	۷۵ درجه سانتیگراد
تعداد پوشش	۱
زاویه شیب کلکتور	۲۵ درجه
ضریب انتقال جابه‌جایی باد	۱۰ وات بر متر مربع ثانیه
ضخامت عایق	۷۵ میلی‌متر
ضریب هدایت حرارتی عایق	۵۰ میلی‌متر

از این جهت که مقادیر تشعشع جذب شده بر واحد سطح در بخش نتایج به‌دست آمده، تقریب

میانگین دمای هوا و صفحه کلکتور معقول است. همچنین زوایای شیب بین ۱۰ تا ۴۰ درجه در فصل

۴ تغییر می‌کند. ضخامت δ و ضریب هدایتی عایق k برای محاسبه ضریب تلف شده قسمت پایینی

کلکتور مورد استفاده قرار گرفته (k/δ) و با مقدار U_t جمع می‌شود (از اثرات ضریب تلف شده

گوشه‌ها و لبه‌ها به علت کوچک بودن صرف‌نظر شده است)

جدول ۳-۶ مقادیر به کاررفته در محاسبه فاکتور بازدهی کلکتور

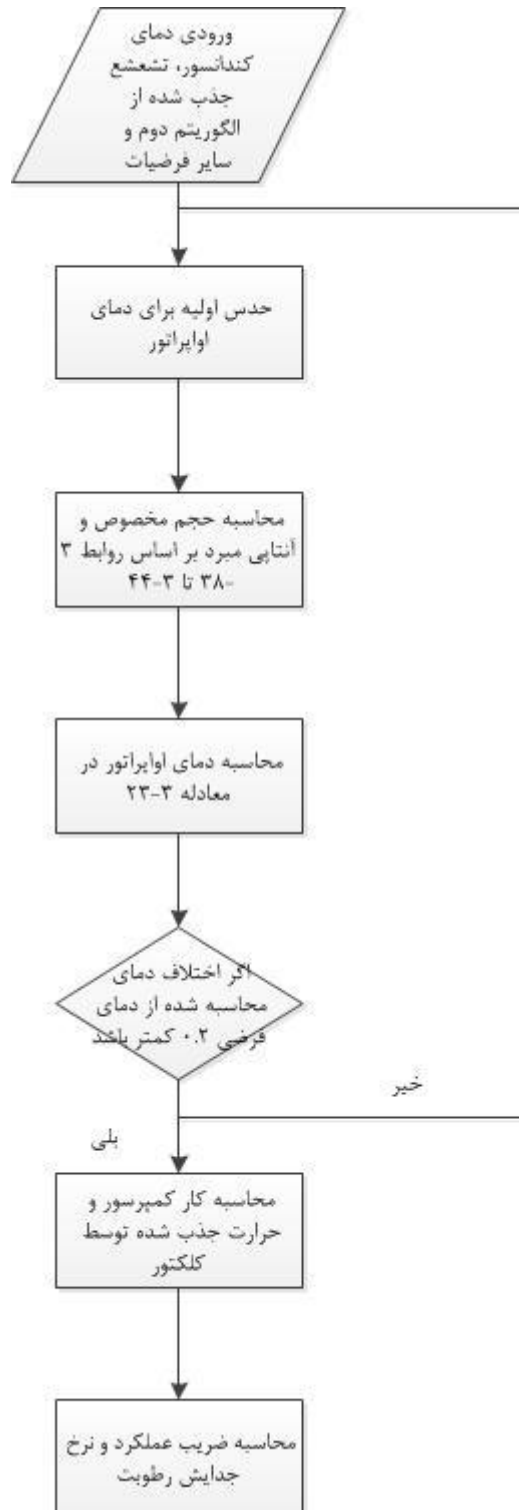
فاصله بین دو لوله	۱۵۰ میلی‌متر
-------------------	--------------

قطر داخلی لوله	۱۰ میلیمتر
ضخامت صفحه	5E-04 m
جنس صفحه کلکتور	مس با ضریب هدایت حرارتی ۳۸۵
هدایت مرزی اتصال	∞
ضریب انتقال جابه‌جایی درون لوله‌ها	۳۰۰ وات بر مترمربع-کلوین
زاویه سمتی سطح γ	صفر درجه
ضریب انعکاس زمین (ρ_g)	۰.۲

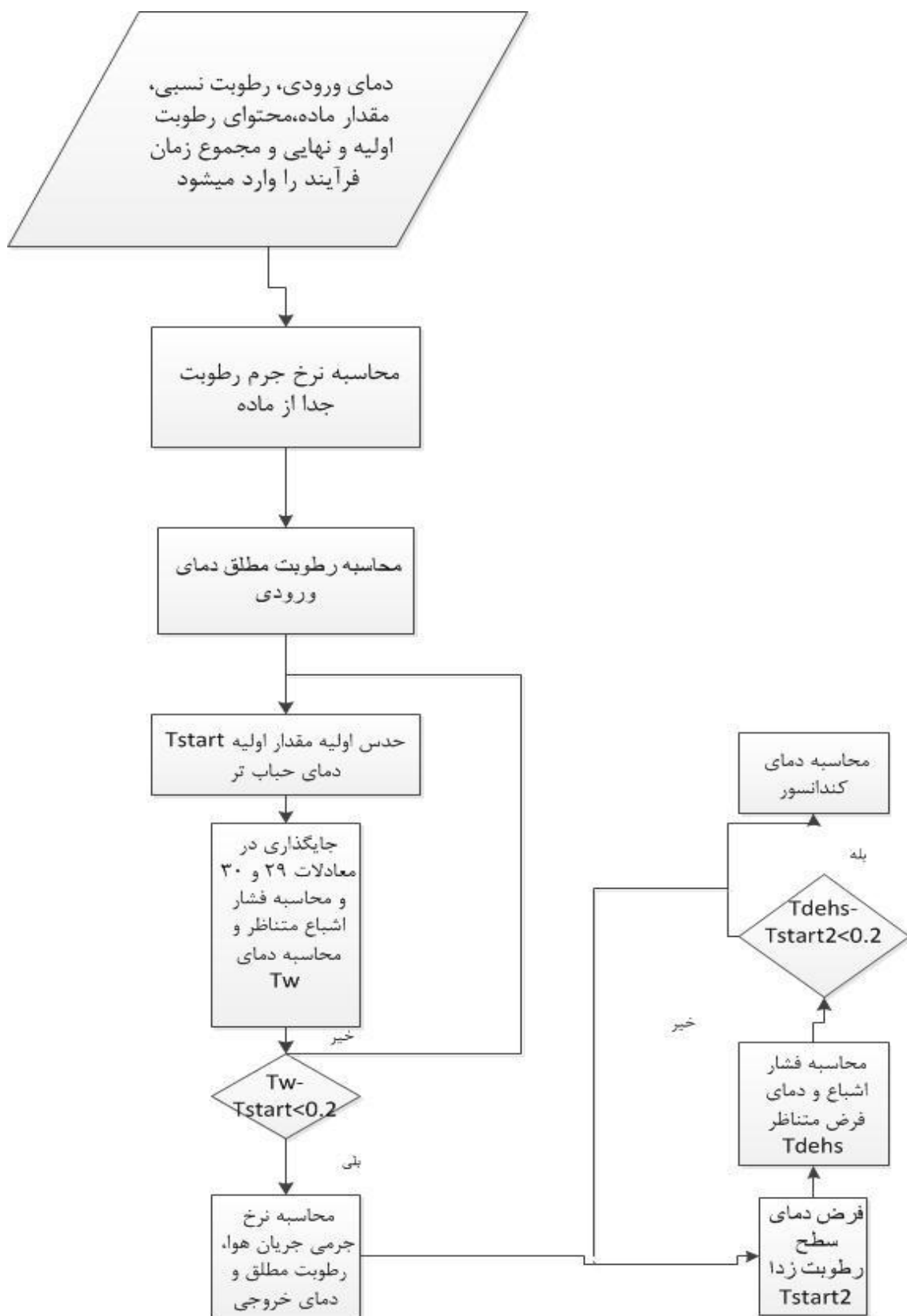
مقدار فاکتور بازدهی کلکتور از مقدار ۰.۸۴ (با ضریب هدررفتگی محاسبه شده ۶.۶) برای ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ۳۰۰ تا ۰.۹۲ برای ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ۱۰۰۰ تغییر می‌کند. در تحقیق حاضر این مقدار ۰.۸۵ در نظر گرفته خواهد شد.

همچنین سطح کلکتور را ۲ متر مربع و نرخ جابه‌جایی حجمی کمپرسور را ۰.۰۰۰۵ متر مکعب بر ثانیه فرض می‌شود. (مقادیر VD/A غالباً بین ۰.۵ تا ۱.۱ متر بر ساعت است [۲۶].)

برای زیرالگوریتم‌های ۱ و ۳ فلوچارت‌های زیر ترسیم شده‌است. لازم به ذکر است کلیه محاسبات و برنامه‌های مربوطه در نرم افزار Matlab 2012 انجام شده است.



شکل ۱۰-۳: فلوچارت الگوریتم حل توابع نهایی



شکل ۳-۱۱: فلوچارت محاسبه دمای کندانسور در خشک کن پمپ حرارتی

فصل ۴ - نتایج

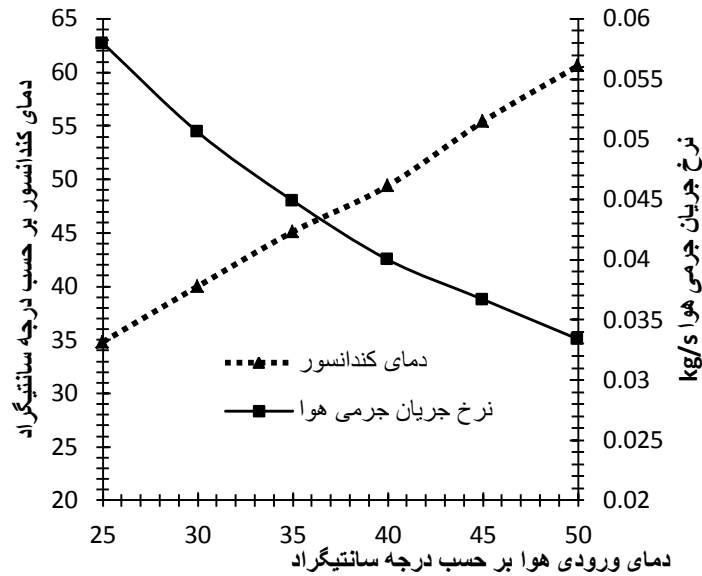
۴-۱ مقدمه

در این فصل تحلیل، نتایج برای سه شهر بیرجند، شیراز و تهران ارائه شده است ([۴۵] و [۴۶] و [۴۷]). با توجه به مناسب بودن کشور ایران در بعضی مناطق برای جذب انرژی خورشید این تحقیق برای سایر مناطق نیز قابل استناد است. این فصل به سه زیر مجموعه برای هر شهر اختصاص داده شده از آن جهت که سیستم‌های انبساط مستقیم برای بیان ضریب عملکردهای طولانی مدت و میانگین استفاده می‌شود، بخش اول هر زیر مجموعه به تشعشع جذب شده میانگین در دمای میانگین هوا اختصاص یافته است. در بخش بعدی به ملاحظات دیگر هر شهر پرداخته و حتی‌الامکان ضرایب عملکرد بلند مدت برای هر شهر بررسی شده است. در پایان بخش، عوامل تأثیرگذار دیگر بر ضریب عملکرد سیستم و مقایسه کلی سه شهر مختلف ارائه شده، راهکارهای افزایش ضریب عملکرد و نرخ رطوبت‌زدایی تبیین گردیده است.

۴-۲ وابستگی دمای کندانسور به رطوبت نسبی و تقریب‌های به

کار گرفته شده در تحلیل نتایج

در ابتدا دمای کمپرسور با دماهای ورودی خشک‌کن حاصل می‌گردد. برای این منظور دماهای ورودی خشک‌کن از ۲۵ درجه سانتیگراد تا ۴۵ درجه سانتیگراد تغییر داده شده است. رطوبت مطلق مقدار ثابت ۰.۲۵ در نظر گرفته می‌شود. نرخ جریان جرمی هوا نیز با افزایش دمای ورودی خشک‌کن کاهش می‌یابد. رطوبت نسبی ثابت و با افزایش دما (هر 5°C)، دمای حباب تر نیز افزایش پیدا می‌کند، لذا اختلاف دو دمای حباب تر و خشک (دمای ورودی) افزایش می‌یابد و سبب کاهش نرخ جریان جرمی هوا می‌شود. بر اساس معادله (۳-۳۲). در شکل ۴-۱ تغییرات دمای مبرد در کندانسور و نرخ جریان جرمی مبرد با تغییر دما نشان داده شده است.

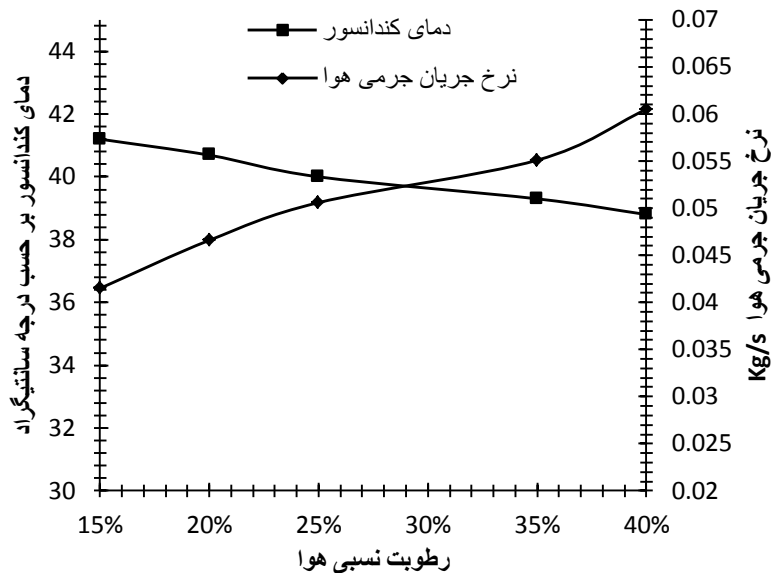


شکل ۴-۱: تغییرات دمای کندانسور و نرخ جریان جرمی هوا در مقابل دمای هوای ورودی و رطوبت نسبی ثابت ۲۰ درصد

همچنین تغییرات رطوبت نسبی در یک دمای ثابت ورودی تأثیر چندان چشمگیری بر روی دمای

کندانسور ندارد اگرچه این تغییرات سبب افزایش نرخ جریان جرمی هوا خواهد شد. شکل ۴-۲

تغییرات دمای کندانسور در مقابل رطوبت نسبی متغیر در دمای ثابت ورودی $30^{\circ}C$ را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲: تغییرات دمای کندانسور بر حسب رطوبت نسبی در دمای ثابت ورودی $30^{\circ}C$

آنچه که در نمودار شکل ۴-۲ مشهود است دمای کندانسور حدود $40^{\circ}C$ در دمای ثابت ورودی

$30^{\circ}C$ است. در مرحله بعدی ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت در سه شهر بیرجند، تهران و

شیراز بررسی می‌گردد.

۳-۴ پارامترهای خروجی در شهر بیرجند

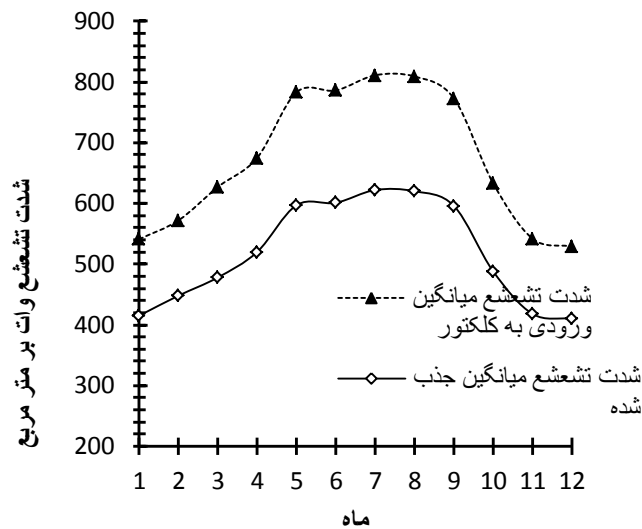
۱-۳-۴ خروجی‌های مورد نظر در دمای هوا و شدت تشعشع جذب شده میانگین

داده‌های آب و هوایی شهر بیرجند در جدول ۱ قابل مشاهده است. [۴۵] و [۴۷]

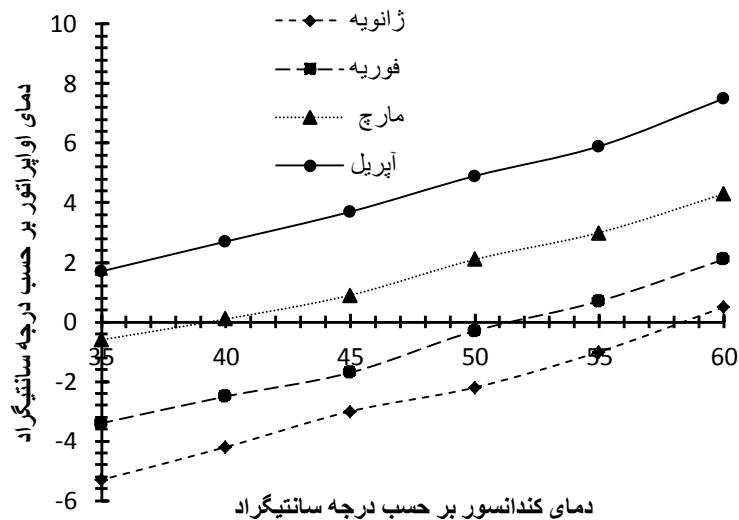
جدول ۱-۴: داده‌های آب و هوایی شهر بیرجند

ماه	\bar{H}	دمای میانگین هوا	ماکزیمم دمای هوا	شماره روز از ماه
ژانویه	۱۳.۵	۴.۳	۱۵.۲	۱۷
فوریه	۱۵.۸	۶.۷	۱۵.۲	۱۶
مارچ	۱۸.۸	۱۱.۶	۲۳.۲	۱۶
آوریل	۲۲	۱۷.۲	۲۶.۵	۱۵
می	۲۶.۳	۲۲.۲	۳۱.۳	۱۵
ژوئن	۲۷.۵	۲۶.۴	۳۵.۶	۱۱
ژولای	۲۸.۱	۲۷.۸	۳۷	۱۷
آگوست	۲۶.۷	۲۵.۸	۳۳.۵	۱۶
سپتامبر	۲۳.۷	۲۲	۳۰.۴	۱۵
اکتبر	۱۷.۹	۱۶.۹	۲۹.۱	۱۵
نوامبر	۱۴	۱۰.۹	۲۰.۵	۱۴
دسامبر	۱۳	۶.۲	۱۶.۱	۱۰

در نمودار شکل ۳-۴ شدت تشعشع جذب شده و ورودی میانگین به صفحه کلکتور نشان داده شده است. در چهارماه اول سال میلادی میانگین تشعشع جذب شده روند افزایشی دارد. در چهار ماه دوم این مقدار تقریباً ثابت بوده و در چهار ماه سوم مقدار شدت تشعشع مقدار کاهشی دارد.



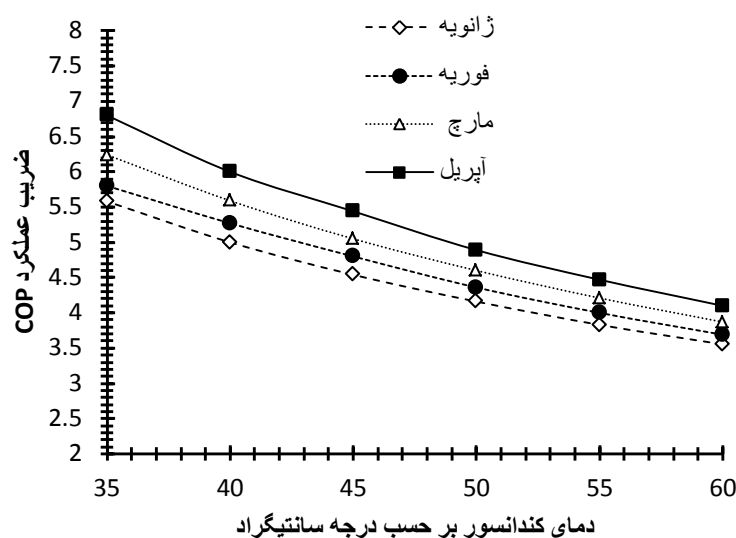
شکل ۳-۴: شدت تشعشع ورودی و جذب شده میانگین در مقابل ماه‌های سال شهر بیرجند
 حال دمای اواپراتور در چهار ماه اول سال مطابق نمودار شکل ۴-۴ بدست می‌آوریم.



شکل ۴-۴: دمای اواپراتور-کلکتور در مقابل دمای کندانسور در چهار ماه اول سال میلادی شهر بیرجند
 همانطور که در نمودار شکل ۴-۴ مشاهده می‌شود در اوایل فصل زمستان با شدت تشعشع کمتر،
 دمای اواپراتور کمتر است. همچنین میزان تغییرات دمای مبرد کلکتور با افزایش دمای کندانسور
 چندان بالا نیست. با افزایش شدت تشعشع میزان دمای اواپراتور افزایش یافته و دمای هوا از دمای
 کلکتور بالاتر است.

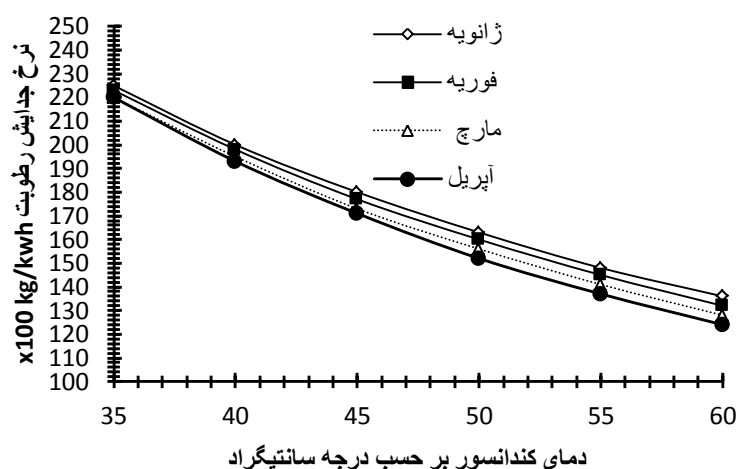
در نمودار شکل ۵-۴ نحوه تغییرات ضریب عملکرد سیستم را در چهار ماه اول نشان داده شده

است.



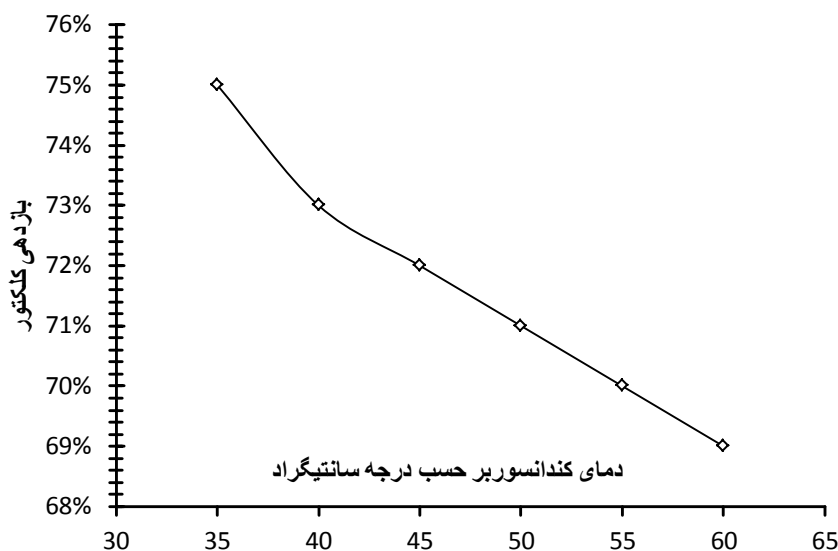
شکل ۴-۵: ضریب عملکرد سیستم نسبت به دمای کندانسور در چهار ماه اول میلادی شهر بیرجند با کاهش دمای کندانسور (دمای ورودی خشک کن) در سیستم‌های انبساط مستقیم، ضریب عملکرد افزایش می‌یابد چرا که اختلاف دمای اواپراتور و کندانسور کاهش یافته و نمودار آنتالپی بر حسب دما فشرده تر می‌شود. مطابق آنچه در نمودار شکل ۴-۴ مشاهده شد افزایش 5°C دمای مبرد در کندانسور سبب افزایش 2°C دما در قسمت سرد سیکل می‌شود.

در نمودار شکل ۴-۶ نرخ جدایش رطوبت SMER بر حسب دمای کندانسور نمایش داده شده است. مدت زمان کل فرآیند ۸ ساعت و جرم اولیه ماده ۴ کیلوگرم در نظر گرفته شده است.



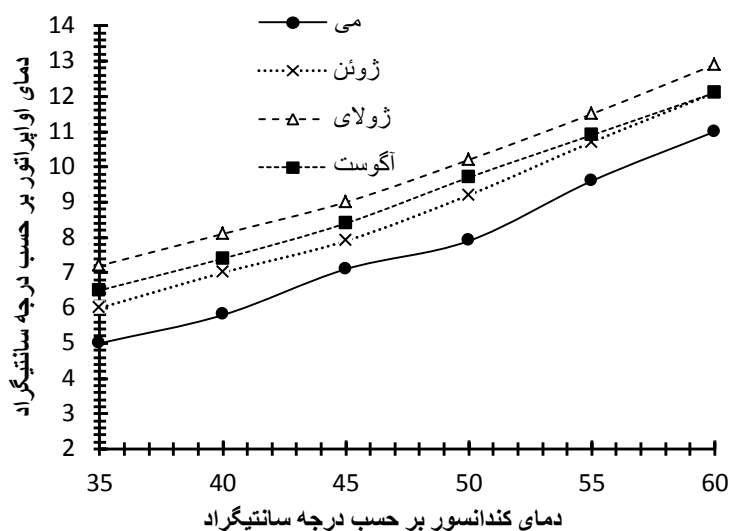
شکل ۴-۶: نرخ جدایش رطوبت در مقابل دمای کندانسور در چهار ماه اول میلادی شهر بیرجند

با گذشت فصل زمستان و افزایش شدت تشعشع کار ورودی به کمپرسور تا اندازه‌ای افزایش یافته و این موضوع با افزایش تعداد ماه‌های سال سبب کاهش نرخ رطوبت زدایی می‌شود. البته همان‌طور که در نمودار شکل ۴-۶ مشخص است این کاهش مقدار بسیار اندک است. همچنین با افزایش دمای کندانسور و افزایش اختلاف دمای مبرد در قسمت سرد (اوپراتور) و قسمت گرم (کندانسور) کار ورودی به کمپرسور افزایش و نرخ رطوبت زدایی کاهش می‌یابد. مقدار کار کمپرسور در دمای 35°C تقریباً مقدار ثابت 180 وات است چرا که فشار اشباع مربوط به این دما حدود 888 بوده و تغییرات دمای اوپراتور مطابق با معادله (۳-۲۰) تأثیر چندانی بر کار کمپرسور نخواهد داشت. نمودار شکل ۴-۷ نحوه تغییرات بازدهی کلکتور براساس معادله شماره (۳-۸۴) را نشان می‌دهد. بازدهی کلکتور برای شدت تشعشع‌های گوناگون در فصول مختلف و در دماهای ثابت ورودی تقریباً مقداری ثابت است، اما کاهش دمای کندانسور سبب افزایش مقدار کارآیی کلکتور می‌شود چرا که اختلاف دمای هوا و مبرد افزایش یافته و از آن جهت که دمای مبرد از هوا کمتر است با ضریب u_l ثابت بازدهی کلکتور افزایش می‌یابد.

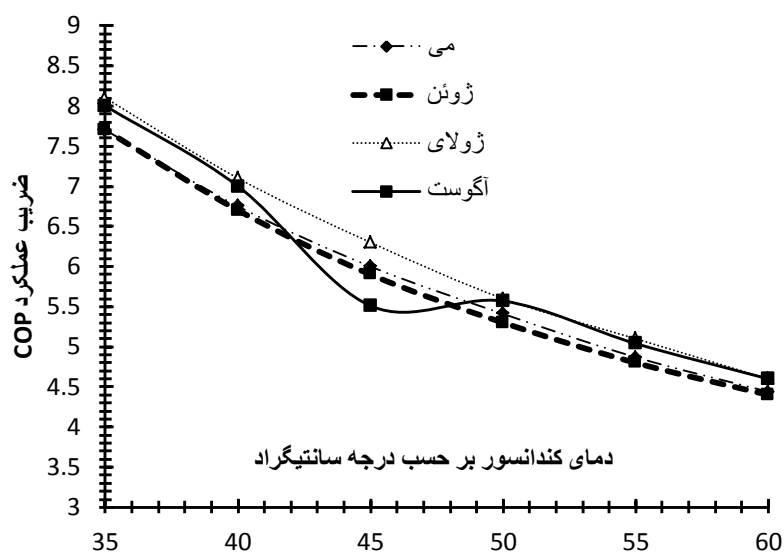


شکل ۴-۷: میزان تغییرات بازدهی کلی کلکتور در مقابل دمای کندانسور در ماه ژانویه شهر بیرجند در چهار ماه دوم، افزایش شدت تشعشع خورشید سبب افزایش دمای اوپراتور، و افزایش اندک ضریب عملکرد خواهد شد. همچنین نرخ رطوبت زدایی نیز تقریباً ثابت می‌باشد. (نرخ تغییرات کاهش می‌یابد)

آن اندک است) ماکزیمم شدت تشعشع میانگین در ماه ژولای، با مقدار 622 W رخ داده و دمای میانگین هوا در این ماه (تیر) حدود 27.8°C است. در ماه‌های قبل و بعد از آن نیز شدت تشعشع جذب شده اختلاف کمی با مقدار حاصل شده دارند.



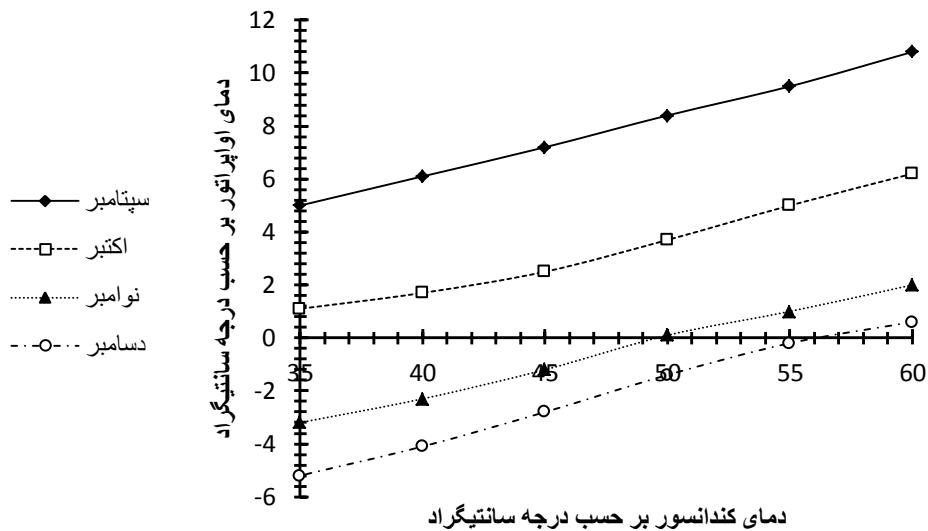
شکل ۴-۸: تغییرات دمای اوپراتور-کلکتور در مقابل کن‌دانسور چهار ماه دوم سال میلادی شهر بیرجند



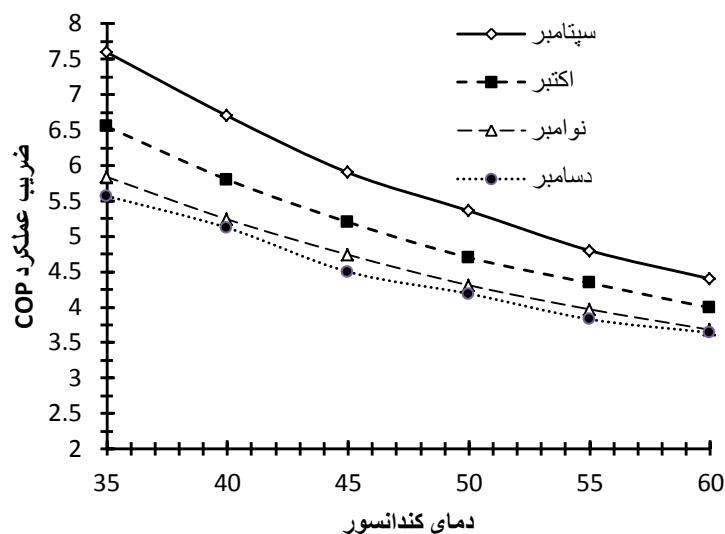
شکل ۹-۴: تغییرات ضریب عملکرد در مقابل دمای کن‌دانسور چهار ماه دوم سال میلادی شهر بیرجند همانگونه که در نمودار شکل ۴-۹ مشاهده می‌شود ضریب عملکرد تقریباً ثابت است.

در چهار ماه پایانی سال میلادی تشعشع جذب شده به مرور زمان روبه نزول رفته و سبب کاهش

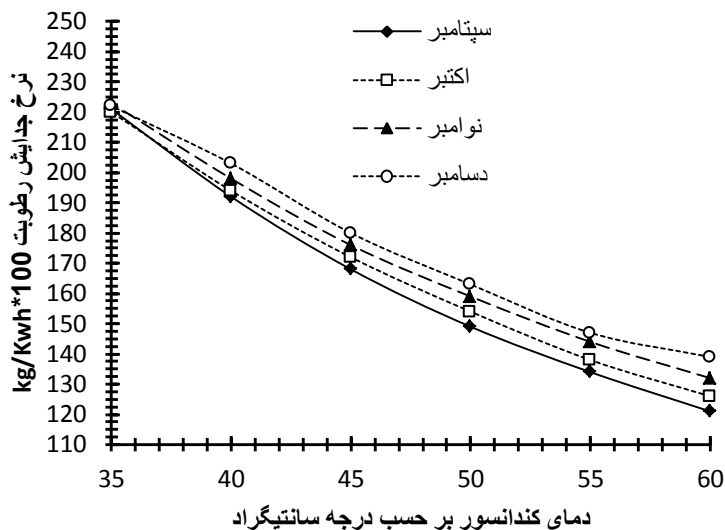
دمای قسمت سرد سیکل تبرید، کاهش ضریب عملکرد و افزایش اندک نرخ جدایش رطوبت خواهد شد. در ماه سپتامبر دمای هوا ۲۲ درجه سانتیگراد و شدت تشعشع میانگین مقدار ۵۹۶ وات بر متر مربع است همچنین تشعشع روزانه بر روی صفحه افقی ۲۳.۷۴ مگاژول بر متر مربع ساعت است که نسبت به ماه اکتبر حدود ۵.۷۴ مگاژول بر متر مربع ساعت بیشتر است این در حالی است که در ماه بعدی یعنی شدت تشعشع به ۴۴۸ وات بر متر مربع و دمای میانگین هوا به مقدار ۱۶.۹ درجه سانتیگراد خواهد رسید. ظرفیت حرارتی اواپراتور کاهش نسبتاً زیادی در این دو ماه داشته و سبب اختلاف مقادیر در ضریب عملکرد و دمای متناظر خروجی اواپراتور شده است.



شکل ۴-۱۰: تغییرات دمای اواپراتور- کلکتور در مقابل دمای کندانسور چهار ماه سوم سال میلادی شهر بیرجند با توجه به اینکه شدت تشعشع جذب شده در ماه اکتبر نسبت به دسامبر افت محسوسی دارد اختلاف دماهای اواپراتور در این دو ماه مختلف بسیار بالاست. همچنین در ماه دسامبر دماهای اواپراتور بدست آمده (متعاقباً ضریب عملکرد نیز) نزدیک به ماه اول میلادی یعنی ژانویه است. (به نمودار شکل ۴-۴ مراجعه شود).



شکل ۴-۱۱: تغییرات ضریب عملکرد در مقابل دمای کندانسور چهار ماه سوم سال میلادی شهر بیرجند

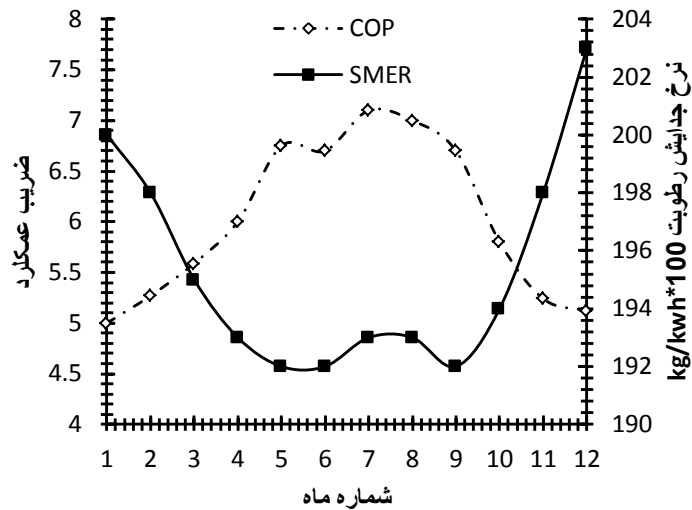


شکل ۴-۱۲: تغییرات نرخ جدایش رطوبت در مقابل دمای کندانسور چهار ماه سوم میلادی شهر بیرجند

۴-۳-۲ خروجی‌های دیگر بر اساس داده‌های ماهانه و شدت تشعشع ماکزیمم

در نمودار شکل ۴-۱۳ ضرایب عملکرد در ماه‌های مختلف در دمای کندانسور ۴۰°C نشان داده

شده است.



شکل ۴-۱۳: تغییرات ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت در دمای کندانسور ۴۰ درجه سانتیگراد در مقابل ماه‌های میلادی در شهر بیرجند

همانطور که در نمودار شکل ۴-۱۳ قابل مشاهده است در ماه‌های میانی تابستان ضریب عملکرد

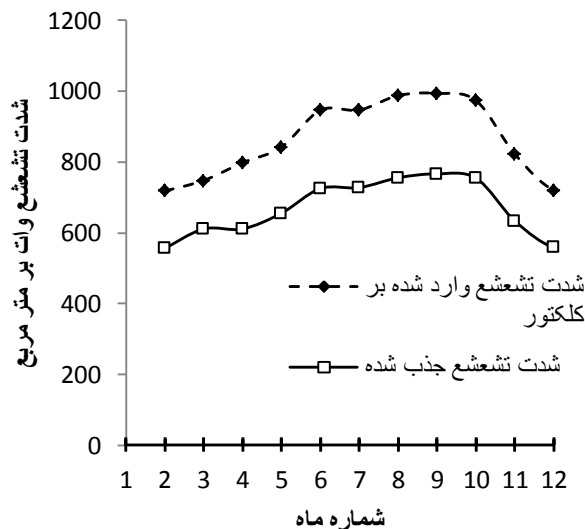
بیشترین مقدار خود را در زاویه شیب $(\beta = 10^\circ)$ دارد. مقدار جدایش رطوبت در ماه‌های اولیه سال

بیشتر بوده چرا که در این ماه‌ها کار ورودی به کمپرسور کمتر است. در انتهای این بخش ضرایب

عملکرد و نرخ جدایش رطوبت را در زمانی که بیشترین شدت تشعشع رخ می‌دهد را بررسی می‌کنیم.

در ماه ژولای ماکزیمم دمای هوا $37^\circ C$ و شدت تشعشع 755 وات است. البته شدت تشعشع در

ساعت ۱۱:۳۰ برای تمامی ماه‌های سال در شهر بیرجند در شکل زیر مشهود است.

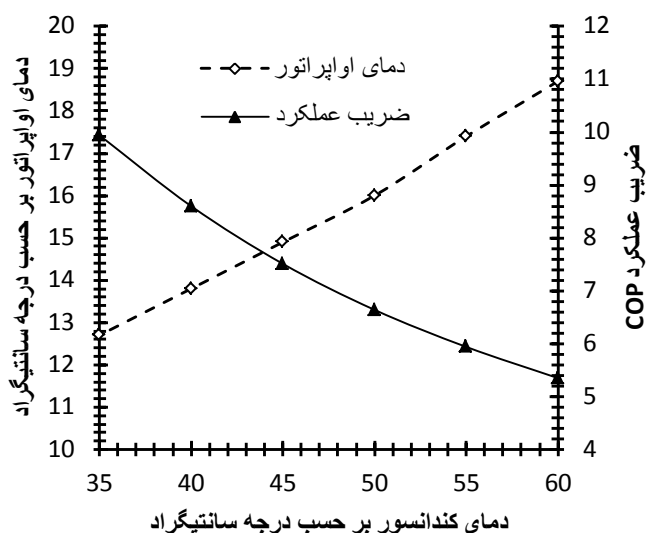


شکل ۴-۱۴: شدت تشعشع ورودی و جذب شده ماکزیمم توسط کلکتور که با ساعت وقوع ۱۱:۳۰ در مقابل ماه‌های

میلادی در شهر بیرجند

بنابراین برای ضریب عملکرد و دمای اواپراتور بیشترین مقادیر در ماه ژولای و این ساعت رخ

می دهد که مطابق نمودار شکل ۴-۱۵ بیان می شود.



شکل ۴-۱۵: تغییرات دمای اواپراتور و ضریب عملکرد در قابل دمای کندانسور در ساعت ۱۱:۳۰ ماه ژولای در شهر

بیرجند

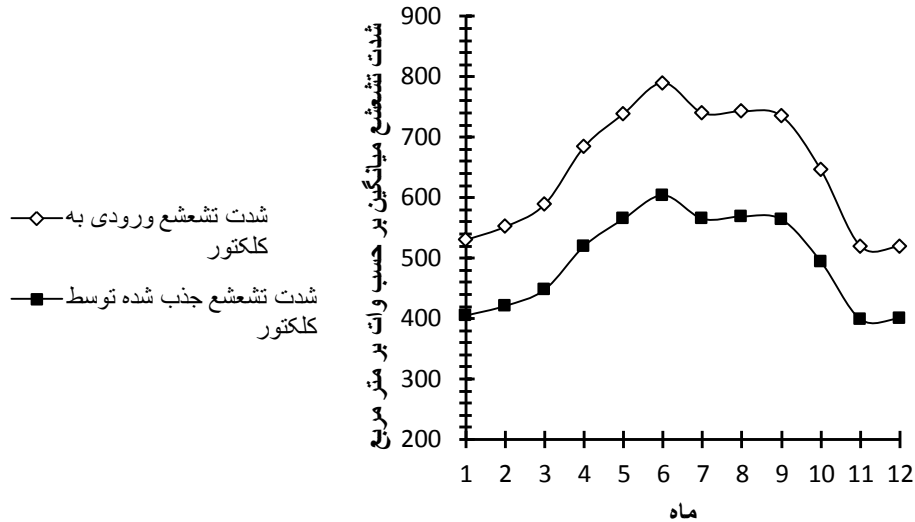
این مقادیر بیشترین ضریب عملکرد و دمای اواپراتور را در طول سال نشان می دهند. با آنکه شدت تشعشع جذب شده در ماه آگوست اندکی بیشتر است ولی دمای ماکزیمم هوا در ژولای بیشتر از ماه آگوست بوده و به همین علت دماهای اواپراتور اندکی بیشتر از مقادیر متناظر در ماه آگوست است.

۴-۴ داده های خروجی شهر شیراز

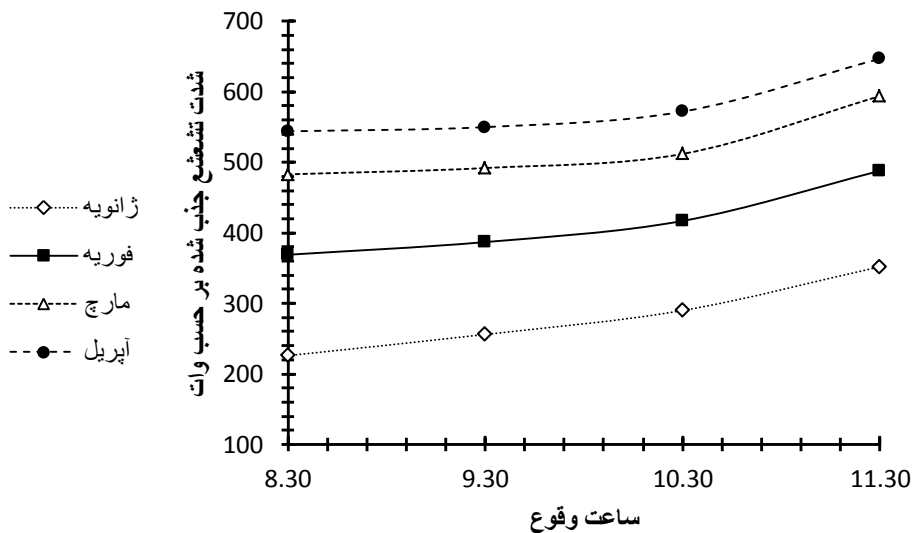
۴-۴-۱ خروجی های مورد نظر در دمای هوا و شدت تشعشع میانگین

شیراز در مدار عرضی 29.38° شرق نیمکره شمالی قرار دارد. این شهر آب و هوای نسبتاً گرم و خشکی داشته و تغییرات دمایی در این شهر نسبت به شهر بیرجند کمتر است [۴۵] و [۴۷]. میانگین شدت تشعشع در ماه های مختلف سال در نمودار شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. در نمودار شکل ۴-۱۷ نیز میزان شدت تشعشع جذب شده در ساعات مختلف روز در چهار ماه اول سال نمایش داده

شده است.



شکل ۴-۱۶: نمودار توزیع شدت تشعشع میانگین در ماه‌های مختلف سال در شهر شیراز همانطور که در نمودار شکل ۴-۱۶ قابل مشاهده است، از ماه هفتم تا نهم شدت تشعشع بر واحد سطح تقریباً مقداری ثابت است و دمای هوای پیرامون تنها عامل تعیین کننده در میزان بالا یا پایین بودن دمای اواپراتور می باشد. ماکزیمم شدت تشعشع در ماه ژوئن رخ می دهد.



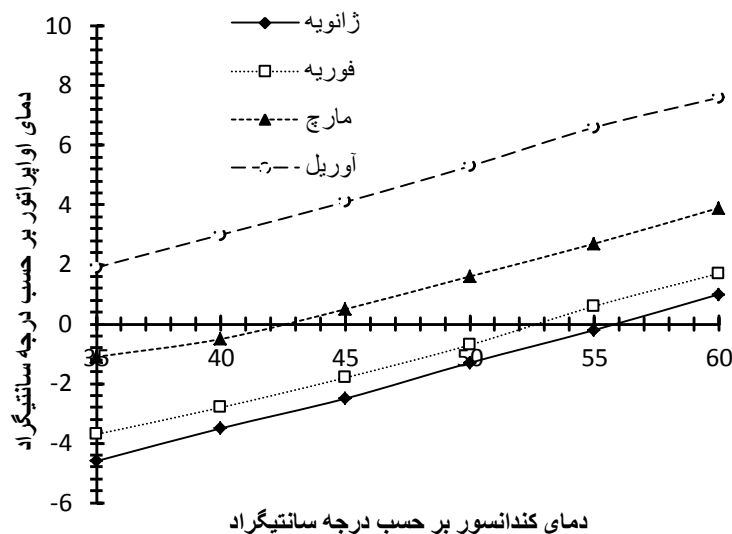
شکل ۴-۱۷: نمودار شدت تشعشع جذب شده چهار ماه اول از ساعت ۸.۳۰ تا ۱۱.۳۰ شهر شیراز طبیعتاً هرچه به سمت ظهر خورشیدی نزدیک می شویم شدت تشعشع بر واحد سطح به علت

افزایش تشعشع بر سطح افقی افزایش خواهد یافت. باید توجه داشت برای ساعات اولیه بامداد مدل ایزوتروپیک آسمان نمی‌تواند تقریب خوبی از شدت تشعشع را ارائه خواهد داد. نمودار شدت تشعشع بر حسب زمان نسبت به مبدا خورشیدی (ساعت ۱۲) متقارن است به همین علت این مقادیر تا ساعت ۱۱.۳۰ محاسبه شده است. در جدول ۲-۴ داده‌های آب و هوایی شهر شیراز نشان داده شده است.

جدول ۲-۴ داده‌های آب و هوایی شهر شیراز

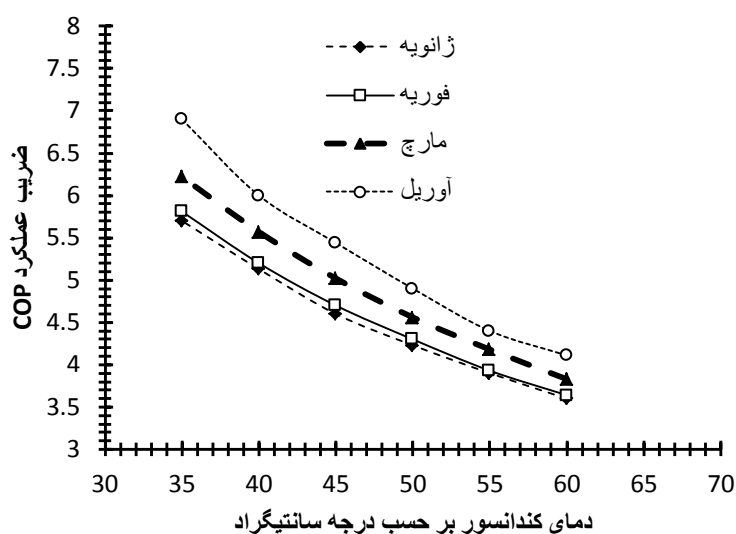
روز از ماه	میانگین دمای هوا	ماکزیمم دمای هوا	میانگین تثعشع روزانه بر صفحه افقی $mj/m^2(\bar{H})$	ماه
۱۷	۸.۲	۱۵.۸	۱۳.۹۲	ژانویه
۱۶	۱۰.۸	۱۷.۴	۱۵.۶۴	فوریه
۱۶	۱۵.۲	۲۴.۱	۱۸	مارچ
۱۵	۱۷.۹	۲۵.۶	۲۲.۲۱	آوریل
۱۵	۲۳.۵	۳۱.۷	۲۵.۲۴	می
۱۱	۲۸.۲	۳۷.۴	۲۷.۷۲	ژوئن
۱۷	۳۰.۸	۳۹.۸	۲۵.۹۱	ژولای
۱۶	۲۷.۸	۳۶.۳	۲۴.۸۳	آگوست
۱۵	۲۴.۹	۳۴.۱	۲۲.۸۲	سپتامبر
۱۵	۲۰.۵	۳۰	۱۸.۵۶	اکتبر
۱۴	۱۱.۷	۲۱.۴	۱۳.۹۵	دسامبر
۱۰	۸.۲	۱۷.۹	۱۳.۳۲	نوامبر

برای شیراز دماهای اواپراتور بر حسب دمای کندانسور در نمودار شکل ۴-۱۸ آورده شده است.

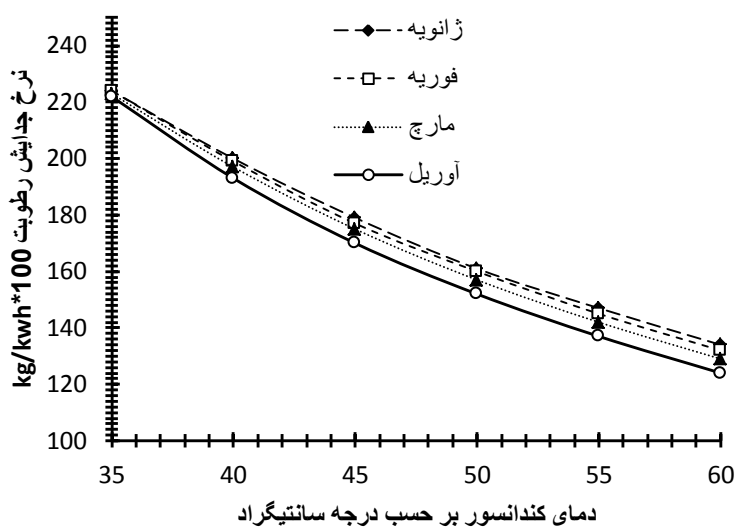


شکل ۴-۱۸: تغییرات دمای اواپراتور در مقابل دمای کندهانسور چهار ماه اول سال میلادی شهر شیراز اگر به نمودار شکل ۴-۱۶ دقت شود شدت تشعشع جذب شده در ماه آوریل نسبت به ماه مارچ شیب بیشتری داشته و به همین علت دماهای کلکتور به دست آمده نسبت به ماه مارچ بیشتر است. در مجموع با توجه با افزایش شدت تشعشع در واحد سطح با افزایش شماره ماه دماهای اواپراتور نیز روند صعودی دارند. همانگونه که قابل مشاهده است افزایش ضریب عملکرد و دمای اواپراتور در ماه چهارم نسبت به ماه سوم روند صعودی شدیدی دارد. شدت تشعشع میانگین در ماه آوریل نسبت به ماه مارچ افزایشی حدود ۸۰ وات بر متر داشته، همچنین افزایش درجه حرارت هوا به میزان ۵ درجه سانتیگراد سبب افزایش ضریب عملکرد و دمای اواپراتور شده است.

در نمودار شکل ۴-۱۹ ضرایب عملکرد برای چهار ماه اول سال برای دماهای مختلف کندهانسور ورودی آورده شده‌اند. همانطور که در شکل ۴-۱۹ نیز قابل مشاهده است، مقادیر ضریب عملکرد در دومه اول سال تقریباً برابرند. افزایش دمای کندهانسور سبب کاهش ضریب عملکرد شده و افزایش دما در کندهانسور سبب افزایش اندکی در دمای کلکتور می‌شود. این مسأله سبب کاهش کار ورودی به کمپرسور شده و در نهایت ضریب عملکرد کاهش می‌یابد. همین مسأله افزایش نرخ رطوبت زدایی را در پی خواهد شد.

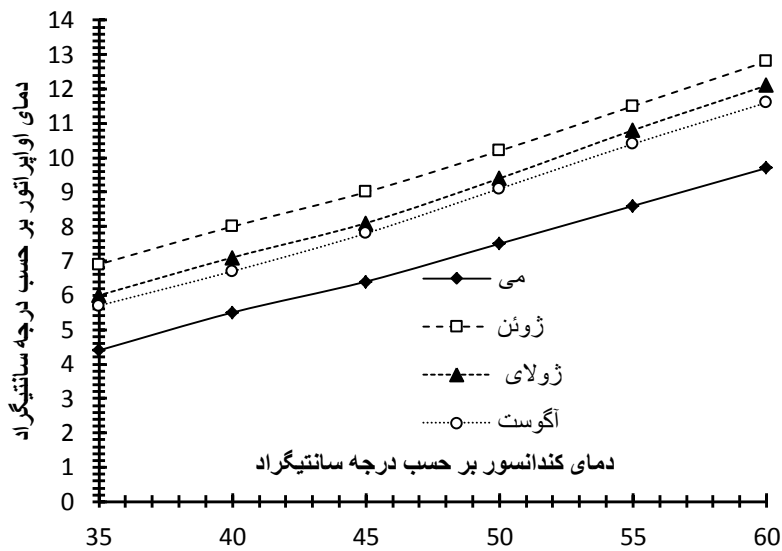


شکل ۴-۱۹: تغییرات ضریب عملکرد در مقابل دمای کندانسور در چهار ماه اول سال شهر شیراز در نمودار شکل ۴-۲۰ نیز نحوه تغییرات نرخ جدایش رطوبت بر حسب دمای کندانسور برای چهار ماه اول نشان داده شده است.

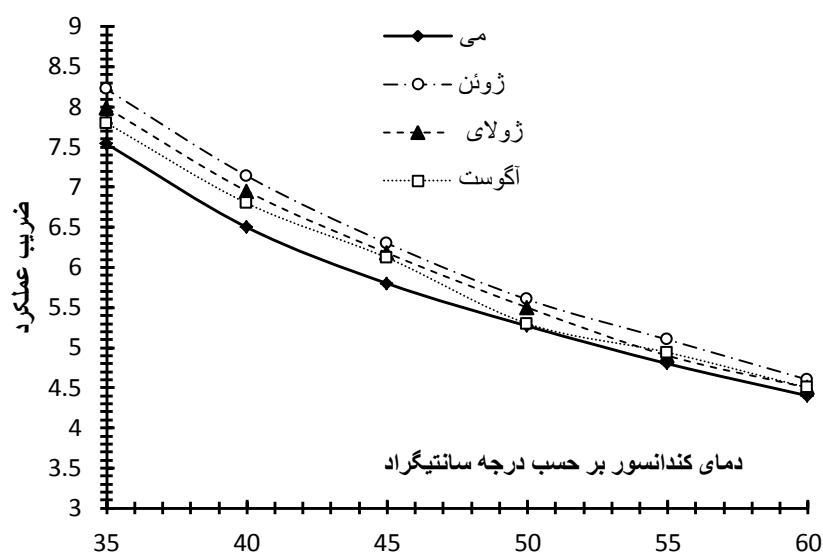


شکل ۴-۲۰: تغییرات نرخ جدایش رطوبت بر حسب دمای کندانسور چهار ماه اول سال میلادی شهر شیراز در مرحله بعدی ضریب عملکرد و دمای کلکتور-اوپراتور در چهارماه دوم سال بررسی خواهد شد. نمودار شکل ۴-۲۱ دمای اوپراتور بر حسب کندانسور را در چهار ماه دوم سال نشان می‌دهد. ماه ژوئن که شدت تشعشع بر واحد سطح آن از سایر ماه‌ها بیشتر است مبرد را گرم‌تر و ضریب عملکرد آن را بالاتر خواهد برد اگرچه دمای هوا در ژولای بیشتر است اما با اثربخشی بیشتر شدت تشعشع میانگین

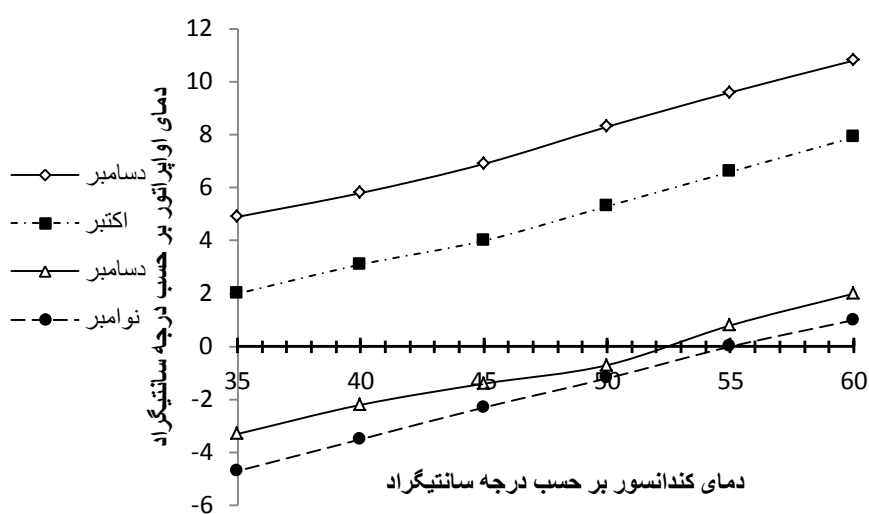
ماه دمای اواپراتور بیشتر است. البته در این ماه‌ها مقادیر ضریب عملکرد تقریباً یکسانند و متعاقباً نرخ جدایش رطوبت نیز تغییر چندانی نمی‌کند. بنابراین در این شهر ماه ژوئن برای استفاده از سیستم انبساط مستقیم خوشیدی مناسب‌تر است. حدود ۳۷ وات بر متر مربع کلکتور خورشیدی در این ماه نسبت به ماه بعدی یعنی ژولای انرژی بیشتری جذب کرده در عین حال دمای هوا از ماه ژوئن تا ژولای دو درجه سانتیگراد کاهش یافته، اثربخشی بیشتر شدت تشعشع بهترین ماه برای جذب تشعشع را همان ماه ششم معرفی می‌کند.



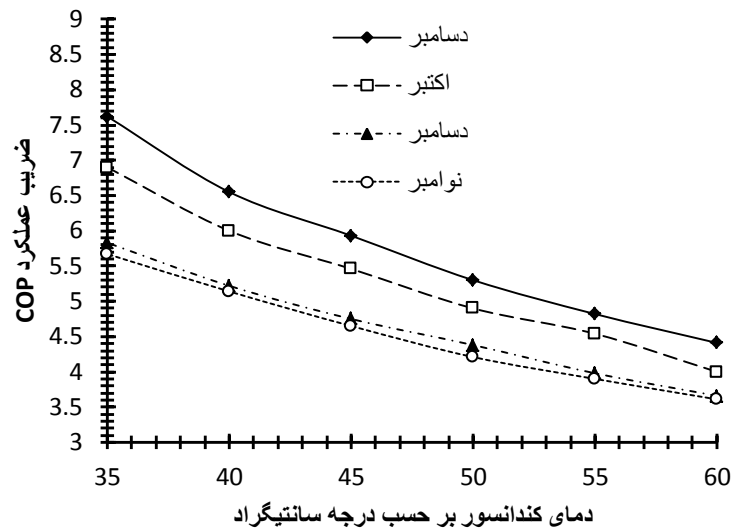
شکل ۴-۲۱: نمودار تغییرات دمای اواپراتور در مقابل دمای کندانسور چهار ماه دوم سال میلادی شهر شیراز



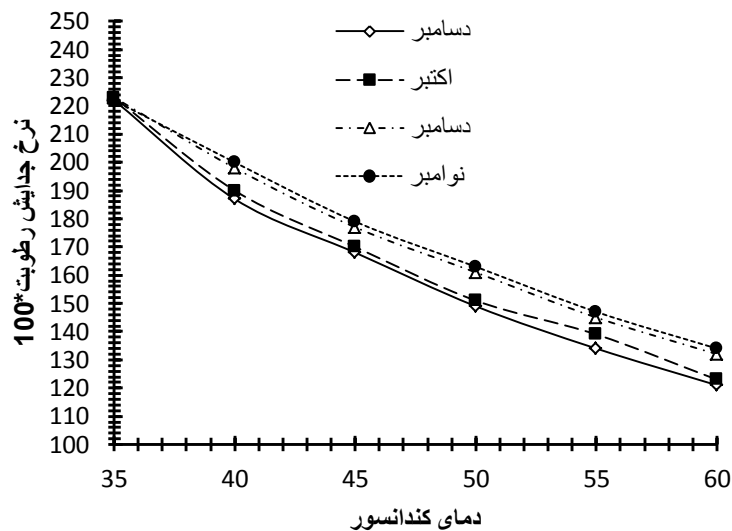
شکل ۴-۲۲: نمودار تغییرات ضریب عملکرد در مقابل دمای کندانسور چهار ماه دوم سال میلادی شهر شیراز ضریب عملکرد مطابق با نمودار شکل ۴-۲۲ از ماه ژوئن به بعد کاسته خواهد شد. در چهار ماه سوم سال روند کاهشی ضریب عملکرد ادامه خواهد داشت. شدت تشعشع بر واحد سطح در ماه‌های زمستان نسبت به پاییز کمتر است. بنابراین برای دماهای اوپراتور و ضریب عملکرد مطابق نمودارهای شکل ۴-۲۳ و شکل ۴-۲۴ بدست می‌آید. همانگونه که مشاهده می‌شود مقادیر متناظر ضریب عملکرد در دو ماه اکتبر و دسامبر افت ناگهانی دارد. دمای میانگین هوا از ماه نوامبر تا دسامبر ۱۰ درجه سانتیگراد و شدت تشعشع میانگین ۹۲ وات بر متر مربع کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۲۳: تغییرات دمای اوپراتور در مقابل دمای کندانسور در چهار ماه سوم سال میلادی شهر شیراز



شکل ۴-۲۴: تغییرات ضریب عملکرد در مقابل دمای کندانسور در چهار ماه سوم میلادی شهر شیراز شدت تشعشع با توجه به نمودار شکل ۴-۱۶ در ماه اکتبر نسبت به دسامبر کاهش ناگهانی داشته، بنابراین اختلاف ضرایب عملکرد در دو ماه اکتبر و دسامبر بالا رفته‌است. همچنین دو ماه دسامبر و نوامبر که شدت تشعشع‌های تقریباً مشابهی دارند، ضرایب عملکرد مشابهی نیز دارند. نمودار شکل ۴-۲۵ نیز نرخ جدایش رطوبت را در چهار ماه آخر سال نشان می‌دهد که با توجه به کاهش کار ورودی به کمپرسور در ماه‌های پایانی سال افزایش خواهد یافت.



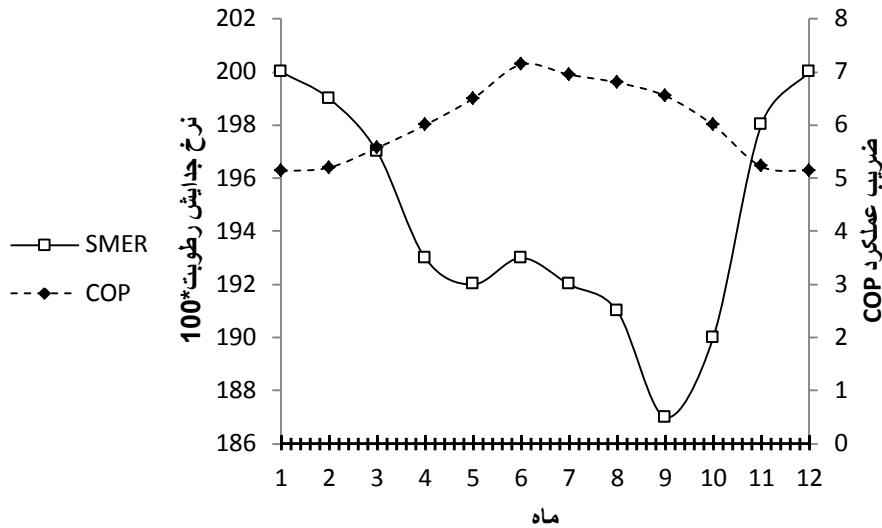
شکل ۴-۲۵: تغییرات نرخ جدایش رطوبت در مقابل دمای کندانسور چهار ماه سوم میلادی شهر شیراز

۴-۲-۴ خروجی‌های دیگر بر اساس داده‌های ماهانه و شدت تشعشع

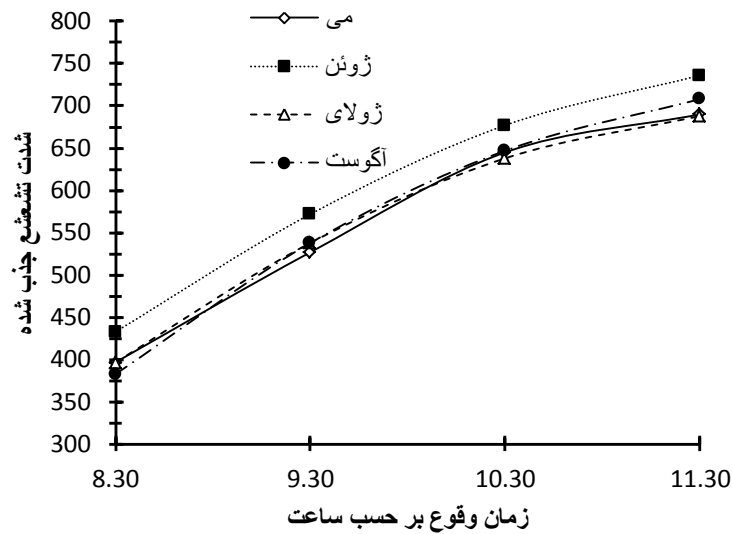
ماکزیمم

در طی یک سال نیز ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت در این شهر و دمای 40°C بررسی

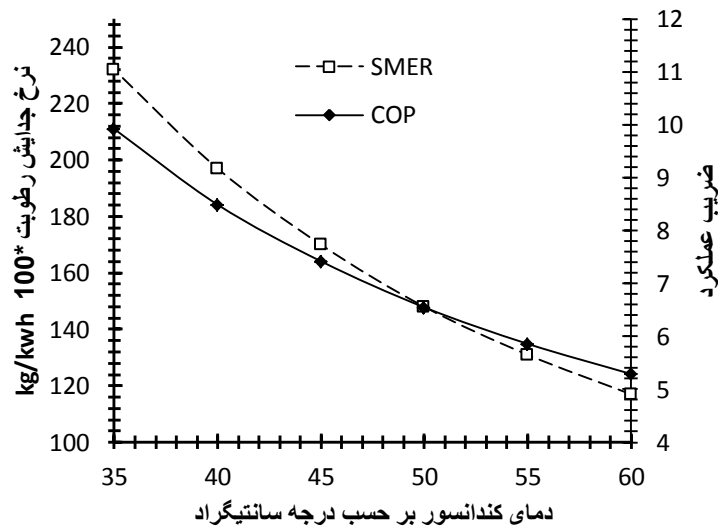
خواهد شد.



شکل ۴-۲۶: تغییرات ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت در دمای کندانسور 40°C درجه سانتیگراد شهر شیراز بر اساس نمودار شکل ۴-۲۶ جدایش رطوبت در فصل زمستان از سایر فصل‌ها بیشتر و ضریب عملکرد در ماه ژوئن از تمامی ماه‌های دیگر سال بیشتر است. ماکزیمم شدت تشعشع در ساعت ۱۱:۳۰ تاریخ ۱۱ ژوئن رخ داده و در چهار ماه دوم سال شدت تشعشع جذب شده توسط کلکتور تخت مطابق با نمودار شکل ۴-۲۷ می‌باشد.

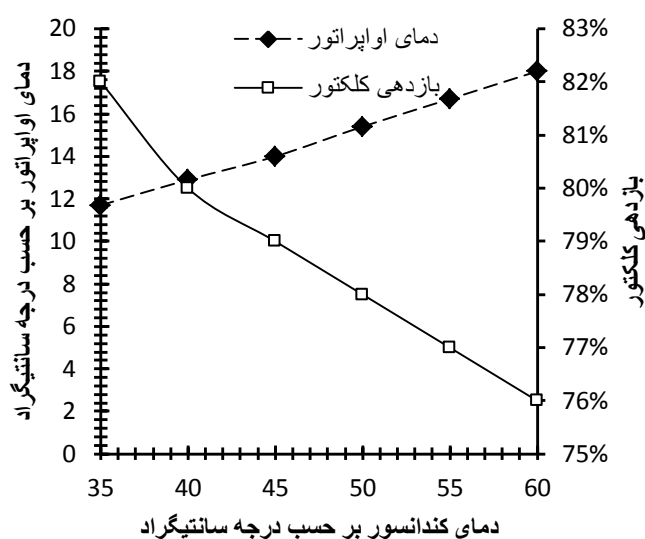


شکل ۴-۲۷: تغییرات شدت تشعشع جذب شده و ورودی بر کلکتور در ماه‌های میانی سال میلادی شهر شیراز در این زمان خاص ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت را مطابق با نمودار شکل ۴-۲۸ است.



شکل ۴-۲۸: تغییرات ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت ماکزیمم در ماه ژوئن شهر شیراز (ساعت ۱۱:۳۰) همانطور که مشاهده می‌شود ماکزیمم ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت در دمای 35°C رخ

می‌دهد. همچنین دمای اواپراتور و بازدهی کلکتور مطابق با شکل ۴-۲۹ بدست خواهد آمد.



شکل ۴-۲۹: تغییرات دمای اواپراتور-کلکتور و بازدهی کلکتور در مقابل دمای کندانسور در ساعت ۱۱:۳۰ ماه ژوئن شهر شیراز

۴-۵ داده های خروجی شهر تهران

۴-۵-۱ داده های خروجی شهر تهران در دمای هوا و شدت تشعشع

میانگین

پایتخت ایران در مدار عرضی 35.44° شرقی کره زمین قرار دارد. شرایط هوایی آب و هوایی در

این پایان نامه بر اساس داده های ایستگاه مهرآباد محاسبه خواهد شد. داده های بکار رفته برای تهران

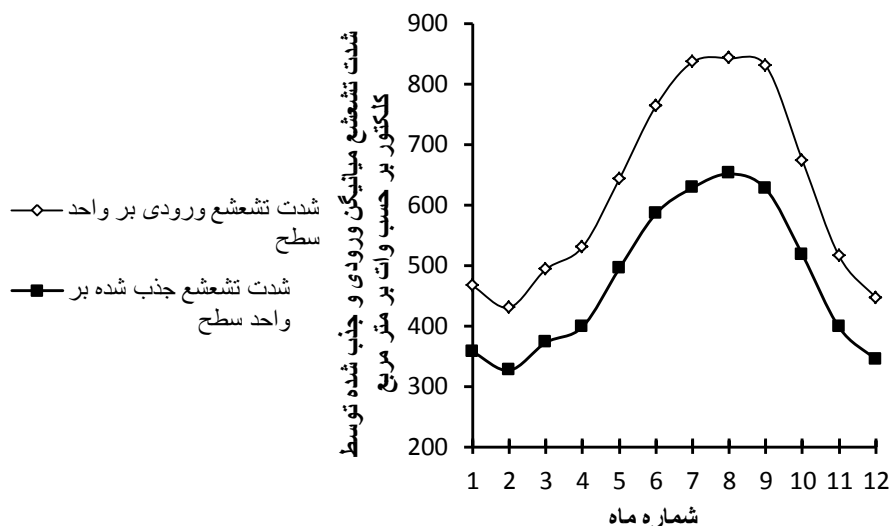
مطابق با جدول ۴-۳ است. [۴۶] و [۴۷]

جدول ۴-۳ داده های آب و هوایی شهر تهران

روز از ماه	میانگین دمای هوا	ماکزیمم دمای هوا	\bar{H}	ماه
۱۷	۸.۹	۱۲.۸	۱۱.۴۲	ژانویه
۱۶	۸.۹	۱۲.۸	۱۱.۹۲	فوریه
۱۶	۱۴.۵	۱۹.۱	۱۴.۸۸	مارچ
۱۵	۱۸.۱	۲۳.۳	۱۷.۲۸	آوریل

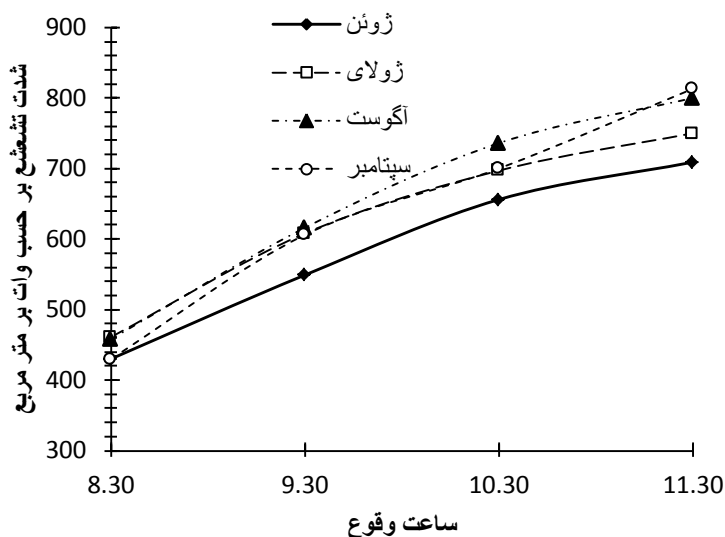
می	۲۲.۲۴	۲۸.۶	۲۳.۲	۱۵
ژوئن	۲۷.۰۹	۳۵.۸	۳۰	۱۱
ژولای	۲۹	۳۸	۳۲	۱۷
آگوست	۲۷.۸	۳۴.۵	۲۹.۱	۱۶
سپتامبر	۲۵.۱۵	۳۱.۲	۲۵.۸	۱۵
اکتبر	۱۸.۶۱	۲۷.۵	۲۲.۳	۱۵
نوامبر	۱۳.۰۹	۱۸	۱۳	۱۴
دسامبر	۱۰.۸	۱۴.۷	۹.۸	۱۰

الگوی تشعشی شهر تهران نیز همانند دو شهر بیرجند و شیراز است. اگرچه دمای هوای میانگین دو در دو ماه اکتبر و سپتامبر تفاوت چندانی ندارد ولی کاهش مجموع تشعشع میانگین روزانه از ماه سپتامبر به ماه اکتبر قابل توجه است. نمودار شکل ۴-۳ توزیع تشعشع میانگین را در شهر تهران نشان می‌دهد.



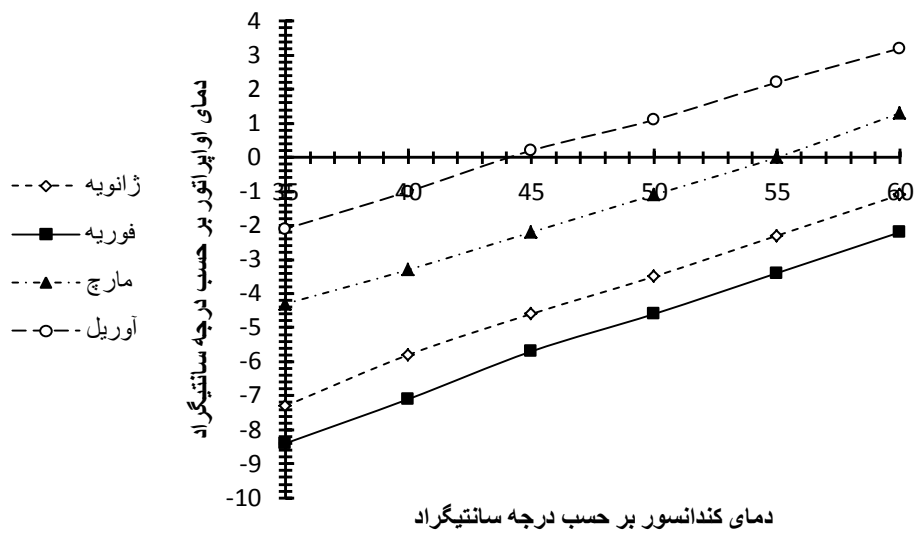
شکل ۴-۳: توزیع شدت تشعشع میانگین در واحد سطح در ماه‌های مختلف سال در تهران در نمودارهای شکل ۴-۳، شکل ۴-۱۶ و شکل ۴-۳۰ تفاوت‌هایی وجود دارد. برای تهران ماکزیمم

میانگین شدت تشعشع در ماه آگوست، در شیراز در ماه ژوئن و در بیرجند در ماه ژولای رخ داده و البته ماکزیمم شدت تشعشع در ساعت ۱۱.۳۰ ظهر که مقدار شدت تشعشع بیشینه است برای هر شهر در ماه متفاوتی رخ می‌دهد. برای این منظور نمودار شکل ۳۰ شدت تشعشع برای ساعات ۸.۳۰ تا ۱۱.۳۰ از ماه ژوئن تا سپتامبر در شهر تهران را نشان می‌دهد.

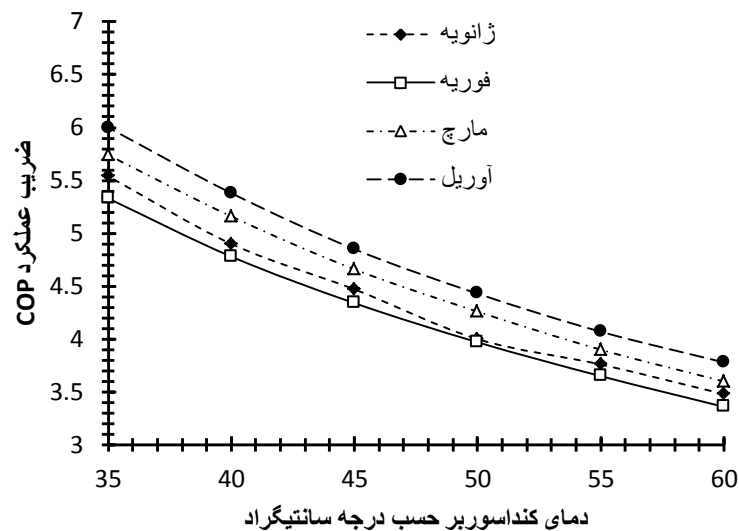


شکل ۴-۳۱: شدت تشعشع ماه‌های ژوئن تا سپتامبر بر حسب ساعات روز شهر تهران نمودار شکل ۴-۳۱ در نقاطی باهم برخورد دارند که نشان می‌دهد علاوه بر میانگین تشعشع روزانه عواملی مانند، زاویه عرض جغرافیایی، شدت تشعشع بر صفحه افقی، سهم تشعشع مستقیم و پراکندگی و... در میزان ماکزیمم شدت تشعشع تأثیر دارد بر این اساس در ساعت ۱۱.۳۰ ماه سپتامبر، شدت تشعشع شهر تهران 813 W/m^2 است.

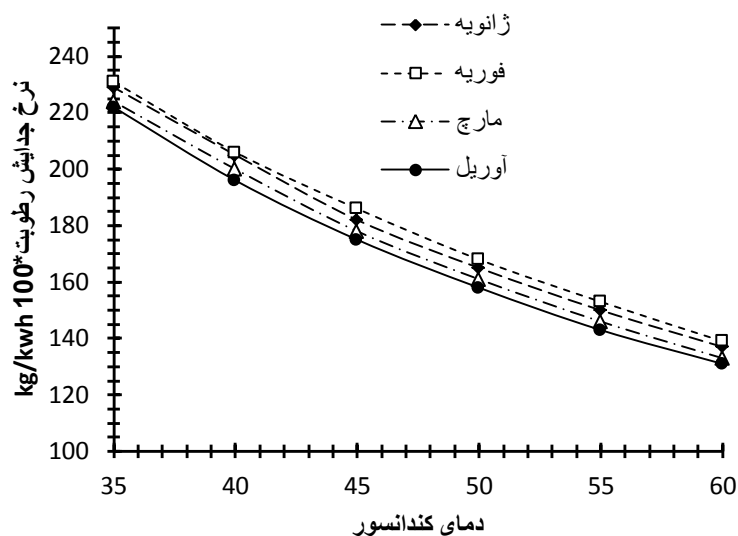
در نمودار شکل ۴-۳۲ تغییرات دمای کلکتور بر حسب دمای کندانسور، چهار ماه اول سال شهر تهران نمایش داده شده است. با توجه به اینکه میانگین شدت تشعشع در این ماه‌ها زیر 400 W/m^2 بوده، مقادیر دماهای بدست آمده در مبرد کلکتور نسبت به دو شهر دیگر پایین‌تر است. همچنین در ماه ژانویه مقادیر دما نسبت به ماه فوریه به علت بالاتر بودن شدت تشعشع در واحد سطح، بیشتر است.



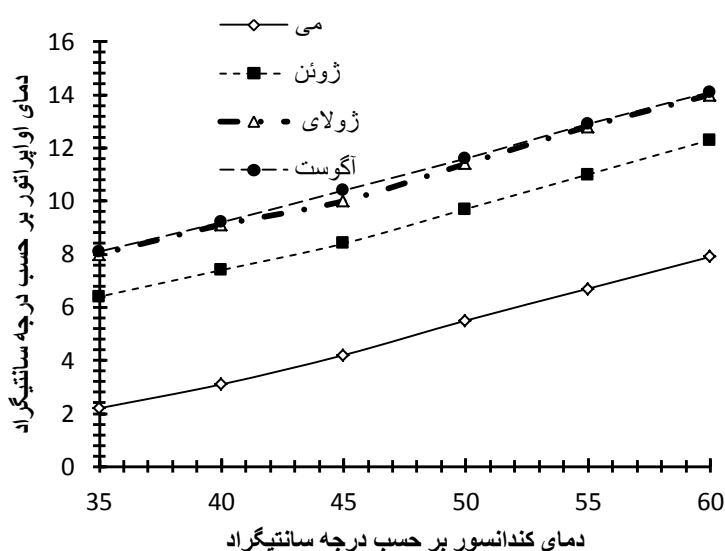
شکل ۳۲-۴: تغییرات دمای اواپراتور در مقابل کندانسور در چهار ماه اول سال میلادی شهر تهران نمودار شکل ۳۳-۴ نحوه تغییرات ضریب عملکرد با دمای کندانسور را نشان می‌دهد. روند کاهشی ضریب عملکرد با افزایش دمای کندانسور به علت بالا رفتن اختلاف دما در این دو مبدل حرارتی توجیه شده و افزایش کار ورودی به کمپرسور نیز سبب کاهش نرخ جدایش رطوبت می‌شود. نمودار شکل ۳۴-۴ تغییرات نرخ جدایش رطوبت با دمای کندانسور را نشان می‌دهد.



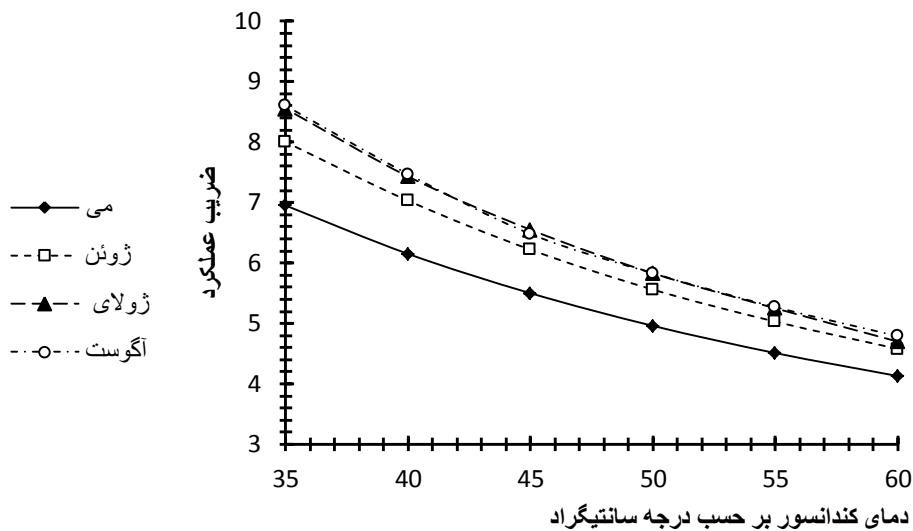
شکل ۳۳-۴: تغییرات ضریب عملکرد در مقابل دمای کندانسور چهار ماه اول سال میلادی شهر تهران



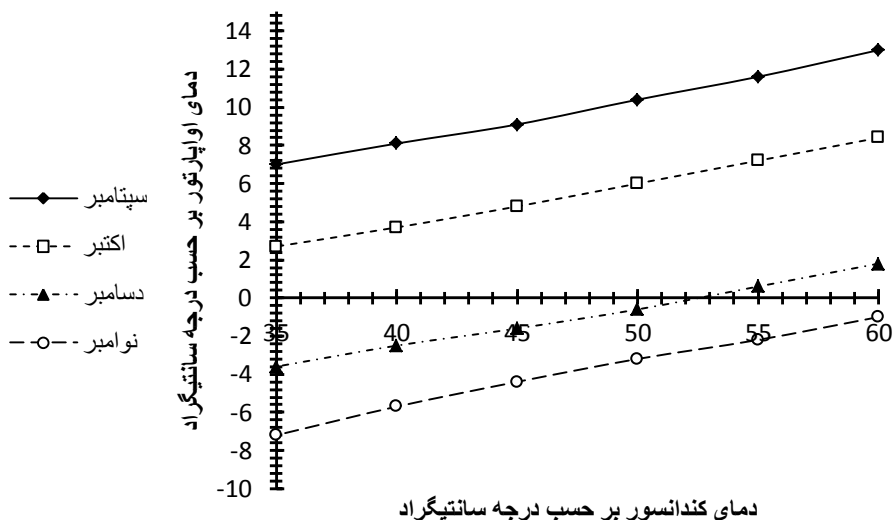
شکل ۴-۳۴: تغییرات نرخ جدایش رطوبت در مقابل دمای کندانسور چهار ماه اول سال شهر تهران در چهار ماه دوم سال نیز روند تغییرات ضریب عملکرد و دمای اواپراتور همانند دو شهر دیگر است. نزدیک بودن شدت تشعشع میانگین بر واحد سطح در دو ماه متوالی ژولای و اگوست در شهر تهران سبب نزدیک بودن مقادیر ضریب عملکرد خواهد شد. همچنین شدت تشعشع بر واحد سطح در ماه ژوئن در تهران از دو شهر دیگر کمتر است. نمودار شکل ۴-۳۵ تغییرات دمای مبرد کلکتور و نمودار شکل ۴-۳۶ تغییرات ضریب عملکرد را در چهارماه دوم سال نشان می‌دهد.



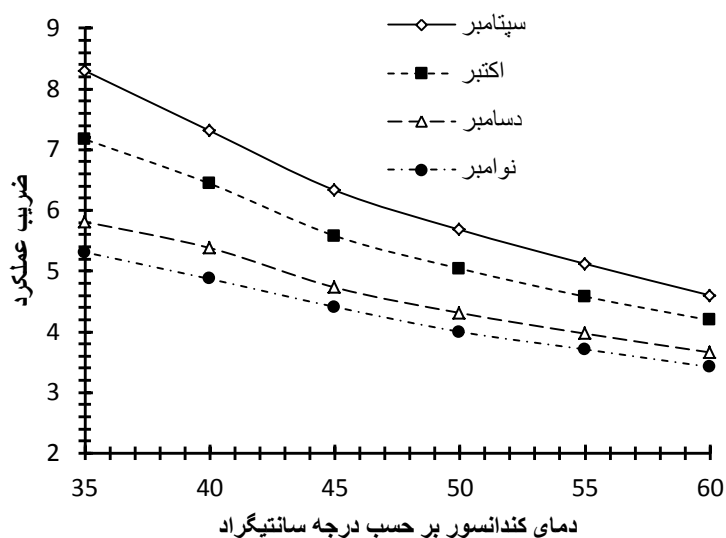
شکل ۴-۳۵: نمودار تغییرات دمای اواپراتور نسبت به دمای کندانسور چهار ماه دوم سال شهر تهران



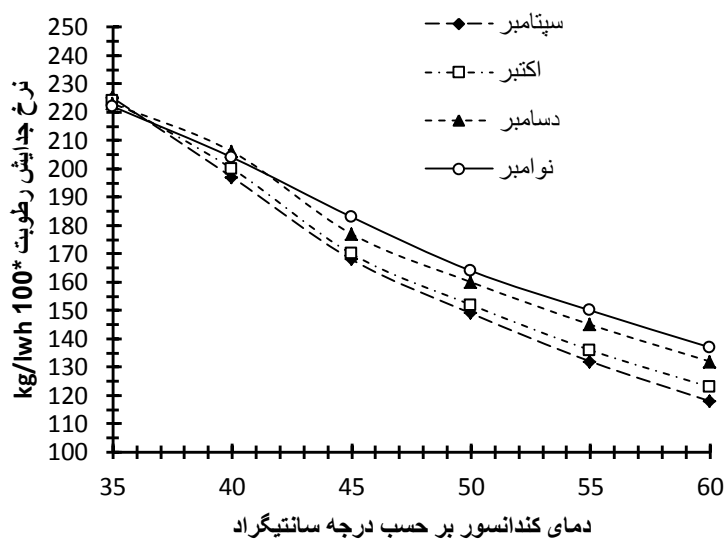
شکل ۴-۳۶: نمودار تغییرات ضریب عملکرد نسبت به دمای کندانسور چهار ماه دوم سال میلادی شهر تهران در چهار ماه سوم نیز مشابه بیرجند و شیراز شدت تشعشع بر واحد سطح با گذشت ماهها کاهش یافته و متعاقبا ضریب عملکرد و دماهای اوپراتور کاهش می‌یابد. نمودار شکل ۴-۳۷ تغییرات دمای اوپراتور نسبت به دمای کندانسور نشان می‌دهد. در ماه سپتامبر شدت تشعشع بر واحد سطح نسبت به دو شهر دیگر بیشتر است و به همین علت ضریب عملکرد و دماهای اوپراتور بیشتر است. نمودار شکل ۴-۳۸ تغییرات ضریب عملکرد را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳۷: تغییرات دمای اوپراتور-کلکتور بر حسب دمای کندانسور چهار ماه سوم سال شهر تهران



شکل ۴-۳۸: تغییرات ضریب عملکرد در مقابل دمای کندانسور چهار ماه سوم میلادی، شهر تهران نمودار شکل ۴-۳۹ نیز تغییرات نرخ جدایش رطوبت زدایی را نشان می‌دهد. این نمودار نیز همانند نمودارهای شکل ۴-۱۲ و شکل ۴-۲۵ تغییرات یکسانی دارد. نرخ جدایش رطوبت در زمستان اندکی بیشتر است.

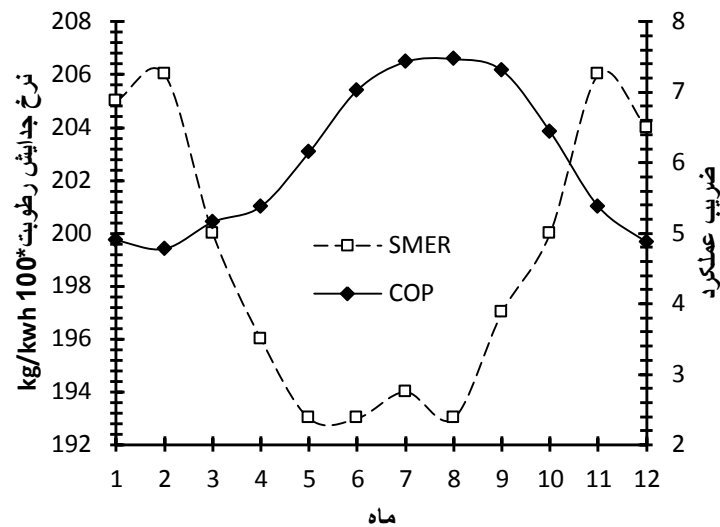


شکل ۴-۳۹: تغییرات نرخ جدایش رطوبت در مقابل دمای کندانسور چهار ماه سوم سال میلادی شهر تهران

۴-۵-۲ داده‌های خروجی بر اساس تشعشع ماکزیمم و عملکرد سالیانه

برای ارزیابی ضریب عملکرد سالیانه و نرخ جدایش رطوبت مطابق دمای کندانسور را 40°C در نظر گرفته و مطابق با نمودار شکل ۴-۴۰ ضرایب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت مقادیر آن را محاسبه

می‌کنیم.



شکل ۴-۴: تغییرات ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت در ماه‌های مختلف سال در دمای کندانسور ۴۰ درجه سانتیگراد

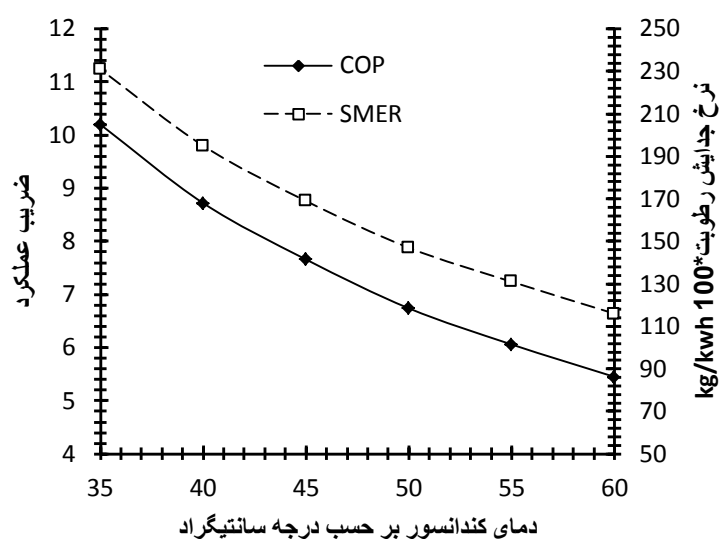
ماکزیمم دمای اواپراتور و ضریب عملکرد در تهران در ماه آگوست رخ می‌دهد. با آنکه شدت

تشعشع در ساعت ۱۱:۳۰ ماه سپتامبر $813 \frac{W}{m^2}$ است اما دمای بالاتر هوا در ماه آگوست سبب بیشتر

بودن ضریب عملکرد می‌شود. تغییرات ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت در ماه آگوست در

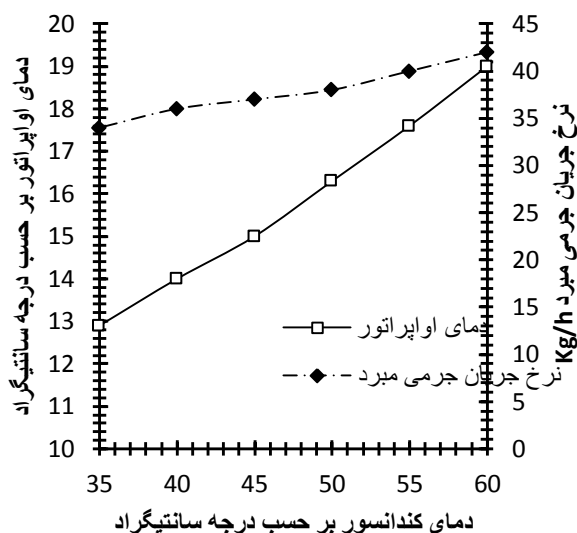
ساعت ۱۱:۳۰ (در این ساعت بیشترین تشعشع جذب شده در طول روز اتفاق می‌افتد) در نمودار

شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۴۱: تغییرات ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت در مقابل دمای کندانسور در ماه آگوست و ساعت ۱۱:۳۰ (بیشترین مقادیر ضریب عملکرد)

نمودار شکل ۴-۴۲ تغییرات دمای اواپراتور و نرخ جریان جرمی مبرد بر حسب دمای کندانسور در ساعت ماکزیمم شدت تشعشع بر واحد سطح (ساعت ۱۱:۳۰) را نشان می‌دهد. هرچه دمای اواپراتور بالاتر رود، حجم مخصوص مبرد کاهش پیدا کرده، که این مسأله سبب افزایش نرخ جریان جرمی مبرد، و متعاقباً کار کمپرسور افزایش پیدا کند.



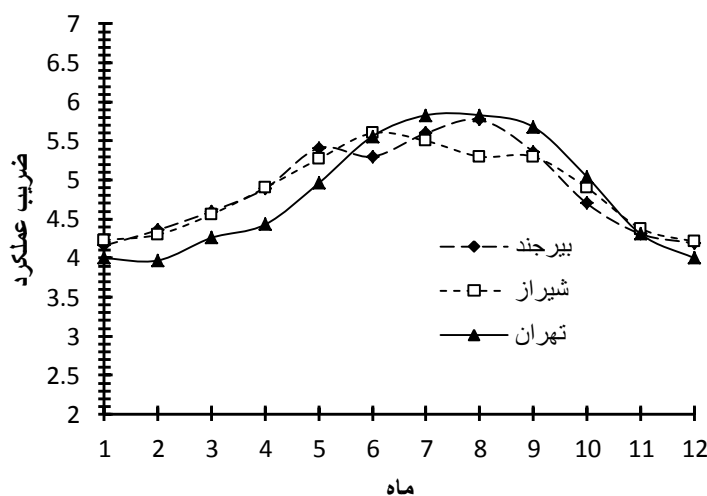
شکل ۴-۴۲: تغییرات نرخ جریان جرمی مبرد و دمای اواپراتور- کلکتور در مقابل دمای کندانسور در تهران، ماه آگوست و ساعت ۱۱:۳۰

۴-۶ مقایسه نتایج کلی سه شهر و تأثیرگذاری عوامل دیگر

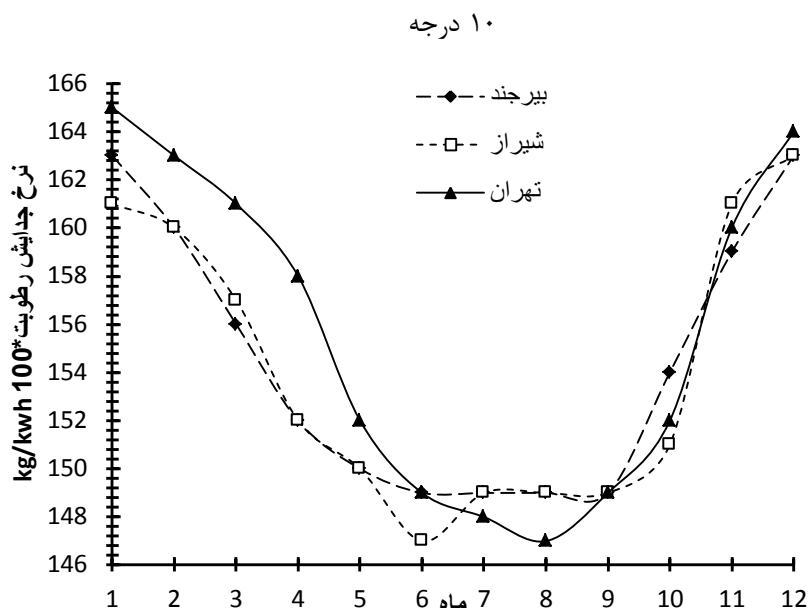
۴-۶-۱ مقایسه ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت در ماه‌های

گوناگون

مقادیر ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت برای تمامی ماه‌ها و سه شهر بیرجند، تهران و شیراز بررسی شد. برای اینکه اختلاف ضریب عملکرد و نرخ رطوبت زدایی در سه شهر باهم مقایسه شود برای دمای کندانسور 50°C و زاویه شیب کلکتور $\beta = 10^{\circ}$ نمودارهای شکل ۴-۴۳ و شکل ۴-۴۴ قابل ترسیم است. مطابق نمودار شکل ۴-۴۳ در ۵ ماه سال شهر تهران با توجه به اقلیم آب و هوایی خاص خود ضرایب عملکرد پایین‌تری نسبت به دو شهر دیگر دارد. در اواسط پاییز تهران ضریب عملکردهای بالاتری نسبت به دو شهر دیگر داراست. همانطور که در نمودار ذکر شده مشهود است شیراز تغییرات نسبتاً پایین‌تری در ضریب عملکرد دارد. در نمودار شکل ۴-۴۴ با توجه به اینکه کار ورودی به کمپرسور در داده‌های شهر تهران کمتر است در ۵ ماه اول سال میلادی نرخ جدایش رطوبت اندکی از دو شهر دیگر بالاتر، و در اواسط فصل پاییز از دو شهر دیگر به علت مشابه پایین‌تر است.



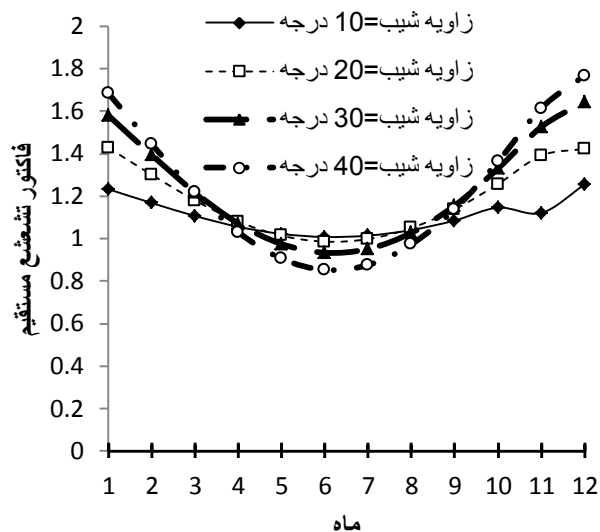
شکل ۴-۴۳: ضریب عملکرد سه شهر تهران، بیرجند و شیراز در دمای کندانسور 50°C درجه سانتیگراد زاویه شیب کلکتور



شکل ۴-۴: نمودار تغییرات نرخ رطوبت زدایی بر اساس ماه‌های میلادی در سه شهر تهران، شیراز و بیرجند در دمای کندانسور و زاویه شیب ۱۰ درجه

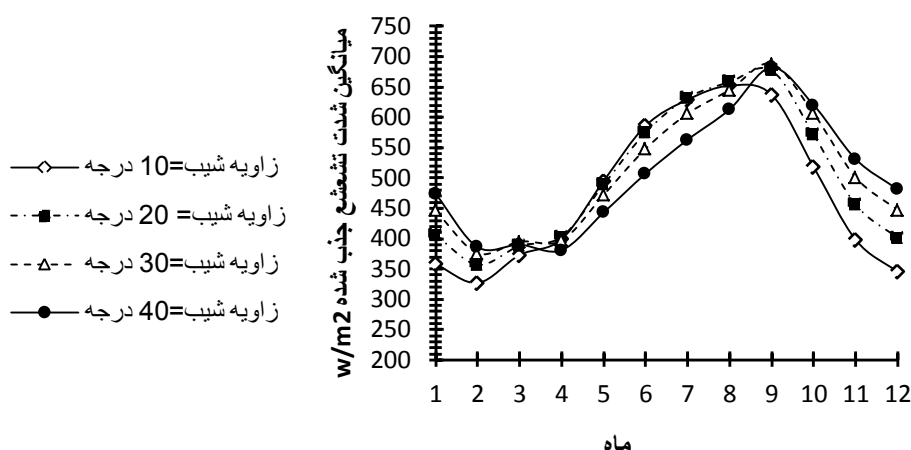
۴-۶-۲ تأثیر افزایش زاویه شیب کلکتور

در این پایان‌نامه زاویه β برابر ۱۰ درجه در نظر گرفته شد. دلیل این انتخاب افزایش شدت تشعشع جذب شده بر واحد سطح در ماه‌های میانی سال بوده است. فاکتور تشعشع مستقیم که مطابق با معادله (۳-۵۶) بدست آمده، در فصول میانی با کاهش زاویه شیب کلکتور افزایش و در ماه‌های ابتدایی سال روند کاهشی دارد. با افزایش زاویه شیب کلکتور این فاکتور در ماه‌های فصل زمستان و اواخر پاییز افزایش یافته، سبب فزونی یافتن شدت تشعشع بر واحد سطح بر اساس معادله (۳-۸۴) خواهد شد. نمودار شکل ۴-۴۵ تغییرات فاکتور تشعشع مستقیم را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود R_b در ماه‌های دسامبر و ژانویه با افزایش زاویه شیب کلکتور افزایش می‌یابد، در ماه‌های میانی سال مقدار R_b با کاهش زاویه شیب β روند صعودی دارد. این مقادیر برای شهر بیرجند ساعت ۱۱.۳۰ در نمودار شکل ۴-۴۵ ترسیم شده است و برای دو شهر دیگر مشابه همین شکل است.

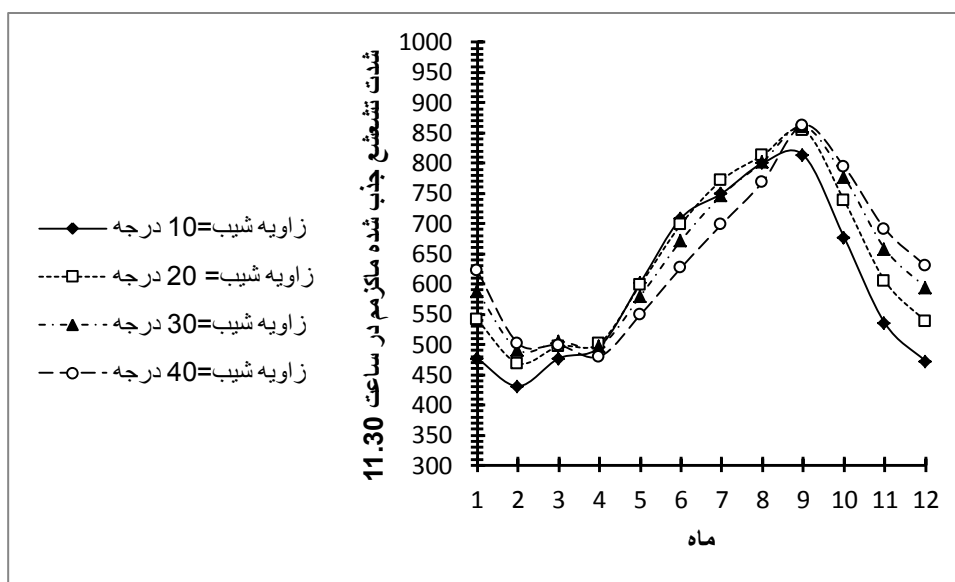


شکل ۴-۴۵: نمودار تغییرات فاکتور تشعشع مستقیم بر اساس ماه‌های میلادی در شهر بیرجند ساعت ۱۱:۳۰

در نمودار شکل ۴-۴۶ میانگین شدت تشعشع برای زوایای مختلف شیب کلکتور و در نمودار شکل ۴-۴۷ ماکزیمم شدت تشعشع جذب شده (ساعت ۱۱:۳۰) بر واحد سطح برای تهران ترسیم شده است. براساس تغییرات R_b مقادیر متفاوت شدت تشعشع جذب شده در ماه‌های سال قابل مشاهده است. اثر تغییر زاویه شیب کلکتور در ماه‌های ابتدایی و انتهایی کاملاً بارز بوده و در ماه‌های میانی در زاویه شیب پایین مقادیر شدت تشعشع بر واحد سطح بیشتر است. برای مثال در ماه دسامبر اختلاف دو مقدار شدت تشعشع برای زوایای شیب ۱۰ درجه و ۴۰ درجه حدود ۱۳۱ وات بر متر مربع اختلاف دارد که مقدار قابل توجهی است.

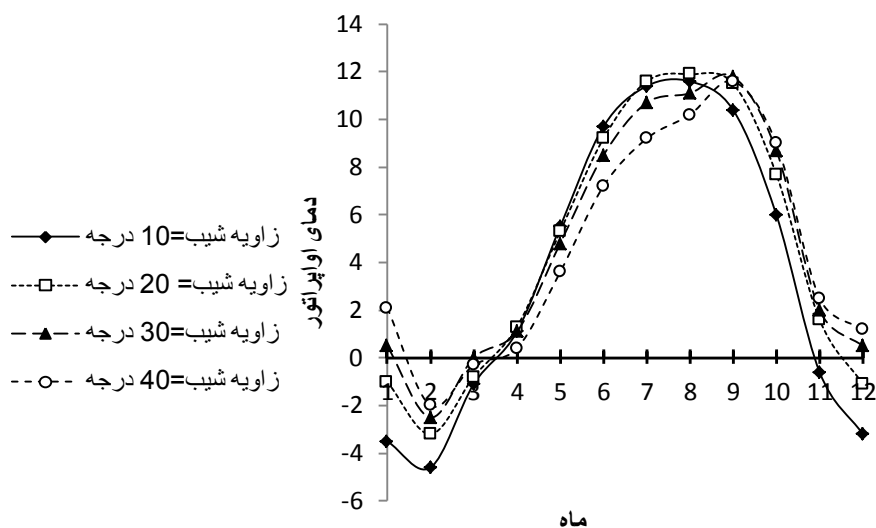


شکل ۴-۴۶: نمودار تغییرات میانگین شدت تشعشع جذب شده بر واحد سطح شهر تهران بر اساس ماه‌های سال

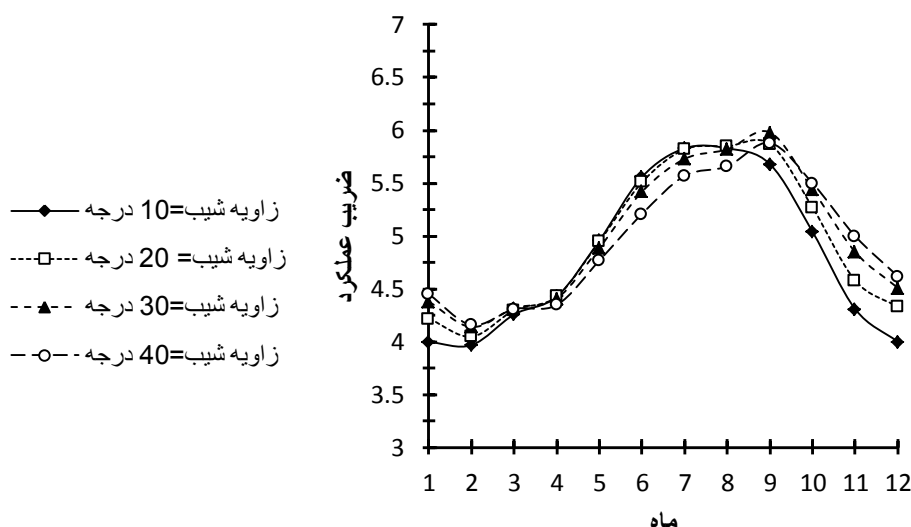


شکل ۴-۴۷: نمودار تغییرات ماکزیمم شدت تشعشع جذب شده بر واحد سطح در شهر تهران بر اساس ماه‌های سال

نمودار شکل‌های شکل ۴-۴۸ و شکل ۴-۴۹ مقادیر دمای اوپراتور و ضریب عملکرد بر اساس ماه‌های سال و دمای کندانسور 50°C را نشان می‌دهد. بنا به علل ذکر شده مقادیر دما و ضریب عملکرد در ماه‌های ابتدایی و انتهایی با افزایش زاویه شیب کلکتور افزایش و در ماه‌های میانی سال کاهش می‌یابد. ماکزیمم ضریب عملکرد در ماه سپتامبر و زاویه شیب $\beta = 30^{\circ}$ رخ می‌دهد. (ماکزیمم ضریب عملکرد در $\beta = 10^{\circ}$ در ماه آگوست رخ داده بود)



شکل ۴-۴: تغییرات دمای اوپراتور در ماه‌های گوناگون در شهر تهران، زوایای شیب مختلف، دمای کندانسور 50°C بر اساس شدت تشعشع میانگین بر واحد سطح



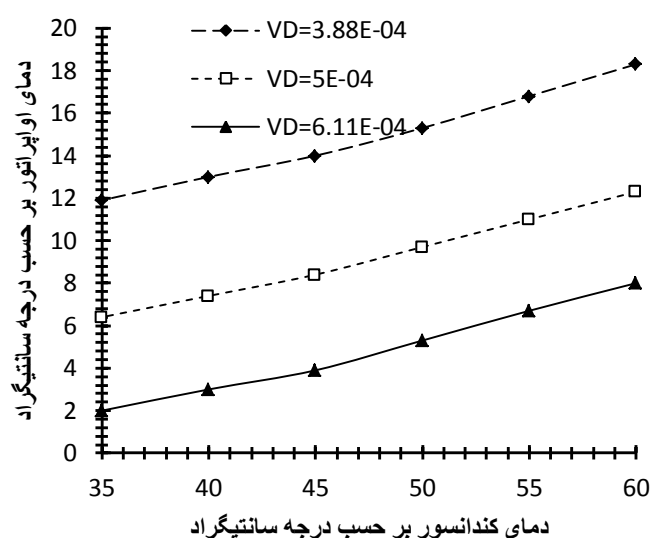
شکل ۴-۴: نمودار تغییرات ضریب عمکرد در ماه‌های گوناگون در شهر تهران، زوایای شیب مختلف، دمای کندانسور 50°C بر اساس شدت تشعشع میانگین بر واحد سطح
 نرخ جدایش رطوبت تغییر قابل ملاحظه‌ای نخواهد کرد. افزایش فشار اشباع در دماهای اوپراتور بالاتر سبب افزایش کار ورودی به کمپرسور و متعاقباً کاهش اندک نرخ رطوبت زدایی می‌شود البته تغییرات دمای اوپراتور اثر چندان بالایی در فشار اشباع نخواهد داشت

۳-۶-۴ تأثیر نرخ جابه‌جایی حجمی کمپرسور

در نمودارهای این پایان‌نامه مقدار جابه‌جایی حجمی کمپرسور را $5 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$ در نظر گرفته

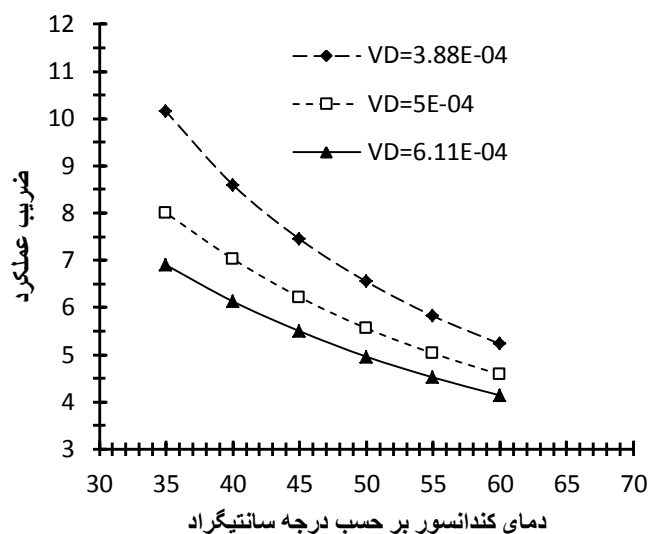
شد مقادیر نسبت نرخ جابه‌جایی کمپرسور معمولاً در بازه مقابل قرار می‌گیرد. $0.5 < \frac{VD}{Ac} < 1.1$ با سطح کلکتور ۲ متر مربع این نسبت مقدار ۰.۹ متر بر ساعت خواهد شد. برای بررسی دقیق‌تر مقادیر نسبت نرخ جابه‌جایی کمپرسور به سطح کلکتور ۰.۷ و ۱.۱ بررسی می‌شود.

نمودار شکل ۴-۵ نحوه تغییرات دمای اواپراتور را در دمای کندانسور در سه حالت $VD=5e-04$ ، $VD=6.11e-04$ و $VD=3.88e-04$ نشان می‌دهد. این نمودار در شدت تشعشع میانگین ماه ژوئن شهر تهران ترسیم شده است.

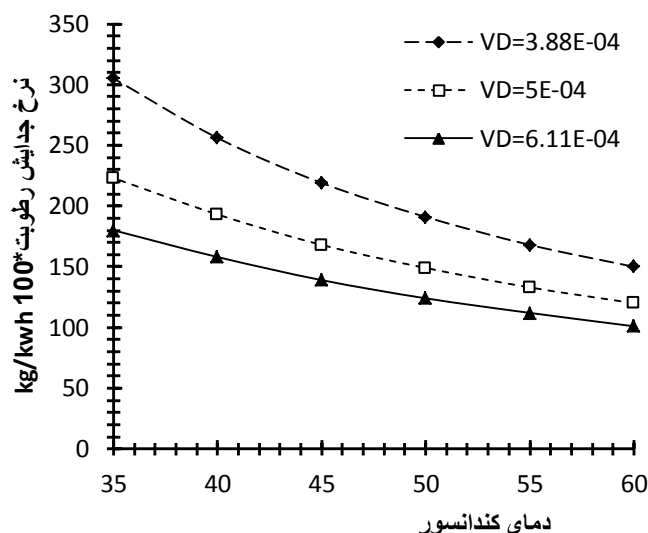


شکل ۴-۵: تغییرات دمای اواپراتور نسبت به دمای کندانسور در نرخ جابه‌جایی‌های مختلف کمپرسور در شدت تشعشع میانگین ماه ژوئن در شهر تهران

کم شدن نرخ جابه‌جایی حجمی کمپرسور سبب کاهش نرخ جریان جرمی مبرد، بر اساس معادله (۳-۲۳) در روش سعی و خطا و افزایش دمای اواپراتور می‌شود. از طرفی با ثابت بودن آنتالپی مبرد در کندانسور، دمای بالاتر قسمت سرد سیکل باعث افزایش اختلاف آنتالپی نقاط (۷) و (۲) در شکل ۳-۲ می‌شود. نهایتاً بار حرارتی اواپراتور افزایش یافته و از با کاهش نرخ جریان جرمی مبرد، کار ورودی به کمپرسور کمتر شود. این عوامل در نهایت سبب افزایش ضریب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت خواهد شد. نمودار شکل ۴-۵۱ تغییرات ضریب عملکرد و نمودار شکل ۴-۵۲ نرخ تغییرات رطوبت زدایی مطابق با شرایط مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵۱: نمودار تغییرات ضریب عملکرد نسبت به دمای کندانسور در نرخ جابه‌جایی‌های مختلف کمپرسور در شدت تشعشع میانگین ماه ژوئن در شهر تهران



شکل ۴-۵۲: نمودار تغییرات رطوبت‌زدایی نسبت به دمای کندانسور در نرخ جابه‌جایی‌های مختلف کمپرسور در شدت تشعشع میانگین ماه ژوئن در شهر تهران

۴-۷ صحت سنجی الگوریتم و داده‌ها

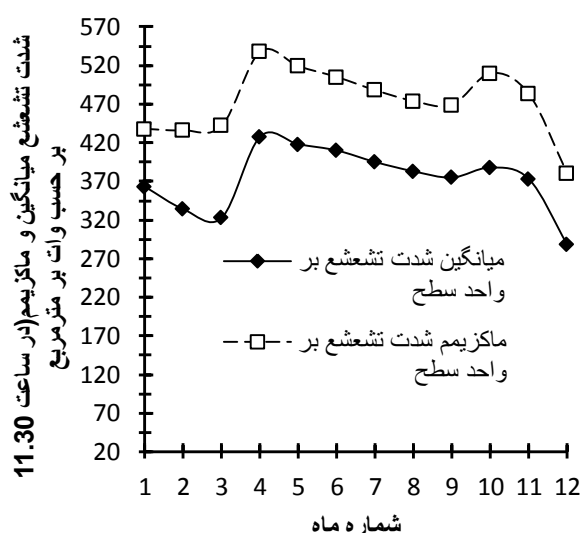
برای آنکه صحت الگوریتم نشان داده شود، از مرجع [۴۱] استفاده شده، و ضرایب عملکرد را برای این منطقه خاص را بدست می‌آوریم. شهر نولفورک^۱ شهری ساحلی در ایالت^۲ ویرجینیا^۳ است. برای

^۱ -Nolfork

^۲ -state

^۳ -virginia

آنکه بتوانیم شدت تشعشع بر واحد سطح در ساعات گوناگون را به دست بیاوریم از داده‌های آب و هوایی شهر آتلانتا^۱ واقع در جنوب شرقی ایالات متحده استفاده خواهیم کرد. (نزدیکترین شهر با داده‌های آب و هوایی مشابه با نولفورک) مطابق مرجع [۴۱] زاویه شیب کلکتور ۳۶.۹ درجه در نظر گرفته شده است که سبب کاهش نوسانات شدت تشعشع در واحد سطح در طول یک سال خواهد شد. با تقریب نزدیکی دو شهر مذکور نمودارهای شدت تشعشع ماکزیمم و میانگین قابل حصول است. نمودار شکل ۵۱ توزیع شدت تشعشع میانگین و ماکزیمم بر واحد سطح در شهر آتلانتا را نشان می‌دهد.



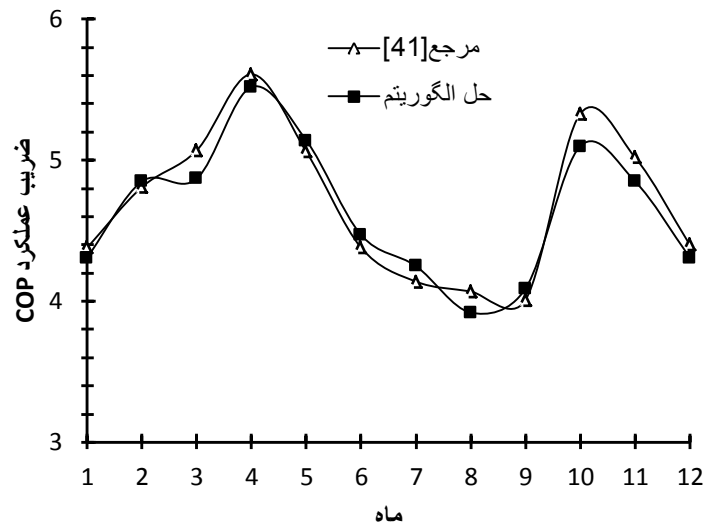
شکل ۴-۵۳: نمودار توزیع شدت تشعشع جذب شده بر واحد سطح میانگین و ماکزیمم شدت تشعشع

بعد از محاسبه این مقادیر می‌توان ضریب عملکرد را برآورد کرد. نمودار **Error! Reference**

source not found. ضرایب عملکرد را برای دمای کندانسور ۶۰ درجه سانتیگراد و تشعشع میانگین

جذب شده نشان می‌دهد.

¹ -Atlanta



شکل ۴-۵: ضرایب عملکرد در طول سال در تحقیق حاضر و مرجع [۴۱] در دمای کندانسور ۶۰ درجه و شدت تابش میانگین

همانگونه که قابل مشاهده است ضرایب عملکرد تقریباً با هم برابر هستند. عوامل خطا می‌تواند در تقریب نزدیکی دو شهر و مافوق گرم بودن مبرد در اوپراتور (مادون سرد بودن در کندانسور) و البته در نظر نگرفتن بازدهی حجمی کمپرسور در تحقیق مذکور باشد. با توجه به موقعیت جغرافیایی این شهر و البته بالا بودن زاویه شیب کلکتور ضرایب عملکرد در این شهر در ماه‌های زمستان نزدیک به ماه‌های میانی هستند سال هستند. در جدول ۴-۴ خطای نسبی در محاسبه ضریب عملکرد محاسبه شده است.

جدول ۴-۴: درصد تغییرات خطای نسبی برای محاسبه ضریب عملکرد در شهر آتلانتا

شماره ماه	مرجع ۴۱	حل الگوریتم	میزان خطای نسبی بر حسب درصد
۱	۴.۳۸	۴.۳۱	۲
۲	۴.۸۱	۴.۸۵	۰.۸۵
۳	۵.۰۷	۴.۸۷	۴

۴	۵.۶۱	۵.۵۲	۱.۶
۵	۵.۰۶	۵.۱۴	۱.۵۸
۶	۴.۳۸	۴.۴۷	۲.۰۵
۷	۴.۱۴	۴.۲۵	۲.۶
۸	۴.۰۷	۳.۹۲	۳.۶۸
۹	۴.۰۱	۴.۰۹	۱.۹
۱۰	۵.۳۳	۵.۱	۴.۳۱
۱۱	۵.۰۲	۴.۸۵	۳.۳۸
۱۲	۴.۴	۴.۳۱	۲.۰۴

۴-۸ ملاحظات انرژی و تحلیل اقتصادی سیکل

مصرف انرژی خشک کردن در ایالات متحده، انگلستان و فرانسه به ترتیب $10^9 * 1600$ ، $10^9 * 128$ و $10^9 * 168$ مگاژول در سال گزارش شده است. با رشد سریع و جهانی اقتصاد صنعتی، انرژی مورد نیاز خشک کردن گرمایی افزایش یافته است که این خود در طول زمان افزایش اجتناب ناپذیر تولید گازهای گلخانه‌ای که پدیده‌ای نامطلوب برای محیط زیست است می‌شود. قیمت نفت در سال‌های اخیر افزایش یافته است که این خود در طول زمان باعث افزایش اجتناب‌ناپذیر تولید گازهای گلخانه‌ای که پدیده‌ای نامطلوب برای محیط زیست است می‌شود. در این میان پمپ‌های حرارتی به دلیل استفاده در دماهای پایین‌تر و ایجاد رایحه بهتر در محصولات غذایی از اهمیت بالایی برخوردار است.

نتایج حاصل شده از نصب سیستم‌های پمپ حرارتی صنعتی برای جمع‌آوری شبکه انرژی در یک کارخانه نشان می‌دهند که استفاده از پمپ‌های حرارتی برای بازیافت گرمای اضافی، مقدار $1.6 *$

10^{16} ژول انرژی ناشی از سوختن سوخت در بویلرها و فرآیندهای گرمایش را صرفه‌جویی می‌کند که معادل صرفه‌جویی ۴ میلیارد دلاری در سال است.

سرمایه‌گذاری در فرآیند خشک کردن نیازمند اطلاعات کافی مربوط به ملاحظات اقتصادی است. هزینه‌های اجرایی و زمان سوددهی توابع مهم اقتصادی به‌شمار می‌روند. اهمیت این توابع به همان اندازه‌ای است که پارامترهای مختلف در نرخ رطوبت‌زدایی در خشک‌کن مؤثر هستند هزینه‌های اصلی فرآیند به دو بخش مهم تقسیم می‌شوند.

هزینه‌های ثابت: این هزینه‌ها به مقدار رطوبت جدا شده از ماده مرتبط نیست. قیمت مربوط به خشک‌کن و سایر اجزاء سیکل مربوط به این هزینه‌ها بوده و شامل تقاضای انرژی برق نیز برای مصرف کمپرسور خواهد شد.

هزینه‌های متغیر: این هزینه‌ها با افزایش عمر خشک‌کن زیاد شده و شامل هزینه‌های نگهداری و تعمیر خواهد شد. هزینه‌های واقعی وابسته به کارایی خشک‌کن و هزینه‌های انرژی است. در نهایت هزینه‌های مربوط به خشک‌کن و تحلیل اقتصادی فرآیند مطابق با برابری زیر بدست می‌آید

مقدار مقدار هزینه بر جرم ماده خشک شده برابر است با مجموع هزینه‌های متغیر و ثابت بر جرم ماده خشک‌شده در طول یک سال. برای برآورد هزینه‌های ثابت و متغیر از جدول ۴-۵ استفاده می‌شود.

جدول ۴-۵: هزینه‌های ثابت برای خشک‌کن پمپ حرارتی به کمک انرژی خورشیدی

هزینه اول مربوط به سیستم انبساط خورشیدی با سطح دو متر مربع [۴۱]	$1155 * 10^5$ ریال
هزینه نصب [۴۱]	$6600 * 10^4$ ریال
هزینه نگهداری از تجهیزات [۴۱]	$132 * 10^4$ ریال
هزینه خشک‌کن [۴۸]	$6600 * 10^4$ ریال
هزینه رطوبت‌زدای هوا [۴۹]	$4000 * 10^4$ ریال

هزینه میرد R134 [۵۰]	$19 * 10^5$ ریال
مجموع هزینه ها	$2907 * 10^5$ ریال

تخمین هزینه‌ها: مطابق با برآورد صورت گرفته در بخش‌های قبل هر روز مقدار ۴ کیلوگرم گندم در مدت ۸ ساعت از محتوای رطوبت تعادلی ۹۰ درصد به ۱۰ می‌رسد. بنابراین در طول یک سال مقدار ۱۴۴۰ کیلوگرم گندم به این مقدار محتوای رطوبت خواهد رسید. مقدار توان کمپرسور به طور میانگین در طول روز ۲ کیلووات ساعت در نظر گرفته می‌شود که برای یک سال معادل با ۷۶۵ کیلووات ساعت است.

هزینه های متغیر: طبق تعرفه شرکت برق در سال ۹۴ هزینه هر کیلووات ساعت برق مصرفی معادل با ۴۳۴ ریال است. (مقدار برق مصرفی کمپرسور در طول یک ماه حدود ۱۶۰ کیلووات ساعت خواهد شد.) بنابراین در طول یک سال هزینه مصرفی برق کمپرسور مطابق با معادله زیر بدست می‌آید.

$$\text{ریال} \frac{434}{\text{کیلووات ساعت}} * 765 \text{ کیلووات ساعت} = 332010 \text{ ریال}$$

اگر بر اساس هزینه های عملکردی یا همان توان کمپرسور مقدار جرم خشک شده را محاسبه کنیم مقدار ۲۲۷ ریال برای یک کیلوگرم گندم در سال هزینه عملکردی نیاز است.

برای محاسبه مقدار جرم خشک شده در سال اول مجموع هزینه‌های جدول ۱ را با هم جمع می‌کنیم. این مقدار تقریباً ۲۹ میلیون تومان است. بار جرمی در طول یک سال معادل با ۱.۴۴ تن گندم بوده و هزینه یک گرم گندم خشک شده بر طبق هزینه‌های اولیه مقدار ۱۹۸.۶ ریال است. (هزینه های عملکردی در این تحلیل در مقابل هزینه‌های اولیه بسیار ناچیز است) سیکل طراحی شده برای گرم کردن آب نیز مورد استفاده قرار خواهد گرفت. جدول ۴-۶ بر اساس دماهای ورودی خشک‌کن متغیر و رطوبت نسبی ثابت ۲۰ درصد در رطوبت زدای هوا بدست خواهد آمد. مقدار

آنتالپی هوا از معادله (۱۵-۳) حاصل شده است.

جدول ۴-۶: محاسبه بار حرارتی سالیانه برای مصرف آب گرم کن در سیکل انبساط مستقیم خورشیدی

دمای ورودی	نرخ جریان جرمی هوا بر حسب کیلوگرم بر ثانیه	آنتالپی ورودی رطوبت زدا(کیلوژول بر کیلوگرم)	آنتالپی خروجی رطوبت زدا(کیلوژول بر کیلوگرم)	بار حرارتی سالیانه بر حسب مگاوات ساعت
۲۵	۰.۰۵۳۵	۳۴.۹	۱۱.۳	۳.۶۷۹
۳۰	۰.۰۴۶۶	۴۳.۸	۱۹.۱	۳.۳۵۸
۳۵	۰.۰۴۱۴	۵۳.۳	۲۷.۴	۳.۱۲۴
۴۰	۰.۰۳۶۸	۶۴.۰۳	۳۷.۱	۲.۹۳۴
۴۵	۰.۰۳۳۵	۷۱.۷	۴۱.۷	۲.۸۹۱

بار حرارتی حدود ۳ مگاوات ساعت از این سیکل در طول یک سال قابل حصول است. در بازه زمانی ۸ ساعت در طول روز انرژی خورشیدی چیزی حدود ۲.۸ مگاوات ساعت در طول سال انرژی پاک تولید خواهد کرد. (به طور میانگین در هر ساعت ۱۰۰۰ وات انرژی مفید در نظر گرفته شده است.)

۴-۸-۱ نتیجه گیری ملاحظات اقتصادی

یکی از دلایل مهم انتخاب خشک کن های پمپ حرارتی و سایر مکانیزم های مشابه صرفه جویی در مصرف انرژی است. یکی از نکاتی که باید به آن توجه داشت عایق بودن خشک کن است. خشک کردن عموماً شامل برداشت رطوبت از سطح و درون جسم می شود. هر دو نوع برداشت رطوبت، به مکانیزم های مختلف انتقال گرما و جرم بستگی دارد. خشک کن های رایج، شرایط عملیاتی ثابتی دارند که برای برداشت رطوبت سطحی مناسب اند ولی برای برداشت رطوبت داخلی جسم مناسب

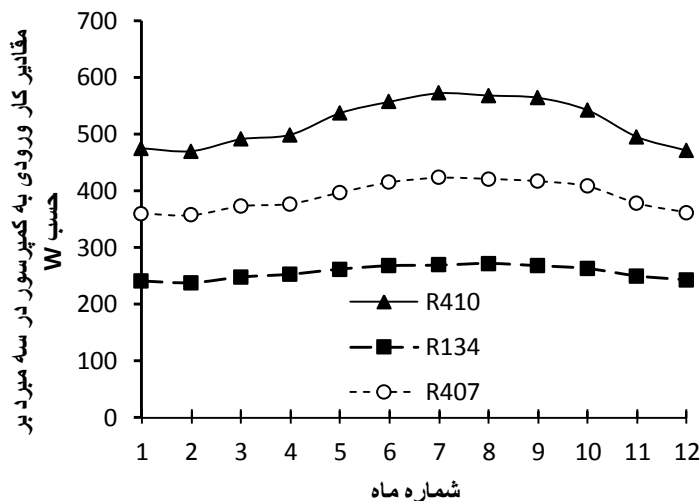
نیستند. پیشرفت‌های اخیر نشان می‌دهد که برای صرفه‌جویی در انرژی می‌توان از روش‌های خشک کردن متناوب مانند خشک‌کن پمپ حرارتی به کمک انرژی خورشیدی استفاده کرد.

یکی از دیگر از مواردی که می‌توان مورد توجه ویژه قرار داد این است که سیکل انبساط مستقیم خورشیدی دی اکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن داربه عنوان گازهای سمی در اتمسفر تولید نمی‌کند. در برخی از خشک‌کن‌ها استفاده از سوخت‌های فسیلی همچنان رواج دارد که سهامداران این مجموعه‌ها باید جریمه ناشی از تولید اکسیدهای نیتروژن دار و تولید سایر گازهای سمی را بپردازند. به عنوان مثال در آخرین برآورد در سال ۲۰۰۴ در مقیاس جهانی ۱۵ تراوات انرژی مصرف شده که ۸۶.۵ درصد آن ناشی از سوخت‌های فسیلی است. سطح دی اکسیدکربن نسبت به سال ۱۷۵۰ افزایش ۳۱ درصدی داشته است. استفاده از این نوع خاص سیکل در فرآیند گرم کردن آب و خشک کردن دستاورد مفید و کارآیی قابل توجهی در ملاحظات اقتصادی خواهد داشت. با اینکه هزینه اولیه این نوع سیکل بالاست اما خشک کردن و رطوبت زدایی حدود ۱.۵ تن گندم و حدود ۳ مگاوات ساعت ظرفیت حرارتی برای گرم کردن آب (در سال اول) می‌تواند بخش اعظمی از سرمایه اولیه را جبران کند. با توجه به اینکه طول عمر مفید سیکل نیز چیزی حدود ۲۰ سال برآورد شده این نوع مکانیزم می‌تواند سود گزافی به سرمایه‌گذاران انرژی ارائه دهد. بازگشت سرمایه در انواع مکانیزم‌های خشک‌کن اغلب از دو ماه تا دو سال متغیر است.

۴-۹ استفاده از مبردهای گوناگون و تحلیل کارآیی سیکل

دو مبرد R410A و R407c هر دو فاکتور تخریب لایه اوزون صفر را دارا هستند در عین حال قابلیت گرم کردن گازهای گلخانه‌ای آنها بیشتر از مبرد R134 است. برای بررسی خواص مبرد آزئوتروپیک از جداول مخصوص به این مبرد استفاده است. برای مقایسه ضرایب عملکرد و نرخ جدایش رطوبت از تشعشع و دمای هوای میانگین شهر تهران، دمای کندانسور ۵۰ درجه سانتیگراد استفاده شده است. در نمودار ۴-۵۵ کار ورودی به کمپرسور در سه مبرد مقایسه شده است. فشار اشباع مبرد

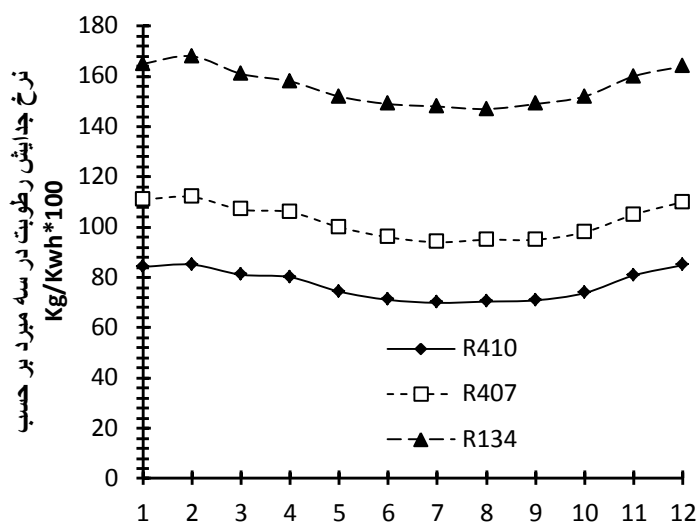
R134 در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد مقدار ۱۳۱۹ کیلوپاسکال، در مبرد R410A ۳۰۵۱ کیلوپاسکال [۵۱] و در مبرد R407C مقدار ۲۱۸۵ کیلوپاسکال است. دماهای اوپراتور بدست آمده با توجه به شرایط موجود در R410a حدود ۲۱- درجه سانتیگراد در ماه های سردتر تا ۸- درجه در ماه های گرمتر تغییر می کند. مقادیر متناظر در مبرد R407c در رنج ۷.۵- تا ۴ درجه سانتیگراد بدست آمده است. بالاتر بودن فشار اشباع سبب افزایش کار ورودی به کمپرسور شده و نرخ رطوبت زدایی کاهش می یابد. همچنین ظرفیت حرارتی بالاتر در اوپراتور باعث افزایش ضریب عملکرد در مبرد R134 نسبت به دو مبرد آزئوتروپیک دیگر شده است.



شکل ۴-۵۵: مقادیر کار ورودی به کمپرسور در دمای کندانسور ۵۰ درجه سانتیگراد و شرایط میانگین آب و هوایی در تهران در سه مبرد گوناگون

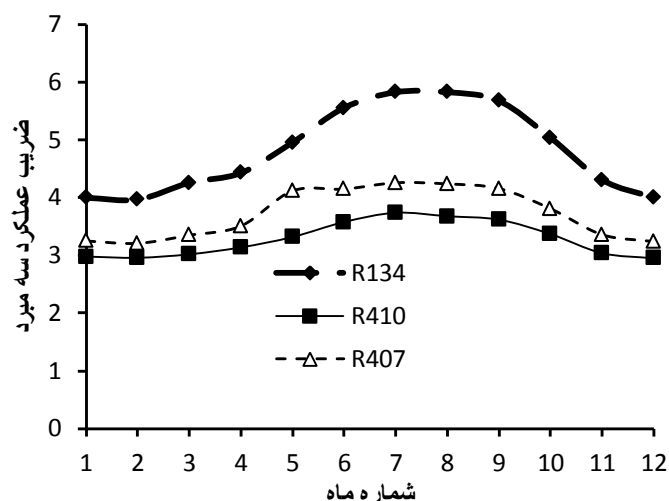
نمودار شکل ۴-۵۶ تغییرات نرخ رطوبت زدایی با در نظر گرفتن پارامترهای مشابه در خشک کن را نشان می دهد. افزایش کار کمپرسور در مبردهای آزئوتروپیک نسبت به مبرد R134 باعث شده نرخ رطوبت زدایی در مبرد R134 بیشتر باشد. ذکر این نکته خالی از لطف نیست که افزایش دما در اوپراتور در مبرد R134 به ازاء هر درجه سانتیگراد تقریباً ۰.۶-۰.۸ کیلوژول بر کیلوگرم اضافه می شود در حالی که برای مبرد R410 افزایش آنتالپی به ازاء هر درجه سانتیگراد تقریباً مقدار ۰.۴ کیلوژول بر کیلوگرم تغییر می کند. دمای بالاتر مبرد R134 در اوپراتور و شرایط یکسان سبب افزایش ضریب

عملکرد این مبرد نسبت به دو مبرد دیگر شده است. افزایش ضریب عملکرد در مبرد R134 نسبت به مبرد R410A تقریباً ۲۰ الی ۲۷ درصد و نسبت به مبرد R407c افزایش ضریب عملکرد چیزی حدود ۱۷ تا ۲۴ درصد خواهد بود.



شکل ۴-۵۶: نرخ رطوبت زدایی در ماه‌های گوناگون شهر تهران با دمای کندانسور ۵۰ درجه سانتیگراد و داده‌های آب و هوایی میانگین در سه مبرد گوناگون

نمودار ۴-۵۷ تغییرات ضریب عملکرد حسب ماه‌های گوناگون برای شهر تهران و داده‌های میانگین حاصل شده است.



شکل ۴-۵۷: نمودار ضریب عملکرد بر حسب ماه‌های مختلف در شهر تهران و داده‌های میانگین در سه مبرد گوناگون و دمای کندانسور ۵۰ درجه سانتیگراد

فصل پنجم - جمع بندی و پیشنهادها

جمع بندی نتایج

در این پایان نامه چیدمان جدیدی از خشک‌کن پمپ حرارتی به کمک انرژی خورشیدی ارائه شده است. نتایج نشان داد پایین نگه داشتن دمای مبرد در کندانسور سبب کاهش اختلاف دمای اواپراتور و کندانسور شده، افزایش ضریب عملکرد را ناشی می‌شود. همچنین افزایش جابه‌جایی حجمی کمپرسور (با توجه به محدودیت موجود) سبب کاهش کار ورودی و نهایتاً سبب افزایش نرخ رطوبت زدایی می‌شود. در مناطقی که رطوبت نسبی بالایی دارند استفاده از خشک‌کن پمپ حرارتی و در مناطق با رطوبت نسبی پایین و اقلیم‌های گرم و خشک استفاده از تکنولوژی انبساط مستقیم خورشیدی توصیه می‌شود خلاصه ای از نتایج موجود در فصل ۴ در موارد زیر آورده شده است. زاویه شیب پایین کلکتور (در حدود ۱۰ درجه) در ماه‌های میانی سال و زاویه شیب بالاتر (در حدود ۴۰ درجه) در ماه‌های زمستانی برای بالا بردن ضریب عملکرد بکار می‌رود. مدلی نیز برای حصول دمای کندانسور در سیکل ارائه شد و بر این اساس پارامترهای خروجی به دست آمد.

- دمای میانگین هوا بالاتر از دمای اواپراتور-کلکتور است که این فرض اغلب در سیستم‌های انبساط مستقیم قابل قبول است
- در آنالیز پمپ حرارتی DX-SAHPD دمای کندانسور بدست آمده وابستگی چندانی به رطوبت نسبی هوای پیرامون ندارد (اگرچه نرخ جرمی جریان هوا بالا می‌رود) که می‌تواند یکی از جنبه‌های برتری DX-SAHPD نسبت به HPD باشد.
- از تشعشع میانگین برای یک روز در صفحه افقی \bar{H} برای تخمین تشعشع ساعت به ساعت در روزهای مذکور در جداول استفاده شده است.
- کاهش دمای کندانسور به طور کلی سبب افزایش ضریب عملکرد می‌شود. در سیکل‌های موسوم به DX-SAHPD با پایین نگه داشتن دمای مبرد کارایی بالاتری از سیکل دریافت کرد.
- نرخ جدایش رطوبت SMER در سیکل DX-SAHPD تابعی از کار ورودی به کمپرسور

است. طبیعتاً کاهش کار ورودی به کمپرسور سبب افزایش این پارامتر خواهد شد. مقدار نرخ جرمی رطوبت جدا شده (m_d) وابسته زمان کل فرآیند خشک کردن است.

- افزایش دمای کندانسور (با در نظر گرفتن پارامترهای مذکور مانند $u_t = 6.6$ و $\frac{VD}{Ac} = 0.9 \frac{m}{s}$) تاثیر افزایش چندان زیادی در دمای اوپراتور ندارد. (برای مثال در کلکتورهای بدون پوشش با $U_t = 30 \sim 40$ این مسأله صادق نیست) همچنین بر خلاف کلکتورهای بدون پوشش دماهای اوپراتور حاصل شده وابستگی کمتری به دمای و سرعت هوای پیرامون محیط دارد.
- در سه شهر مذکور در ماه‌های میانی سال با توجه به اینکه دمای میانگین هوا و شدت تشعشع جذب شده تغییرات چندانی ندارد، ضریب عملکرد در یک دمای ثابت کندانسور تقریباً در یک محدوده مقداری قرار دارند.
- ضریب عملکرد در یک دمای ثابت کندانسور بر اساس داده‌های ماهانه و زاویه شیب کمتر در ماه‌های میانی سال بیشتر است.
- بازدهی کلکتور در شرایط گوناگون و ساعات مختلف از ۷۰ تا ۸۵ درصد تغییر می‌کند
- ضرایب عملکرد به‌دست آمده در شهر تهران ۵ ماه اول سال میلادی از دو شهر دیگر کمتر ولی از ماه ژوئای تا سپتامبر از سایر شهرها بیشتر است.
- برای افزایش تشعشع جذب شده، ضریب عملکرد و فاکتور تشعشع مستقیم باید زاویه شیب کلکتور در ماه‌های فصل زمستان افزایش یابد. همچنین می‌توانبا قراردادن زاویه مناسب شیب کلکتور در ماه‌های متفاوت تشعشع جذب شده را بهینه کرد که از مزیت‌های استفاده از DX-SAHPD محسوب می‌شود.
- برای افزایش نرخ جدایش رطوبت و ضریب عملکرد مقادیر VD باید افزایش یابد (مقدار نرخ جابه‌جایی حجمی کمپرسور با دور کمپرسور نسبت مستقیم دارد)

پیشنهادها

- کار حاضر با عناصر فرعی مانند فن، شیرهای اتصال و کنترلرهای مربوطه در مقیاس آزمایشگاهی صورت گیرد تا با نتایج تئوری قابل مقایسه باشد
- استفاده از چیدمان متفاوت دیگر در سیکل به عنوان مثال اضافه کردن کلکتور هوا قبل از ورودی هوای کندانسور
- تخمین ضریب کلی انتقال حرارت کندانسور و تخمین اختلاف دمای لگاریتمی، طراحی سطح فین شده، تخمین سطح کل و طول لوله‌ها
- فرض گذار بودن شرایط پیرامون و متغیر بودن خواص ترمودینامیکی با دما
- آنالیز قانون دوم و تخمین اگزرژی و بازگشت ناپذیری‌ها در عناصر مختلف سیکل
- استفاده از چندین مبرد متفاوت در سیکل و مقایسه بین ضرایب عملکرد با مبردهای گوناگون
- تحلیل‌های اقتصادی با توجه به عناصر موجود در سیکل

مراجع

- [1] F. Group and A. S. Mujumdar, Handbook of industrial drying. CRC Press, 2014.
- [2] S. A. Kalogirou, Solar energy engineering: processes and systems. Academic Press, 2013.
- [3] R. Daghighi, M. H. Ruslan, M. Y. Sulaiman, and K. Sopian, "Review of solar assisted heat pump drying systems for agricultural and marine products," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 9, pp. 2564–2579, Dec. 2010.
- [4] M. A. Tütüncü, T. P. Labuza, and M. A. Tiitiincii, "Effect of geometry on the effective moisture transfer diffusion coefficient," *J. Food Eng.*, vol. 30, no. 3, pp. 433–447, 1996.
- [5] S. Azzouz, A. Guizani, W. Jomaa, and A. Belghith, "Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes," *J. Food Eng.*, vol. 55, no. 4, pp. 323–330, 2002.
- [6] S. J. Babalis and V. G. Belessiotis, "Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs," *J. Food Eng.*, vol. 65, no. 3, pp. 449–458, Dec. 2004.
- [7] İ. Doymaz, "Effect of pre-treatments using potassium metabisulphide and alkaline ethyl oleate on the drying kinetics of apricots," *Biosyst. Eng.*, vol. 89, no. 3, pp. 281–287, Nov. 2004.
- [8] İ. Doymaz, "Drying characteristics and kinetics of okra," *J. Food Eng.*, vol. 69, no. 3, pp. 275–279, Aug. 2005.
- [9] a. Ghazanfari, S. Emami, L. G. Tabil, and S. Panigrahi, "Thin-layer drying of flax fiber: I. Analysis of modeling using Fick's second law of diffusion," *Dry. Technol.*, vol. 24, no. 12, pp. 1631–1635, Dec. 2006.
- [10] M. A. Hossain, K. Gottschalk, and M. S. Hassan, "Mathematical model for a heat pump dryer for aromatic plant," *Procedia Eng.*, vol. 56, pp. 510–520, 2013.
- [11] M. Aktaş, İ. Ceylan, and S. Yilmaz, "Determination of drying characteristics of apples in a heat pump and solar dryer," *Desalination*, vol. 239, no. 1, pp. 266–275, Apr. 2009.
- [12] D. C. C. Wang, G. Zhang, Y. P. P. Han, J. P. P. Zhang, and X. L. L. Tian, "Feasibility analysis of heat pump dryer to dry hawthorn cake," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 8, pp. 2919–2924, Aug. 2011.

- [13] M. Aktas, I. Ceylan, and M. Aktaş, "Modeling of a hazelnut dryer assisted heat pump by using artificial neural networks," *Appl. Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 841–854, 2008.
- [14] M. Fatouh, M. N. N. Metwally, a. B. B. Helali, and M. H. H. Shedid, "Herbs drying using a heat pump dryer," *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 15, pp. 2629–2643, Sep. 2006.
- [15] U. S. Pal, M. K. Khan, and S. N. Mohanty, "Heat pump drying of green sweet pepper," *Dry. Technol.*, vol. 26, no. 12, pp. 1584–1590, Nov. 2008.
- [16] P. Saensabai and S. Prasertsan, "Effects of component arrangement and ambient and drying conditions on the performance of heat pump dryers," *Dry. Technol.*, vol. 21, no. 1, pp. 103–127, Jan. 2003.
- [17] S. K. Chaturvedi, Y. F. Chiang, and A. S. Roberts, "Analysis of two-phase flow solar collectors with application to heat pumps," *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 104, no. 4, pp. 358–365, 1982.
- [18] W. Aziz, S. K. Chaturvedi, and A. Kheireddine, "Thermodynamic analysis of two-component, two-phase flow in solar collectors with application to a direct-expansion solar-assisted heat pump," *Energy*, vol. 24, no. 3, pp. 247–259, 1999.
- [19] Y. W. W. Li, R. Z. Z. Wang, J. Y. Y. Wu, and Y. X. X. Xu, "Experimental performance analysis on a direct-expansion solar-assisted heat pump water heater," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 27, no. 17, pp. 2858–2868, Dec. 2007.
- [20] S. H. Pump, S. K. Chaturvedi, and M. Abazeri, "Transient simulation of a capacity-modulated, direct-expansion, solar-assisted heat pump," *Sol. Energy*, vol. 39, no. 5, pp. 421–428, 1987.
- [21] Y. H. Kuang, K. Sumathy, and R. Z. Wang, "Study on a direct- expansion solar- assisted heat pump water heating system," *Int. J. Energy Res.*, vol. 27, no. 5, pp. 531–548, 2003.
- [22] Y. H. Kuang, R. Z. Wang, and L. Q. Yu, "Experimental study on solar assisted heat pump system for heat supply," *Energy Convers. Manag.*, vol. 44, no. 7, pp. 1089–1098, 2003.
- [23] T. T. T. T. Chow, G. Pei, K. F. F. Fong, Z. Lin, a. L. S. L. S. Chan, and M. He, "Modeling and application of direct-expansion solar-assisted heat pump for water heating in subtropical Hong Kong," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 643–649, Feb. 2010.
- [24] R. Yumrutaş, M. Ünsal, and R. Yumrutas, "Analysis of solar aided heat pump systems with seasonal thermal energy storage in surface tanks," *Energy*, vol. 25, no. 12, pp. 1231–1243, 2000.

- [25] M. Mohanraj, S. Jayaraj, and C. Muraleedharan, "Performance prediction of a direct expansion solar assisted heat pump using artificial neural networks," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1442–1449, Sep. 2009.
- [26] F. B. Gorozabel Chata, S. K. K. Chaturvedi, A. Almogbel, and F. B. G. Chata, "Analysis of a direct expansion solar assisted heat pump using different refrigerants," *Energy Convers. Manag.*, vol. 46, no. 15–16, pp. 2614–2624, Sep. 2005.
- [27] Y. H. H. Kuang and R. Z. Z. Wang, "Performance of a multi-functional direct-expansion solar assisted heat pump system," *Sol. Energy*, vol. 80, no. 7, pp. 795–803, Jul. 2006.
- [28] K. Bakirci and B. Yuksel, "Experimental thermal performance of a solar source heat-pump system for residential heating in cold climate region," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 8, pp. 1508–1518, Jun. 2011.
- [29] M. N. A. Hawlader, P. K. Dey, S. Diab, and C. Y. Chung, "Solar assisted heat pump desalination system," *Desalination*, vol. 168, pp. 49–54, 2004.
- [30] S. Şevik, M. Aktaş, H. Doğan, and S. Koçak, "Mushroom drying with solar assisted heat pump system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 72, pp. 171–178, Aug. 2013.
- [31] M. N. a. N. A. Hawlader and K. a. A. Jahangeer, "Solar heat pump drying and water heating in the tropics," *Sol. Energy*, vol. 80, no. 5, pp. 492–499, May 2006.
- [32] M. N. A. Hawlader, S. M. A. Rahman, and K. A. Jahangeer, "Performance of evaporator-collector and air collector in solar assisted heat pump dryer," *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 6, pp. 1612–1619, 2008.
- [33] P. K. Adapa, G. J. Schoenau, and S. Sokhansanj, "Performance study of a heat pump dryer system for specialty crops—part 1: development of a simulation model," *Int. J. Energy Res.*, vol. 26, no. 11, pp. 1001–1019, Sep. 2002.
- [34] W. Senadeera, B. R. Bhandari, G. Young, and B. Wijesinghe, "Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying," *J. Food Eng.*, vol. 58, no. 3, pp. 277–283, Jul. 2003.
- [35] P. C. Panchariya, D. Popovic, and A. L. Sharma, "Thin-layer modelling of black tea drying process," *J. Food Eng.*, vol. 52, no. 4, pp. 349–357, 2002.
- [36] P. Gupta, J. Ahmed, U. S. Shivhare, and G. S. V Raghavan, "Drying characteristics of red chilli," *Dry. Technol.*, vol. 20, no. 10, pp. 1975–1987, 2002.
- [37] S. Simal, A. Mulet, J. Tarrazo, and C. Rosselló, "Drying models for green peas," *Food Chem.*, vol. 55, no. 2, pp. 121–128, 1996.

- [38] I. Doymaz, "Convective air drying characteristics of thin layer carrots," *J. Food Eng.*, vol. 61, no. 3, pp. 359–364, 2004.
- [39] K. J. Park, Z. Vohnikova, and F. P. R. Brod, "Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.)," *J. Food Eng.*, vol. 51, no. 3, pp. 193–199, 2002.
- [40] D. Mohapatra and P. S. Rao, "A thin layer drying model of parboiled wheat," *J. Food Eng.*, vol. 66, no. 4, pp. 513–518, 2005.
- [41] S. K. K. Chaturvedi, V. D. D. Gagrani, and T. M. M. Abdel-Salam, "Solar-assisted heat pump—a sustainable system for low-temperature water heating applications," *Energy Convers. Manag.*, vol. 77, pp. 550–557, Jan. 2014.
- [42] U. S. Pal and M. K. Khan, "Calculation steps for the design of different components of heat pump dryers under constant drying rate condition," *Dry. Technol.*, vol. 26, no. 7, pp. 864–872, Jul. 2008.
- [43] A. C. Cleland, "Polynomial curve-fits for refrigerant thermodynamic properties: extension to include R134a," *Int. J. Refrig.*, vol. 17, no. 4, pp. 245–249, 1994.
- [44] J. A. D. Deceased, W. A. Beckman, and J. A. Duffie, *Solar engineering of thermal processes*, vol. 3. Wiley New York etc., 1980.
- [45] P. Talebizadeh, M. A. Mehrabian, and M. Abdolzadeh, "Effect of Solar Angles on Incident Energy of the Flat Collectors," *J. Energy Eng. Manag.*, vol. 2, no. 4, pp. 12–23, 2011.
- [46] A. a. Sabziparvar, "A simple formula for estimating global solar radiation in central arid deserts of Iran," *Renew. Energy*, vol. 33, no. 5, pp. 1002–1010, May 2008.
- [47] <http://www.chaharmahalmet.ir/iranarchive.asp>
- [48] <http://www.gft-cropdrying.co.uk/tray-batch-driers>
- [49] : سهیل پرخیال، حمزه شیدایی، محمد مهدی رشیدی، کامران مبینی، تحلیل اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی پمپ حرارتی زمین گرمایی (مطالعه موردی شهر ملایر). دومین همایش انرژی‌های نو و پاک دانشگاه مفتح همدان
- [50] <https://www.chemours.com/>

Abstract

In last decades, the use of various dryer system in the field of food industries, biologic and pharmaceutical has increased. The utilization of cycles with capability of energy recovering for maintaining high quality of products and usage of renewable energy can be a useful achievement in drying technology. Pure solar energy which do not produce harmful pollutants is a new technology. In recent study, heat-pump dryer with the accommodation of solar energy in direct model of evaporator- collector was evaluated. Effective parameters in cycle output are consist of: coefficient of performance and the specific moisture evaporation rate. In addition, the influence of different factors including condenser temperature, relative humidity of ambient air, compressor volumetric displacement rate and temperature of evaporator on these functions were studied. For calculation of absorbed radiation in collector, the existing average data in other sources have used and with the help of existing relations, these values for average of one day and particular hours in a day have been obtained. The collector slope angels have chosen small in middle months of the year and large in winter months in order to that collector be able to absorb more amount of solar energy to optimize the absorption cycle. As an example, in 50° condenser temperature, in Tehran and in January, by increase of slope angel from 10 to 40, the coefficient of performance will increase from 4 to 4.5. The application of this cycle in low temperature will result increase in operation factor and life time of applied fluid.

The amount of coefficient of performance has direct relation with absorb radiation of collector. As instant, by compressor volume displacement rate of 0.005, average radiation, coefficient of performance in Tehran in January, by decrease of condenser temperature from 60° to 30° , will increase from 5 to 8. Annual analysis of coefficient of performance has been studied in this research. Operation factor in slope angel of 10 and condenser temperature of 40° will increase from 5 in January to 7 in August. In addition, the efficiency of collector in various different time, place and temperature condition will vary. The final functions have been studied for Birjand, Shiraz and Tehran..

Keywords: Drying technology, Heat Cycle pump, Absorb radiation, Collector Slope Angel, Condenser and Evaporator Temperature, coefficient of performance.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering

**study and performance improvement of solar
assisted heat pump drying**

Javad Kavousi

Supervisor:
Dr. Mahmood Chahartaghi

August 2015