

الحمد لله رب العالمين
والصلاة والسلام على
سيدنا محمد وآله الطيبين
الطاهرين



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

مهندسی سیستم های انرژی- تکنولوژی انرژی

بررسی تجربی خشک کن خورشیدی با استفاده از لوله خلاء

نگارنده

محمد نقی ئی

اساتید راهنما

دکتر محمد ضامن

دکتر محمد حسین احمدی

بهمن ماه ۱۳۹۹



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

بسمه تعالی

شماره :

تاریخ :

ویرایش :

فرم شماره (۶)

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمد نقی نئی رشته مهندسی سیستم های انرژی گرایش تکنولوژی انرژی تحت عنوان بررسی تجربی دستگاه خشک کن خورشیدی با استفاده از لوله خلاء که در تاریخ ۱۳۹۹/.../... با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول (با درجه : امتیاز :)	☐ دفاع مجدد	☐ مردود
---	------------------------------------	--------------------------------

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول			
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی			
۴- استاد ممتحن اول			
۵- استاد ممتحن دوم			

تأیید رئیس دانشکده :

تقدیم

سپاس و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم از صمیم قلب از همراهی، راهنمایی و مشاوره‌های اساتید عزیزم **دکتر محمد ضامن** و **دکتر محمدحسین احمدی** که با بردباری و شکیبایی کاستی‌های بنده را جبران نموده تشکر نموده و از خداوند متعال برایشان تندرستی و سلامتی آرزو نمایم. که بدون شک اگر راهنمایی این عزیزان نبود نمی‌توانستم در این مسیر موفق باشم. همچنین از شرکت سولارکار که در ساخت و تامین لوازم هواگرمکن مورد استفاده در این پایان نامه کمک شایانی نمودند نیز تقدیر و تشکر می‌نمایم.

تعهدنامه

اینجانب محمد نقی ئی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی سیستم های انرژی گرایش تکنولوژی انرژی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ساخت و بررسی تجربی دستگاه خشک کن خورشیدی با استفاده از لوله خلاء تحت راهنمایی های آقایان دکتر محمد ضامن و دکتر محمدحسین احمدی متعهد می شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

خشک کردن میوه ها از گذشته های بسیار دور به منظور حفظ کیفیت و تسهیل در انبارداری و همچنین بالا بردن ارزش افزوده جهت سود بیشتر کشاورزان مورد توجه بوده است. روش های متعددی برای خشک کردن محصولات غذایی به کار گرفته می شود که با توجه به نوع آن از انرژی هایی همچون برق، گاز و انرژی خورشیدی استفاده می شود. از بین انرژی های مختلف انرژی خورشیدی به دلیل ارزان، فراوان و مهم تر از همه پاک بودن آن و همچنین پتانسیل بالای کشور در زمینه بر خورداری از انرژی خورشید، بیش از سایر انرژی ها مورد توجه است. خشک کن های خورشیدی با توجه به مکانیزم جذب انرژی خورشید به انواع صفحه تخت، کلکتور سهموی خطی و کلکتور لوله خلاء تقسیم بندی می شوند. از نظر تماس با نور خورشید، خشک کردن به انواع مستقیم، غیرمستقیم و ترکیبی تقسیم بندی می شوند. کلکتور لوله خلاء جدیدترین نوع کلکتور است که ضمن برطرف کردن معایب انواع دیگر راندمان بالایی در انواع شرایط آب و هوایی دارد. در این پایان نامه کار عملی جدیدی بر روی خشک کن لوله خلاء انجام شده است و بر خلاف انواع قبلی که به صورت غیرمستقیم (گرمایش آب یا مواد ذخیره ساز) از انرژی خورشید برای خشک کردن استفاده می کند در این روش به صورت مستقیم حرارت جذب شده خورشید صرف گرم کردن هوای داخل لوله های خلاء شده و هوای گرم شده مستقیماً به داخل مخزن خشک کن هدایت و صرف خشک کردن محصول می شود. در این پایان نامه تست های مختلفی با سرعت های مختلف جریان هوا، ۲ و ۴ متر بر ثانیه و فن خاموش و همچنین خشک کردن در محیط صورت گرفته است. نتایج به دست آمده از این تست ها حاکی از صرفه جویی ۳۰ الی ۶۵ درصدی در مدت زمان خشک کردن با سرعت ۲ و ۴ متر بر ثانیه نسبت به خشک کردن طبیعی است. راندمان خشک کردن نیز در محدوده ۲/۳۴ الی ۹/۷ درصد که به ترتیب مربوط به تست هلو، شلیل و زردآلو (به طور همزمان) با سرعت ۲ و مخزن پر از سیب با سرعت ۴ متر بر ثانیه می باشد که در مقایسه با انواع دیگر خشک کن که تجهیزاتی از قبیل مواد ذخیره ساز یا واحد الکتریکی کمکی دارند عملکرد خوبی را نشان می دهد.

کلمات کلیدی :

خشک کن خورشیدی، خشک کن لوله خلاء، هوا گرم کن خورشیدی

فهرست مطالب

۱- فصل اول مقدمه ۱

- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- پتانسیل انرژی خورشید در ایران ۲
- ۳-۱- کاربردهای انرژی خورشید ۳
- تبدیل مستقیم پرتوهای خورشید به الکتریسیته بوسیله پدیده فتوولتائیک ۳
- استفاده از انرژی حرارتی خورشید برای مصارف نیروگاهی ۴
- استفاده از انرژی حرارتی خورشید برای مصارف غیر نیروگاهی ۷
- ۴-۱- آب گرمکن خورشیدی ۸
- آبگرمکنهای خورشیدی را برحسب عملکرد می‌توان به سه دسته تقسیم نمود: ۸
- تقسیم بندی آبگرمکنهای خورشیدی بر اساس چرخش سیال مصرفی ۹
- ۵-۱- انواع آب گرمکنهای خورشیدی از نظر نوع کلکتور ۱۰
- ۶-۱- هواگرمکنهای خورشیدی ۱۳
- معرفی اجزای دستگاه هواگرمکن خورشیدی ۱۴
- زمینه‌های کاربرد هواگرمکنهای خورشیدی: ۱۵
- انواع سیستم های هواگرمکن خورشیدی بر اساس سیکل عملکرد ۱۶
- ۷-۱- خشک‌کنهای خورشیدی ۱۶
- انواع سیستم های خشک کردن خورشیدی ۱۷
- در سیستم فعال، جریان هوای گرم از طریق فن‌های مکنده یا دمنده در لابه لای محصول به حرکت درمی‌آید ۱۷
- ۸-۱- انواع خشک‌کنهای خورشیدی از نظر ساختار ۱۷
- ۸-۱-۱- خشک‌کن خورشیدی از نوع یکپارچه یا مستقیم ۱۷
- ۸-۱-۲- خشک‌کن خورشیدی از نوع توزیعی یا غیرمستقیم ۱۸
- ۸-۱-۳- خشک‌کنهای خورشیدی از نوع ترکیبی ۱۹

۲- فصل دوم مروری بر پژوهش‌های پیشین ۲۵

۲۶.....	۱-۲- مقدمه
۲۷.....	۲-۲- مطالعات انجام شده در زمینه هوا گرمکن های خورشیدی
۳۳.....	۳-۲- مطالعات انجام شده بر روی خشککنهای خورشیدی
۴۱.....	۴-۲- انواع خشککن های خورشیدی با سیستم لوله خلاء
۴۲.....	۵-۲- معرفی مطالعه حاضر

۳- فصل سوم: ۴۵

۴۶.....	۱-۳- مقدمه
۴۷.....	۲-۳- طراحی سیستم آزمایشگاهی خشککن خورشیدی لوله خلاء
۴۸.....	اجزای سیستم آزمایشگاهی خشککن خورشیدی لوله خلاء
۴۹.....	۳-۳- تجهیزات اندازه گیری
۴۹.....	ترازو :
۴۹.....	سرعت سنج باد :
۴۹.....	دماسنج :
۵۰.....	رطوبت سنج:
۵۰.....	تابش سنج خورشیدی
۵۱.....	۴-۳- روش انجام آزمایش
۵۲.....	۵-۳- معادله های حاکم و مدل سازی شدت تابش خورشید
۵۷.....	۶-۳- نحوه انجام محاسبات و ارزیابی خشککن
۵۷.....	محاسبه رطوبت :
۵۸.....	وزن نهایی محصول خشک شده بر اساس رطوبت مطلوب نهایی:
۵۹.....	محاسبه بازده خشککن

۴- فصل چهارم ۶۱

۶۲.....	۱-۴- مقدمه
۶۲.....	۲-۴- نتایج مربوط به آزمایش دستگاه در حالت هواگرمکن
۶۶.....	۳-۴- نکاتی درخصوص انجام آزمایشهای خشککن خورشیدی

دو عامل موثر در خشک کردن مواد غذایی عبارتند از دما و سرعت جریان هوا که سعی شده است هر دو در فرآیند خشک

- ۶۶ کردن هر محصول مورد ارزیابی قرار گیرد.
- ۴-۴ نتایج آزمایش دستگاه خشک کن خورشیدی لوله خلا برای محصول سیب: ۶۷
- ۵-۴ نتایج آزمایش دستگاه خشک کن خورشیدی لوله خلا برای محصول زردآلو: ۷۱
- ۶-۴ نتایج آزمایش دستگاه خشک کن خورشیدی لوله خلا برای محصول هلو و شلیل: ۷۴
- ۷-۴ نتایج آزمایش دستگاه خشک کن لوله خلاء برای فلفل قرمز: ۷۸
- ۸-۴ محاسبه بازده دستگاه خشک کن خورشیدی لوله خلا: ۸۰
- ۹-۴ بررسی اقتصادی ساخت و بهره‌برداری از دستگاه خشک کن خورشیدی لوله خلا: ۸۲
- ۱۰-۴ تحلیل اقتصادی: ۸۲

۵- فصل پنجم ۸۵

- ۱-۵ نتیجه گیری: ۸۶
- ۲-۵ پیشنهادات: ۸۷
- مراجع

فهرست نگار

- شکل ۱-۱ پتانسیل سالانه انرژی خورشید در نقاط مختلف کشور [۲]: ۳
- شکل ۱-۲ نیروگاه خورشیدی سهموی خطی [۳]: ۵
- شکل ۱-۳ نیروگاه خورشیدی با دریافت کننده مرکزی [۴]: ۶
- شکل ۱-۴ نیروگاه خورشیدی با دریافت کننده سهموی (دیش) [۵]: ۷
- شکل ۱-۵ آبگرمکن خورشیدی با مدار باز (الف) پمپی و (ب) ترموسیفونی [۶]: ۹
- شکل ۱-۶ سیستم آب گرمکن خورشیدی غیرمستقیم یا اکتیو [۶]: ۱۰
- شکل ۱-۷ آب گرمکن خورشیدی (الف) صفحه تخت و (ب) لوله خلاء [۶]: ۱۱

- شکل ۸-۱ کلکتور خورشیدی صفحه تخت ۱۲
- شکل ۹-۱ هواگرمن خورشیدی با کلکتور صفحه تخت [۷] ۱۴
- شکل ۱۰-۱ هواگرمن خورشیدی با کلکتور لوله خلاء [۷] ۱۵
- شکل ۱۱-۱ خشک کن خورشیدی مستقیم [۸] ۱۸
- شکل ۱۲-۱ دستگاه خشک کن خورشیدی غیرمستقیم [۸] ۱۹
- شکل ۱۳-۱ خشک کن خورشیدی ترکیبی [۱] ۲۰
- شکل ۱۴-۱ دستگاه خشک کن خورشیدی ترکیبی با دو صفحه جاذب و مواد ذخیره ساز [۱] ۲۱
- شکل ۱۵-۱ دستگاه خشک کن خورشیدی ترکیبی با واحد گرمایش الکتریکی کمکی [۱] ۲۲
- شکل ۱۶-۱ خشک کن خورشیدی با واحد کمکی سوخت بیومس [۱] ۲۳
- شکل ۱-۲ کلکتور سهموی با دریافت کننده لوله خلاء [۱۱] ۲۸
- شکل ۲-۲ اتصال سری لوله‌های خلاء جهت افزایش حدکثری دما [۱۴] ۳۱
- شکل ۳-۲ کلکتور دما بالا با لوله خلاء و متمرکز کننده CPC [۱۶] ۳۳
- شکل ۴-۲ مدت زمان خشک شدن برای سیال عامل متفاوت [۲۶] ۳۹
- شکل ۱-۳ مقایسه کلکتور لوله خلاء و کلکتور صفحه تخت در جذب تابش در ساعات مختلف [۲۷] ۴۷
- شکل ۲-۳ خشک کن خورشیدی لوله خلاء ۴۷
- شکل ۳-۳ لایه‌های مختلف پوشش سطح لوله داخلی ۴۹
- شکل ۴-۳ دماسنج مورد استفاده جهت ثبت دمای داخل مخزن و دما و رطوبت محیط ۵۰
- شکل ۵-۳ رطوبت سنج و دما سنج اکسترنال مدل LX8011 ۵۰
- شکل ۶-۳ دستگاه تابش سنج خورشیدی (پیرانومتر) ۵۱
- شکل ۷-۳ رابطه بین زمین و خورشید ۵۲
- شکل ۸-۳ مسیر روزانه خورشید از طلوع تا غروب ۵۳
- شکل ۹-۳ تعریف عرض جغرافیایی، زاویه ساعت و زاویه انحراف محور زمین ۵۵
- شکل ۱۰-۳ معادله زمان ۵۵
- شکل ۱۱-۳ تابش مستقیم بروی سطح افقی و شیبدار ۵۷
- شکل ۱-۴ تست مخزن بدون فن با ۵ لوله خلاء ۶۲
- شکل ۲-۴ تست مخزن با ۵ لوله و سرعت ۲ متر بر ثانیه ۶۳
- شکل ۳-۴ تست مخزن ۹۹/۲/۱۷ با سرعت ۴ متر بر ثانیه و تعداد ۵ لوله خلاء ۶۴
- شکل ۴-۴ تست مخزن ۹۹/۲/۱۸ با ۱۸ لوله خلاء و سرعت ۴ متر بر ثانیه ۶۵
- شکل ۵-۴ تست مخزن در تاریخ ۹۹/۵/۲۴ با ۲۴ لوله خلاء و در حالت فن خاموش ۶۶
- شکل ۶-۴ تغییرات دمای محیط در طول روزهای آزمایش سب ۶۸

- شکل ۴-۷ تغییرات دمای محیط در آزمایش محیطی..... ۶۸
- شکل ۴-۸ تغییرات دمای مخزن در تست سیب..... ۶۹
- شکل ۴-۹ برش‌های سیب جهت آزمایش در دستگاه خشک کن..... ۷۰
- شکل ۴-۱۰ سیب‌های خشک شده در مخزن..... ۷۰
- شکل ۴-۱۱ مقایسه مدت زمان..... ۷۵
- شکل ۴-۱۲ تغییرات دمای محیط در آزمایش زردآلو..... ۷۲
- شکل ۴-۱۳ تغییرات دمای محیط در تست محیطی زردآلو..... ۷۳
- شکل ۴-۱۴ تغییرات دمای مخزن در تست زردآلو..... ۷۳
- شکل ۴-۱۵ مدت زمان خشک شدن زردآلو در حالت‌های مختلف..... ۷۴
- شکل ۴-۱۶ برش‌های هلو جهت خشک کردن در دستگاه خشک کن..... ۷۵
- شکل ۴-۱۷ آماده سازی شلیل جهت خشک کردن..... ۷۵
- شکل ۴-۱۸ تغییرات دمای محیط در روزهای مختلف تست هلو و شلیل..... ۷۶
- شکل ۴-۱۹ تغییرات دمای مخزن در تست هلو و شلیل..... ۷۶
- شکل ۴-۲۰ مدت زمان خشک شدن هلو در تست های مختلف..... ۷۷
- شکل ۴-۲۱ مدت زمان خشک شدن شلیل در تست های مختلف..... ۷۸
- شکل ۴-۲۲ فلفل قرمز جهت خشک کردن در مخزن..... ۷۹
- شکل ۴-۲۳ مدت زمان خشک شدن فلفل در تست های مختلف..... ۸۰
- شکل ۴-۲۴ مقایسه راندمان در محصولات فلفل و سیب..... ۸۱

فهرست علائم

نام	علامت	واحد
ضریب سیبک	α	V/K
اختلاف دما	ΔT	K
ثابت خورشیدی	G_{sc}	W/m^2
شماره روز سال	n	-
تشعشع دریافتی در n امین روز	G_{on}	W/m^2
زاویه سمت الراس	ϕ	°
عرض جغرافیایی	L	°
زاویه انحراف محور زمین	δ	°
زاویه ساعت	h	°
زمان خورشیدی	AST	min
زمان استاندارد محلی	LST	min
معادله زمان	ET	min
طول جغرافیایی استاندارد	SL	°
طول جغرافیایی محلی	LL	°
صرفه جویی روشنایی روز	DS	-

°	β	زاویه پِنل نسبت به سطح افق
-	ρ_g	ضریب انعکاس
km	A	ارتفاع از سطح دریای آزاد
mm	δ_g	ضخامت شیشه
-	α_g	ضریب جذب شیشه
-	τ_g	ضریب عبور شیشه
-	ε_g	ضریب انتشار شیشه
-	A_g/A_t	مساحت کل / شیشه
-	α_g	ضریب جذب شیشه
-	η	راندمان
kg	m_a	جرم هوا
$\frac{j}{kgc^\circ}$	cp	ظرفیت حرارتی ویژه هوا
	ΔT	اختلاف دما
Kg	M	اختلاف جرم اولیه و نهایی
m ²	A	سطح کلکتور
kJ/kg	L	گرمای نهان تبخیر
درصد	RHi	رطوبت ابتدایی محصول
درصد	RHe	رطوبت نهایی محصول

Kg	M_1	وزن ابتدایی محصول
Kg	M_2	وزن نهایی محصول
Kg	M_d	وزن بافت میوه
Kg	M_{dry}	وزن نهایی تئوری
Kg	M_1	وزن ابتدایی محصول
Kg	M_2	وزن نهایی محصول
سال	P	دوره باز پرداخت
سال	PB	دوره بازگشت سرمایه
ریال	AS	صرفه جویی سالانه

١- فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

امروز به دلیل افزایش جمعیت و رشد روز افزون مصرف انرژی و همچنین آلودگی‌های زیست محیطی و قیمت بالای سوخت‌های فسیلی و تجدید ناپذیر بودن منابع این سوخت‌ها موجب شده تا گرایش به سمت استفاده از انرژی‌های نو و تجدید پذیر افزایش چشم‌گیری داشته باشد. انرژی از منابع مختلفی تامین می‌شود که برخی از آن‌ها تجدید پذیر و برخی از آن‌ها تجدید ناپذیر هستند. سوخت‌های فسیلی (نفت، بنزین، گاز، ذغال سنگ) که از دیرباز نقش اصلی در تامین انرژی بشر را به عهده دارند جزء منابع تجدید ناپذیر هستند و با توجه به هزینه‌های زیاد جهت استخراج، پالایش و انتقال این سوخت‌ها به محل مصرف از یک سو و آلودگی شدید محیط زیست از سوی دیگر موجب شده تا دانشمندان به انرژی‌های پاک و تجدید پذیر روی بیاورند.

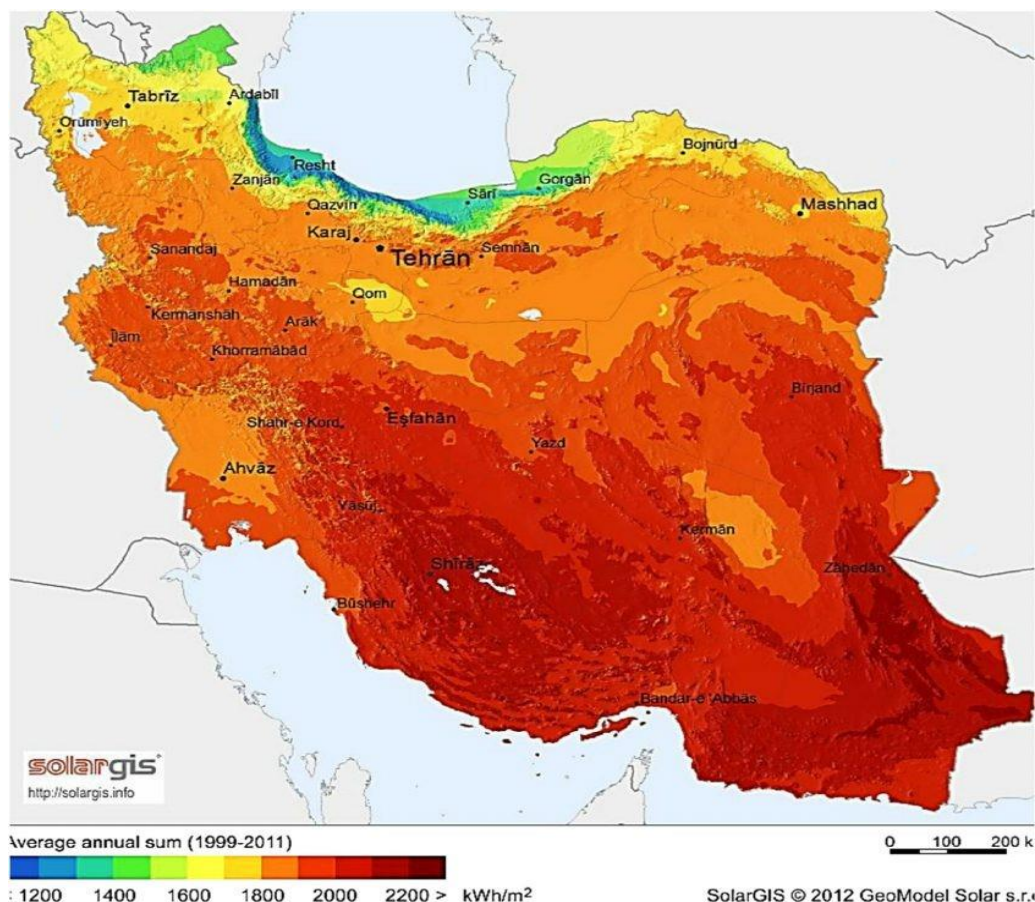
از جمله انرژی‌های پاک و تجدید پذیر می‌توان به انرژی آب، باد، زمین گرمایی، جزر و مد اقیانوس‌ها، زیست‌توده و انرژی خورشیدی اشاره کرد. در بین انرژی‌های نام برده شده انرژی خورشیدی جزء فراوان‌ترین، در دسترس‌ترین و عظیم‌ترین منبع انرژی پاک و تجدید پذیر است که طبق برآورد ها تا ۵ میلیارد سال آینده منبع مطمئنی برای تامین انرژی بشر می‌تواند باشد. با توجه به رویکرد این پایان‌نامه مبنی بر استفاده از انرژی خورشید لذا کاربرد های مختلف انرژی خورشیدی شرح داده می‌شود.

۱-۲- پتانسیل انرژی خورشید در ایران

تخمین تولید انرژی توسط متغیر PSH^1 صورت می‌گیرد. PSH میانگین انرژی خورشیدی است که در یک مکان در طول روز دریافت می‌شود و واحد آن kWh/m^2 می‌باشد. در ایران بطور متوسط ۵/۵ کیلووات ساعت انرژی خورشیدی بر هر متر مربع از سطح زمین در روز دریافت می‌شود و حداقل ۳۰۰ روز آفتابی در ۹۰ درصد خاک کشور وجود دارد. از این رو پتانسیل بالایی برای استفاده از انرژی

¹ Peak Sun Hours

خورشید در بیشتر مناطق کشور وجود دارد. یکی دیگر از پارامترهای مورد استفاده در ارزیابی پتانسیل انرژی خورشیدی در یک منطقه متوسط انرژی دریافت شده در طول یک سال است. در شکل (۱-۱) پتانسیل مناطق مختلف کشور در دریافت سالانه انرژی خورشید نشان داده شده است. [۲]



شکل ۱-۱ پتانسیل سالانه انرژی خورشید در نقاط مختلف کشور [۲]

۱-۳- کاربردهای انرژی خورشید

تبدیل مستقیم پرتوهای خورشید به الکتریسیته بوسیله پدیده فتوولتائیک

یکی از انواع سامانه‌های تولید برق از انرژی خورشیدی می‌باشد. در این روش با بکارگیری سلول‌های خورشیدی، تولید مستقیم الکتریسیته از تابش خورشید امکان پذیر می‌شود. سلول‌های خورشیدی از نوع نیمه رسانا می‌باشند که از سیلیسیوم یعنی دومین عنصر فراوان پوسته زمین ساخته

می‌شوند. وقتی نور خورشید به یک سلول فتوولتائیک می‌تابد، بین دو الکترود منفی و مثبت اختلاف پتانسیل بروز کرده و این امر موجب جاری شدن جریان بین آن‌ها می‌گردد.

استفاده از انرژی حرارتی خورشید برای مصارف نیروگاهی

تأسیساتی که با استفاده از آن‌ها انرژی جذب شده حرارتی خورشید به الکتریسیته تبدیل می‌شود نیروگاه حرارتی خورشیدی نامیده می‌شود. این تأسیسات بر اساس انواع متمرکز کننده‌های موجود و برحسب اشکال هندسی متمرکز کننده‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند:

الف- نیروگاه‌هایی که گیرنده آن‌ها آینه‌های سهموی خطی هستند (شکل ۱-۲)

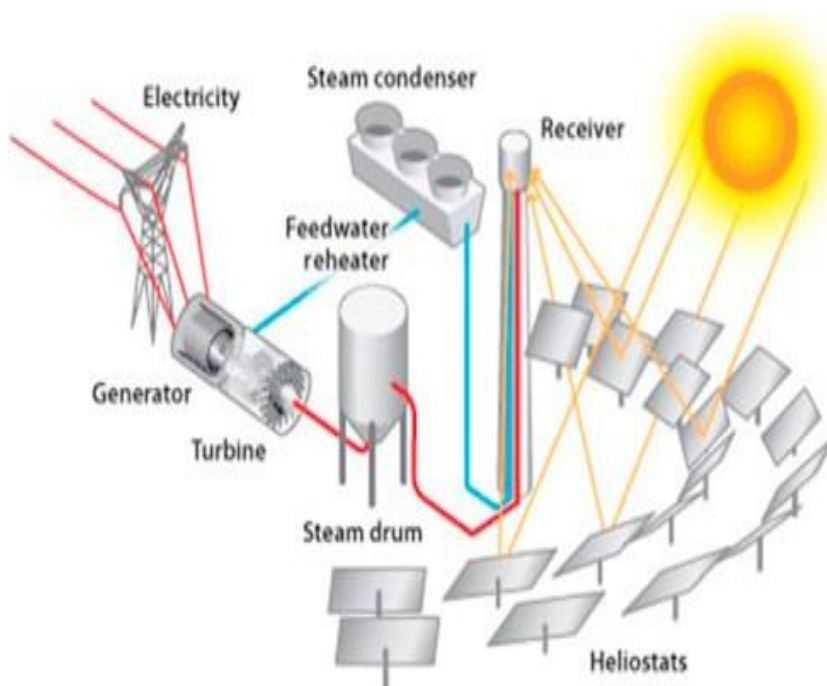
این نیروگاه‌ها که بر اساس ویژگی‌های آب و هوای روزانه کار می‌کنند، حدود ۱۴ تا ۸۰ مگاوات برق تولید می‌کنند. نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی از نوع سیستم کلکتور سهموی خطی شامل ردیف‌های موازی و طولانی از متمرکز کننده‌ها می‌باشند. بخش متمرکز کننده شامل سطوح انعکاسی سهموی است که از جنس آینه‌های شیشه‌ای تشکیل شده و روی یک سازه نگهدارنده قرار می‌گیرند. یک سیال انتقال حرارت روغن با دمای حدود ۴۰۰ درجه سانتیگراد از میان لوله‌های جاذب در جریان می‌باشد و روغن داغ در مبدل‌های حرارتی آب را به بخار تبدیل و بخار سوپرهیت طی عبور از توربین ژنراتور، انرژی الکتریکی تولید می‌کند. این نوع نیروگاه‌ها با ذخیره حرارت قابلیت تولید برق را حتی در مواقعی که خورشید غروب نموده است را دارا هستند. [۳]



شکل ۲-۱ نیروگاه خورشیدی سهموی خطی [۳]

ب- نیروگاه‌های برج مرکزی یا هلیوستات (شکل ۱-۳).

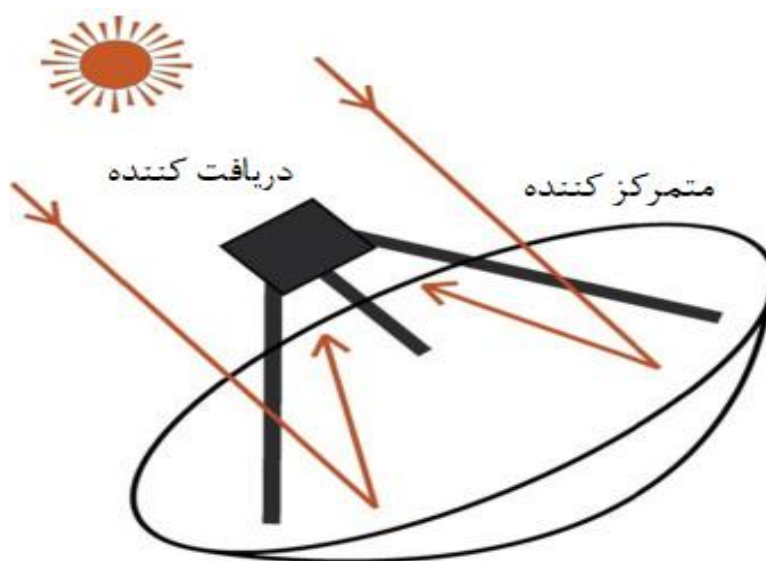
سیستم برج‌های برق همانطور که در شکل (۱-۳) نشان داده شده است، فناوری جدیدتری در مقایسه با خورشیدی سهموی است و برای صرفه اقتصادی بیشتر مناسب نیروگاه‌های متصل به شبکه بزرگ است. یک سیستم برج، متشکل از آینه‌های تخت بزرگ با سیستم ردیابی خورشید است که نور خورشید را بر روی یک گیرنده در بالای برج متمرکز می‌کند. این آینه‌های ردیابی که صدها تا هزاران عدد دارند و هلیواستات نامیده می‌شوند می‌توانند ۱۵۰۰ برابر انرژی حاصل از خورشید را متمرکز کنند. این مقدار زیاد انرژی دمای بالایی از ۵۰۰-۱۵۰۰ درجه سانتیگراد را تولید می‌کند که می‌تواند برای گرم کردن مایعی مانند آب یا نمک مذاب استفاده شود. مایع گرم شده در گیرنده برای تولید بخار استفاده می‌شود که به نوبه خود برای حرکت دادن ژنراتور توربین برای تولید برق استفاده می‌شود. [۴]



شکل ۳-۱ نیروگاه خورشیدی با دریافت کننده مرکزی. [۴]

ج- نیروگاه‌هایی که گیرنده آن‌ها بشقاب‌ی سهموی (دیش) می‌باشد (شکل ۱-۴).

این کلکتورها از مجموعه‌ای از آینه‌های بشقاب‌ی شکل سهموی تشکیل شده‌اند. دمای عملکرد سیستم‌ها بیش از ۱۸۰۰ درجه کلوین است. در حالی که نسبت تمرکز معمولاً در محدوده ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ کلوین است. سیستم‌های متمرکز بشقاب سهموی خورشیدی به دلیل نسبت تمرکز زیاد و دمای کار مناسب‌ترین کاربرد فتوولتائیک هستند. این سیستم‌ها دستگاهی بسیار حجیم و پرهزینه هستند. به طور متوسط، برای بازده نوری ۰/۹ الی ۰/۹۳، نسبت تمرکز ۲۰۰۰-۵۰۰۰، ضریب رهگیری ۰/۹۸ مورد نیاز است. [۵]



شکل ۴-۱ نیروگاه خورشیدی با دریافت کننده سهموی (دیش) [۵]

استفاده از انرژی حرارتی خورشید برای مصارف غیر نیروگاهی

کاربردهای اصلی این نوع مصارف به طور عمده شامل موارد زیر می‌شود:

- گرمایش آب مصرفی (آب گرمکن‌های خورشیدی جهت منازل، ادارات و حمام خورشیدی)
- ساختمان‌های خورشیدی (گرمایش فضای داخلی ساختمان‌ها)
- آب شیرین کن‌های خورشیدی (در اندازه‌های خانگی و صنعتی)
- اجاق‌های خورشیدی
- کوره‌های خورشیدی
- پمپ‌های حرارتی خورشیدی
- خشک‌کن‌های خورشیدی (برای خشک‌کن کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی)

استفاده غیر نیروگاهی انرژی خورشیدی همانطور که نام برده شد دارای کاربردهای متنوعی است. جهت جلوگیری از زیاد شدن حجم مطالب و با توجه به مشابه بودن تکنولوژی به کار رفته در اکثر موارد نام برده شده و با توجه به نزدیکی به موضوع پایان نامه، به معرفی آب گرمکن‌های خورشیدی و اجزای آن

پرداخته می شود.

۱-۴- آب گرمکن خورشیدی

آب گرمکن ها اصلی ترین سیستم مورد استفاده در کاربردهای غیرنیروگاهی خورشیدی می باشند. همانطور که از نام آن پیداست برای گرم کردن آب مورد استفاده قرار می گیرد. در آبگرمکن خورشیدی، انرژی گرمایشی در کلکتورها دریافت می شود. در سیستم هایی که با چرخه بسته کار می کنند، نوعی سیال ضد یخ درون کلکتورها جریان می یابد. برخی آبگرمکن ها نیز از چرخه باز استفاده می کنند که آب مصرفی درون کلکتور می چرخد (کاربرد محدود). در نوع خاصی از آب گرمکن های خورشیدی هوا درون کلکتورها گرم می شود و سپس گرمای حاصل به آب منتقل می شود.

از مزایای این نوع از آب گرمکن ها می توان به بی پایان بودن منبع انرژی آن ها، امن و بی خطر، پاک و بدون آلودگی زیست محیطی، رایگان و همیشه در دسترس انرژی، جایگزین مناسب جهت کاهش مصرف سوخت فسیلی اشاره کرد. این آبگرمکن ها براساس نوع عملکرد و همچنین نوع تماس سیال عامل به چند دسته تقسیم می شوند :

آبگرمکن های خورشیدی را برحسب عملکرد می توان به سه دسته تقسیم نمود:

الف: آبگرمکن های خورشیدی ترموسیفونی: در این نوع از آبگرمکن، پمپی برای جریان

یافتن آب وجود ندارد و جا به جایی طبیعی آب بین کلکتور و مخزن ذخیره، در اثر گرم شدن توسط انرژی خورشید و تغییر چگالی انجام می گیرد.

ب: آبگرمکن های خورشیدی پمپ دار تحت فشار: این نوع آبگرمکن خورشیدی دارای

سیستمی بسته بوده و قابل استفاده در داخل موتور خانه است. در این نوع می توان از ضدیخ برای جلوگیری از یخ زدن آب درون کلکتورها استفاده کرد. این سیستم ها برای فرمان دادن به پمپ نیاز به سامانه کنترلی دارند.

ج: آبگرمکن‌های خورشیدی برگشتی ثقلی: در این سیستم، همانند نوع دوم از پمپ

استفاده می‌شود با این تفاوت که جهت جلوگیری از مشکلات یخ زدگی چرخه سیال باز بوده

و از یک مخزن جهت تخلیه کامل کلکتورها در زمان خاموش شدن پمپ استفاده می‌شود.

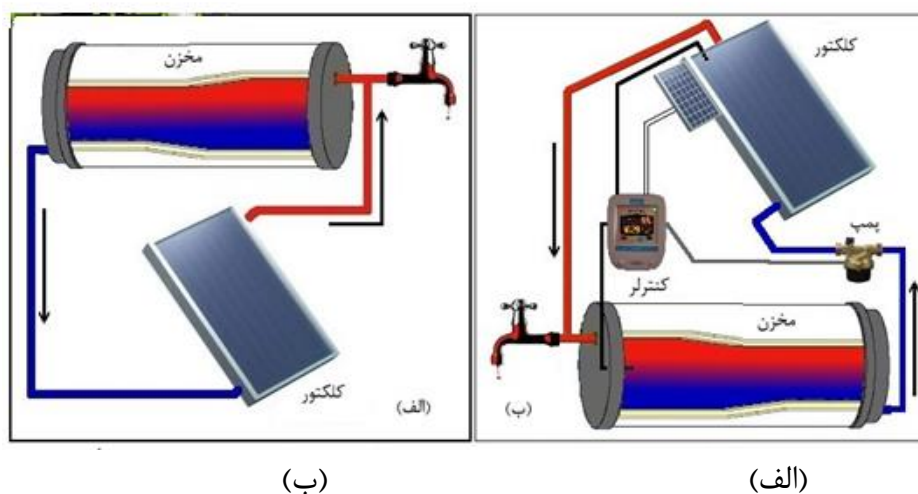
تقسیم بندی آبگرمکن‌های خورشیدی بر اساس چرخش سیال مصرفی

الف: آبگرمکن‌های حلقه باز یا مستقیم: در این سیستم‌ها آب گرم مصرفی به طور مستقیم از

کلکتور عبور می‌کند. درواقع، کلکتورها از مایع جداگانه‌ای استفاده نمی‌کنند بلکه همان آب مصرفی

داخل کلکتور جریان می‌یابد. سیستم‌های حلقه باز خود در دو نوع می‌باشند:

- سیستم حلقه باز با گردش آب اجباری یا پمپی
- سیستم حلقه باز با گردش طبیعی (ترموسیفونی)



شکل ۵-۱ آبگرمکن خورشیدی با مدار باز الف) پمپی و ب) ترموسیفونی [۶]

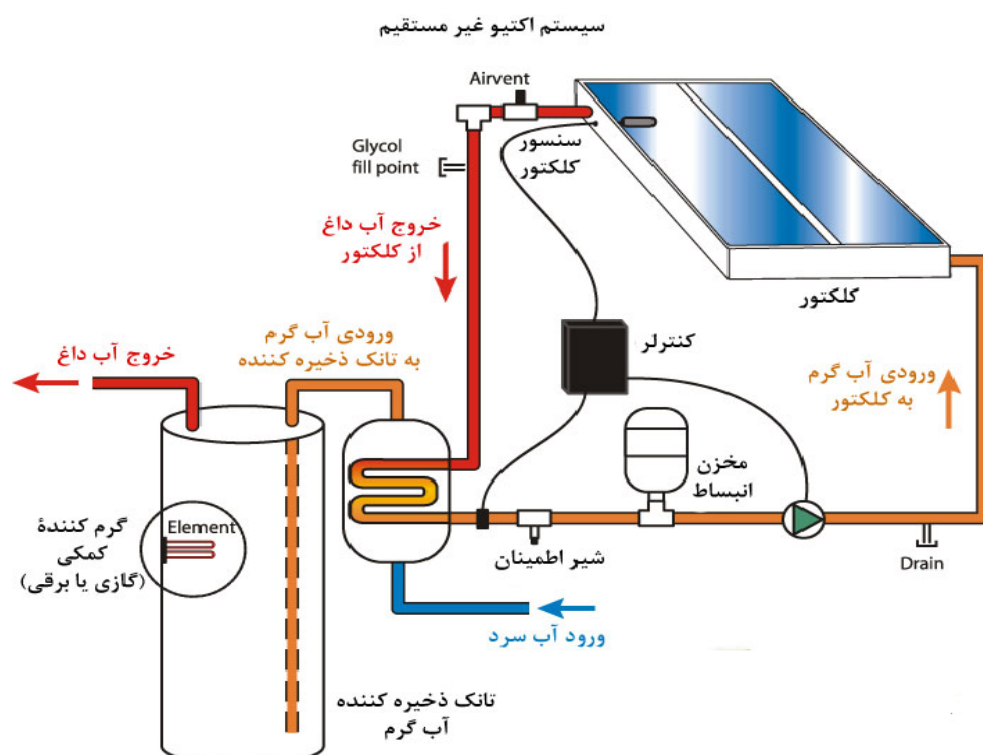
ب: آب گرم‌کن‌های حلقه بسته یا غیرمستقیم

این آب گرم‌کن‌ها بسیار کارآمد و قابل اطمینان می‌باشند و به نگهداری کم‌تری نیاز دارند.

همانطور که ذکر شد، این سیستم‌ها از یک مایع جداگانه از آب مصرفی به نام مایع منتقل کننده‌ی

گرما (HTF) برای انتقال گرما بهره می‌برد. HFT که گرما را از کلکتور دریافت می‌کند، اصولاً آب و

ضدیخ می‌باشد که در یک چرخه‌ی بسته از طریق لوله‌کشی، بین کلکتور و مخزن جریان می‌یابد. HTF که از طریق کلکتور گرم شده است، به سمت مخزن حرکت می‌کند و در آنجا از طریق یک مبدل حرارتی، گرمای خود را به آب داخل مخزن منتقل می‌کند و پس از انتقال گرما و افت دما، به کلکتور باز می‌گردد. پس بدون اینکه با آب مصرفی مخلوط شود، به طور مداوم در این چرخه به گردش در می‌آید. مطابق شکل (۱-۶) سیستم‌های غیر مستقیم نیازمند سامانه کنترلی می‌باشند. [۶]



شکل ۱-۶ سیستم آب گرمکن خورشیدی غیرمستقیم یا اکتیو [۶]

۱-۵- انواع آب گرمکن‌های خورشیدی از نظر نوع کلکتور

کلکتور اصلی‌ترین و مهمترین جزء یک آبگرمکن خورشیدی می‌باشد که وظیفه تامین حرارت جهت گرمایش را به عهده دارد. کلکتورها جزء مشترک در بین آب گرمکن‌ها، هواگرمکن‌ها و سایر تجهیزات حرارتی خورشیدی هستند. عملکرد خوب دستگاه تابع عملکرد خوب کلکتور می‌باشد.

کلکتورها مطابق شکل (۷-۱) به دو نوع صفحه تخت و لوله خلا تقسیم بندی می شوند.



شکل ۷-۱ آب گرمکن خورشیدی الف) صفحه تخت و ب) لوله خلا [۶]

الف- کلکتورهای صفحه تخت:

کلکتور خورشیدی صفحه تخت رایج ترین و پر استفاده ترین مدل از کلکتورهای خورشیدی است. کلکتور خورشیدی صفحه تخت یک مبدل حرارتی است که تشعشعات خورشید را به کمک اثر گلخانه‌ای به انرژی گرمایی تبدیل می کند. از این انرژی برای گرم کردن آب گرم مصرفی برای گرمایش ساختمان، حمام و شست و شو و همچنین گرمایش استخر خورشیدی استفاده می شود. همچنین کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت، نسبت ظرفیت بالا برای ایجاد آب گرم با دمای مورد نیاز را دارند. یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت عموماً شامل یک صفحه جاذب حرارت است که معمولاً یک ورقه بزرگ مس و آلومینیوم (که هر دو رسانایی حرارت بالایی دارند) که به رنگ سیاه رنگ آمیزی می شود، تا حداکثر بازده ممکن برای جذب اشعه خورشید را داشته باشد. در شکل (۸-۱) نمونه ای از این نوع کلکتور نشان داده شده است.



شکل ۸-۱ کلکتور خورشیدی صفحه تخت

ب- کلکتورهای لوله خلا:

کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت که مزایایی از قبیل ساخت و نصب آسان هستند دارای معایبی از قبیل زیر می‌باشند:

- در همه زوایای تابش دریافت حداکثری ندارند.
- در فصول سرد سال کارایی این مدل کلکتور پایین می‌آید.
- در صورت آسیب دیدن بخش کوچکی از کلکتور باید تمام قسمت مذکور تعویض شود که موجب بالا رفتن هزینه تعمیرات می‌شود.

با توجه به معایب موجود در کلکتور صفحه تخت و همچنین بالا بردن بازده کلکتورهای خورشیدی و افزایش استفاده حداکثری از تابش روزانه خورشید کلکتورهای لوله خلا طراحی گردیده است. لوله‌های خلا متشکل از دولوله شیشه‌ای که یکی داخلی دیگری است و ما بین آن‌ها خلا شده (مانند شیشه فلاسک چای) که تحمل دمایی ۲۴- تا ۲۵۰+ درجه سانتی‌گراد را دارد. به علت وجود خلا بین دو لوله

اتلاف حرارتی از سطح لوله داخلی به بیرون بسیار کم است و این نوع کلکتور خورشیدی در مقایسه با سایر انواع کلکتور از عملکرد بسیار بالاتری حتی در زمانی که تابش کمتری وجود دارد برخوردار می‌باشد. لوله داخلی دارای پوشش خاصی از ترکیبات مس است که امواج تابشی خورشید را جذب می‌کند. نوع این پوشش مهم بوده و در میزان جذب و بازده و همین‌طور طول عمر کارکرد تیوب‌ها موثر خواهد بود. معمولاً این کلکتور جاذب با لوله خلاء در ۲ نوع هیت پایپ و ساده می‌باشد نوع ساده آن سیال عامل حرارت را در لوله داخلی با حرکت ترموسیفونی منتقل می‌کند. نوع هیت پایپ تحت فشار پمپ است و درون لوله شیشه‌ای داخلی، یک لوله‌ای مسی بنام هیت پایپ قرار دارد که حرارت جذب شده را به مخزن اصلی بالای لوله‌ها منتقل می‌کند.

کلکتورهای لوله خلا دارای مزایای زیر می‌باشد:

- به خاطر دو جداره بودن لوله‌ها و وجود خلاء بین دو جدار شیشه‌ای در شرایط سرد آب و هوایی در روز یا در شب میزان از دست دادن انرژی گرمایی جذب شده به حداقل رسیده است.
- در تمام ساعات روز در حالت عمود نسبت به خورشید قرار دارند و لذا بیشترین میزان جذب انرژی را از خورشید خواهند داشت.
- در صورت آسیب دیدن کلکتور در کلکتورهای تخت تمام کلکتور باید تعویض گردد، در حالی که در سیستم لوله خلاء با شکسته شدن و آسیب دیدن یکی از لوله‌ها، سیستم می‌تواند به کار خود ادامه دهد و امکان تعویض لوله آسیب دیده به راحتی وجود دارد.
- مناسب برای مناطقی که تابش خورشید کمی داشته و سرد سیر می‌باشند.

۱-۶- هواگرمکن‌های خورشیدی

گرمایش هوای خورشیدی (Solar air heater) یک فناوری انرژی تجدیدپذیر است که در آن

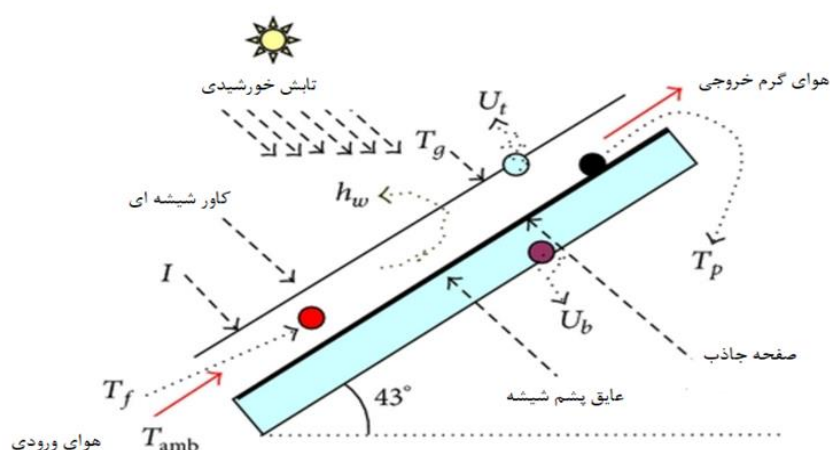
انرژی حاصل از تابش خورشید، توسط یک صفحه جاذب توسط سیال هوا جذب شده و برای گرمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد. گرمایش هوای خورشیدی برای گرمایش یا تهویه هوای ساختمان‌ها یا تجهیزات حرارتی کاربرد دارد. سیستم مذکور قادر به تامین تمام و یا بخشی از بار حرارتی ساختمان می‌باشد.

معرفی اجزای دستگاه هواگرمکن خورشیدی

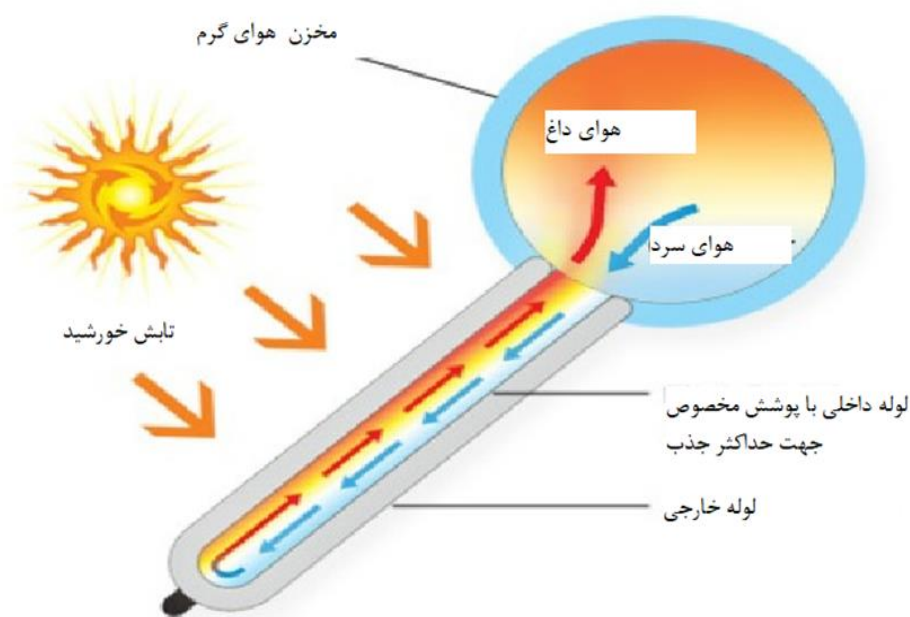
اجزاء اصلی دستگاه را می‌توان به دو دسته زیر تقسیم بندی کرد:

- واحد خارجی: شامل فن و سطوح کلکتور جاذب حرارت
- واحد داخلی: سیستم انتقال، سیستم کنترل

انواع هواگرمکن‌های خورشیدی بر اساس نوع کلکتور به دو دسته هوا گرمکن با کلکتور صفحه تخت (شکل ۹-۱) و هواگرمکن خورشیدی با کلکتور خورشیدی لوله خلاء (شکل ۱۰-۱) دسته‌بندی می‌شوند.



شکل ۹-۱ هواگرمکن خورشیدی با کلکتور صفحه تخت [۷]



شکل ۱-۱۰ هواگرمکن خورشیدی با کلکتور لوله خلاء [۷]

زمینه‌های کاربرد هواگرمکن‌های خورشیدی:

ویژگی اصلی سیستم هواگرمکن‌های خورشیدی تامین مقدار نامحدود هوای تازه و گرم ورودی به ساختمان می‌باشد. هوای گرم تولید شده قابلیت استفاده در واحدهای مسکونی و صنعتی را دارا می‌باشد. براین اساس عمده کاربردهای دستگاه مذکور عبارت است از:

- واحدهای مسکونی و اقامتی
- انبارهای ذخیره مواد
- کارگاه‌های صنعتی، تعمیرگاه‌ها و واحدهای نظامی
- مراکز آموزشی و فرهنگی (شامل مدارس، سالن‌های ورزشی و ...)
- مراکز تجاری (شامل فروشگاه‌های بزرگ و ...)

• نگهداری و خشک کردن محصولات کشاورزی

انواع سیستم های هواگرمکن خورشیدی بر اساس سیکل عملکرد

الف: هوا گرمکن فعال: در سیستم های فعال جریان هوا توسط نیروی محرکه خارجی (مثل فن) صورت می پذیرد. اما وجود سیستم طبیعی لزوماً با حذف سیستم مکانیکی همراه نیست، بلکه ترکیب این دو سیستم باعث می شود در روزهای ابری که سیستم طبیعی پاسخ گوی نیاز گرمایشی نمی باشد، با استفاده از سیستم کمکی (استفاده از سوخت یا الکتریسیته) شرایط آسایش ساکنین فراهم گردد. همچنین در سایر ایام میزان مصرف انرژی فسیلی و یا الکتریسیته در ساختمان به حداقل کاهش یابد.

ب: هوا گرمکن غیر فعال: در سیستم های غیر فعال عمدتاً جریان هوا بصورت طبیعی و بر اساس اختلاف وزن مخصوص هوای گرم با هوای سرد به چرخش می افتد.

۱-۷- خشک کن های خورشیدی

خشک کردن یکی از قدیمی ترین روش های نگهداری مواد غذایی است که رطوبت را از بین می برد و رشد باکتری ها، مخمرها که به طور معمول مواد غذایی را خراب می کنند در این فرآیند متوقف می شود، اما آنزیم ها را به طور کامل غیر فعال نمی کند. همچنین خشک کردن یکی از روش هایی است که می توان جهت افزایش ارزش افزوده محصولات کشاورزی و بالا بردن سود کشاورز از آن بهره برد. استفاده از انرژی خورشید برای خشک کردن میوه ها و دیگر محصولات کشاورزی غالباً به روش سنتی و با پهن کردن میوه در برابر تابش آفتاب انجام می شود. آلودگی ناشی از حمله قارچ ها و حشرات و پرندگان و جوندگان و نیز بارش باران های ناگهانی و تأثیر دیگر عوامل جوی همچون باد و خاک به اضافه یکنواخت نشدن خشکی و مدت طولانی ای که برای خشک شدن محصولات باید طی شود، کاربرد این روش را با محدودیت های بسیاری مواجه کرده است. محصولات خشکی که به این روش تولید می شود، از لحاظ

بهداشتی نامطلوب است و بازارپسند نیست. در سال‌های اخیر با توجه به رشد فزاینده مصرف سوخت‌های فسیلی و آلودگی محیط زیست و قیمت بالای این سوخت‌ها و هم‌چنین بالا رفتن قیمت تمام شده محصولات باعث شده تا محققین و تولید کنندگان به سمت استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع فراوان و در دسترس متمایل شوند. در جهان در زمینه طراحی و ساخت تجهیزات مکانیزه گوناگون برای جذب نور خورشید و استفاده مفید از آن، تلاش‌های بسیاری شده است که از آن جمله می‌توان خشک‌کن‌های خورشیدی صنعتی و خانگی را نام برد.

انواع سیستم های خشک کردن خورشیدی:

خشک‌کن خورشیدی برحسب روش گرم شدن به چند دسته طبقه بندی می‌شود. در حالت کلی خشک‌کن خورشیدی به دو گروه اصلی تقسیم بندی می‌شود:

الف - غیرفعال (گردش طبیعی هوا)

در سیستم غیرفعال، هوا به طور طبیعی گرم می‌شود و بر اثر جریان طبیعی باد در میان لایه‌های محصول به حرکت درمی‌آید.

ب - فعال (گردش اجباری هوا)

در سیستم فعال، جریان هوای گرم از طریق فن‌های مکنده یا دمنده در لایه محصول به حرکت درمی‌آید

۸-۱- انواع خشک‌کن‌های خورشیدی از نظر ساختار

۸-۱-۱- خشک‌کن خورشیدی از نوع یکپارچه یا مستقیم

این روش جزء ساده‌ترین و ابتدایی‌ترین روش‌های ساخت دستگاه خشک‌کن می‌باشد. در روش مستقیم با تابش مستقیم خورشید بر محصول، عملیات خشک شدن صورت می‌گیرد. در این نوع خشک‌کن، محصول روی سینی‌هایی که در محفظه‌ای از جنس چوب یا فلز و با درِ شیشه‌ای و یا

پلاستیک شفاف قرار دارد پهن می‌شود. بدنه این نوع خشک‌کن در همه انواع آن دارای عایق بندی بدنه نمی‌باشد و نسبت به سایر دستگاه‌ها بازده بالایی ندارد. تابش مستقیم خورشید باعث خشک شدن محصول می‌شود. ساخت و طراحی این دستگاه بسیار ساده و عموماً توسط مواد ساده در اطراف خودمان به راحتی ساخته می‌شود.



شکل ۱۱-۱ خشک‌کن خورشیدی مستقیم [۸]

۱-۸-۲- خشک‌کن خورشیدی از نوع توزیعی یا غیرمستقیم

در روش غیرمستقیم، هوا روی صفحه سیاه رنگی به نام صفحه جاذب که از جنس فلز ورق گالوانیزه به رنگ مشکی ساخته شده است جریان پیدا می‌کند و بر اثر جذب انرژی حرارتی خورشید گرم می‌شود. سپس هوای گرم شده از روی محصول عبور می‌کند و باعث خشک شدن آن می‌شود. هوا عموماً به وسیله دمنده‌ای برقی و یا بوسیله جریان همرفت به داخل محفظه خشک‌کن جریان می‌یابد. هنگام استفاده از فن باید هوا را توسط لوله‌های فلزی که در برابر حرارت مقاوم باشند به داخل محفظه خشک‌کن انتقال داد. همچنین این لوله‌ها باید به خوبی عایق بندی

شده باشند تا اتلاف حرارتی به حداقل برسد.

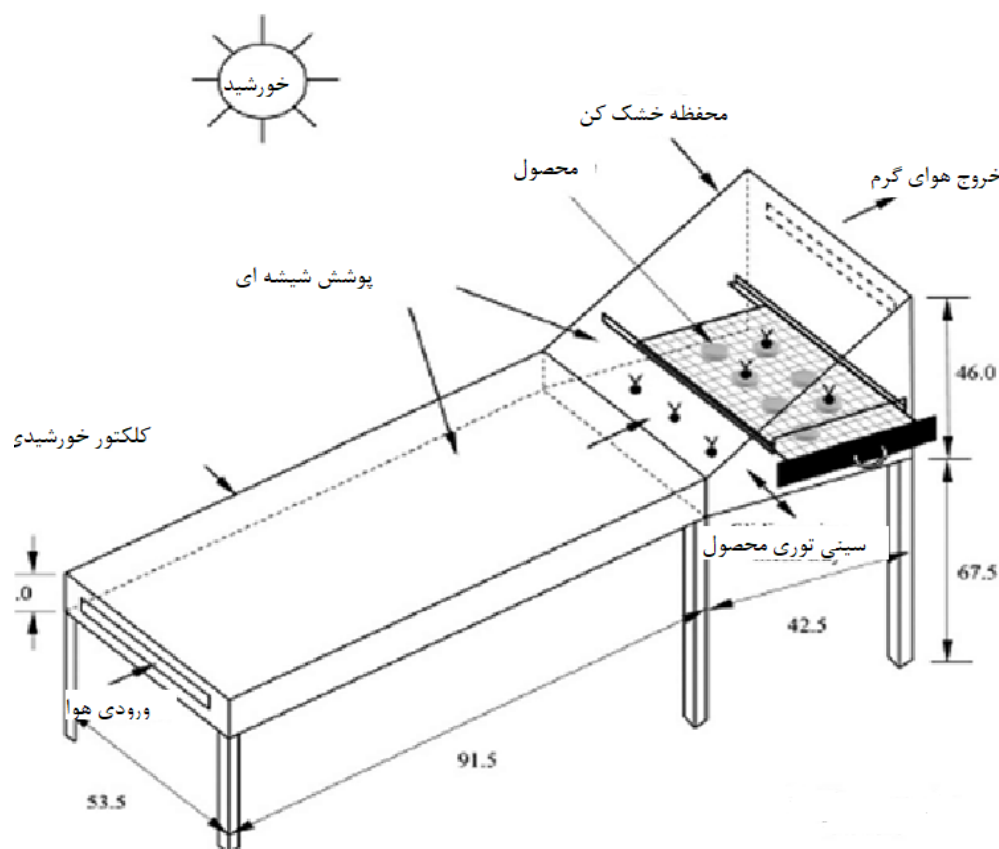


شکل ۱۲-۱ دستگاه خشک کن خورشیدی غیرمستقیم [۸]

۱-۸-۳- خشک کن های خورشیدی از نوع ترکیبی

در روش ترکیبی، از هر دو سیستم گرمایشی مستقیم و غیرمستقیم استفاده می شود، به این ترتیب که هوا پس از عبور از صفحه جاذب گرم می شود و از قسمت زیرین سینی هایی که محصول روی آن پهن شده است به سمت بالا جریان پیدا می کند. از طرفی محفظه سینی های محصول، سطح شیشه ای شیب داری دارد که از طریق آن، خورشید به صورت مستقیم به محصول می تابد و امکان استفاده هم زمان انرژی خورشیدی جهت تسریع در روند خشک شدن را فراهم

می‌سازد. جنس بدنه این نوع خشک‌کن همانند مدل‌های قبلی از مواد مختلفی می‌تواند باشد.



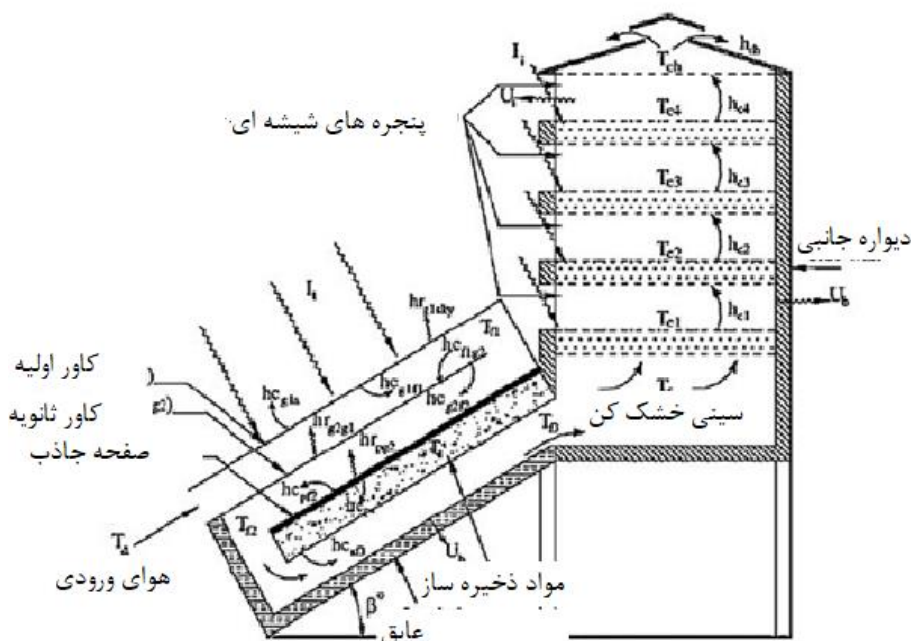
شکل ۱۳-۱ خشک‌کن خورشیدی ترکیبی [۱]

- دستگاه خشک‌کن خورشیدی ترکیبی خود به چند دسته تقسیم می‌شوند که شامل:

الف: سیستم خشک کردن خورشیدی با ذخیره گرما

در این روش از مواد ذخیره ساز انرژی جهت ذخیره انرژی در ساعات تابش خورشید و آزاد سازی تابش جذب شده در ساعات غیر تابش استفاده می‌شود. مواد مورد استفاده در این روش از جنس سنگ ریزه و آب می‌تواند باشد. در این روش برای جذب حداکثری تابش و به حداقل رساندن اتلاف انرژی از سطح جاذب خورشیدی از دو صفحه بازتابنده در بالای صفحه جاذب استفاده شده است که باعث افزایش چشمگیر انرژی گرمایی در صفحه جاذب شده است و ساعت خشک شدن را بسیار کاهش می‌دهد. در این روش علاوه بر استفاده از دو صفحه

بازتابنده، در زیر صفحه جاذب از سنگ ریزه به عنوان ذخیره ساز انرژی استفاده شده است تا در ساعاتی که تابش خورشید وجود ندارد از گرمای ذخیره شده برای خشک کردن محصول استفاده شود.



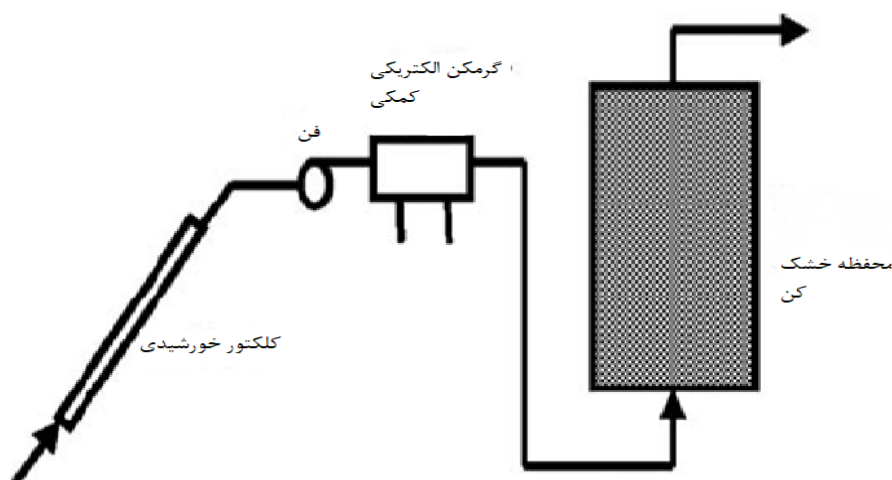
شکل ۱۴-۱ دستگاه خشک کن خورشیدی ترکیبی با دو صفحه جاذب و مواد ذخیره ساز [۱]

ب: سیستم خشک کردن خورشیدی با واحد کمکی

• واحد کمکی با گرمکن الکتریکی

این سیستم از کلکتور، محفظه خشک کن، فن و بخاری کمکی تشکیل شده است. شکل شماره (۱۵-۱) یک خشک کن خورشیدی با واحد کمکی متشکل از یک گرم کن الکتریکی را نشان می دهد. این سیستم متشکل از یک صفحه جاذب، اتاقک خشک کن، فن و یک واحد گرمکن الکتریکی می باشد. از این واحد گرمکن الکتریکی در ساعاتی که تابش خورشید کم و یا موجود نیست استفاده می شود. مدت زمان خشک کردن در مقایسه با خشک کردن خورشیدی به

روش سنتی در برخی محصولات مشابه از ۱/۸ الی ۲/۲ برابر کاهش یافته است.

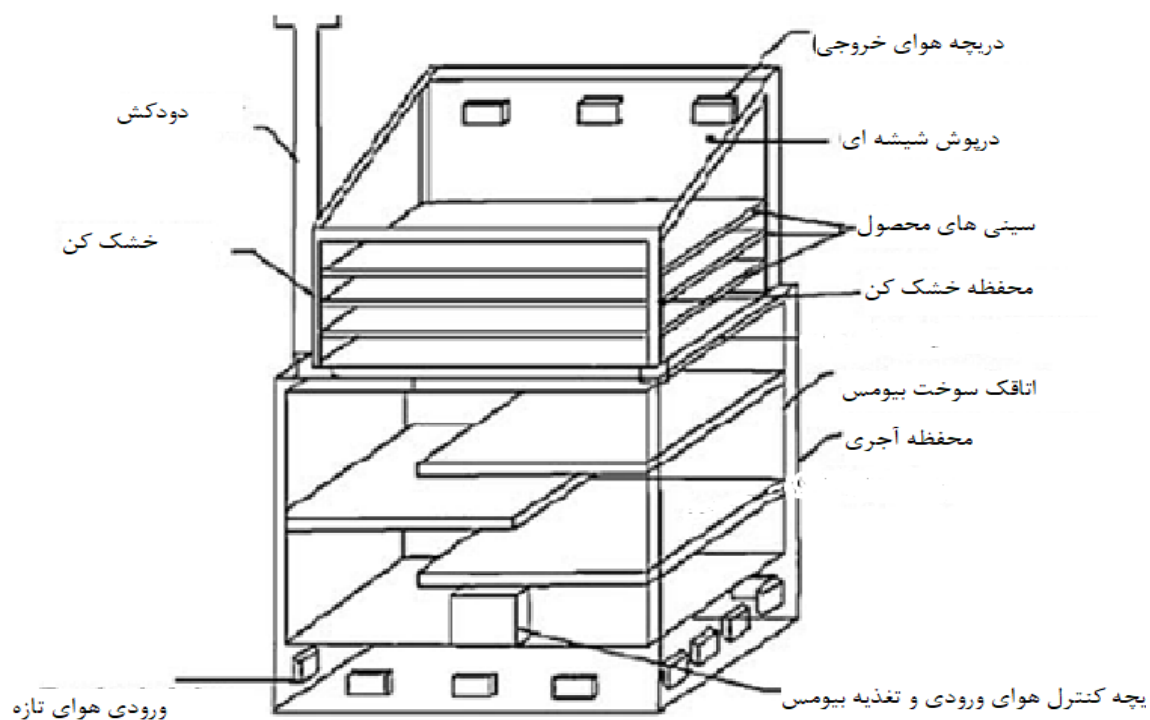


شکل ۱۵-۱ دستگاه خشک کن خورشیدی ترکیبی با واحد گرمایش الکتریکی کمکی [۱]

• واحد کمکی با سوخت بیومس

در شکل (۱-۱۶) یک خشک کن خورشیدی همرفت طبیعی از نوع مستقیم را با یک مشعل زیست توده ساده را مشاهده می کنید. این سیستم قادر به ایجاد جریان کافی و مداوم از دمای هوای گرم بین ۵۵ و ۶۰ درجه سانتیگراد می باشد. این سیستم به دلیل سرمایه گذاری کم برای کاربرد در مزارع کوچک مناسب است. خشک کن خورشیدی ترکیبی با سوخت بیومس متشکل از یک اجاق گاز بخار کنترل کننده خودکار، یک کابینت خشک کن و یک جمع کننده صفحه تخت خورشیدی است. نتایج استفاده از این نوع خشک کن برای محصولی مانند موز مدت زمان خشک شدن را از ۴۸ و ۶۶ ساعت به ۱۸ و ۲۲ ساعت کاهش داد. حداکثر درجه حرارت مجاز برای خشک کردن میوه ها و سبزیجات حدود ۶۰ است. دمای هوای ورودی به محفظه خشک کردن باید در این مقدار

کنترل شود.



شکل ۱۶-۱ خشک کن خورشیدی با واحد کمکی سوخت بیومس [۱]

خشک کن ها بر اساس نوع کلکتور همانند هواگرمکن ها به دو دسته دارای کلکتور صفحه تخت و کلکتور لوله خلا تقسیم می شوند. در این پایان نامه خشک کن خورشیدی با کلکتور لوله خلا که تاکنون کمتر مورد استفاده قرار گرفته است مدنظر می باشد.

۲- فصل دوم

مروری بر پژوهش‌های پیشین

۲-۱- مقدمه

قبل از اختراع مواد افزودنی شیمیایی برای نگه داشتن غذاهای تازه، خشک کردن یک روش طبیعی برای حفظ میوه‌ها بود. در حال حاضر صنعت خشک کردن میوه‌ها به یک تجارت بزرگ تبدیل شده است. در این بین دستیابی به بازارهای مصرف و افزایش درآمد تولیدکنندگان بخش کشاورزی منوط به افزایش کمی و کیفی محصولات کشاورزی و فرآورده‌های آنها است. تولیدات باغبانی ایران به جهت شرایط جغرافیایی و اقلیمی مناسب بسیار خوب بوده و از مزیت نسبی مناسبی برای تولید برخوردار است و می‌تواند در تجارت جهانی قابل رقابت باشد. فرآیند خشک کردن به طور وسیعی برای نگهداری میوه‌ها و سبزی‌ها به کار می‌رود که هدف اصلی کاهش رطوبت یا همان محتوی آب محصول در حدی است که فساد میکروبی و واکنش‌های شیمیایی به حداقل برسد. به طور کلی بیشتر میوه‌ها پس از برداشت باید بلافاصله مصرف شوند و یا اینکه به روش خاصی نگهداری شوند. یکی از این روش‌ها خشک کردن میوه‌ها می‌باشد. خشک کردن میوه‌ها و سبزی‌ها یکی از قدیمی‌ترین روش‌های حفظ مواد غذایی بوده و هم اکنون نیز یک شیوه کاربردی برای افزایش طول عمر نگهداری آنها است. هنگامی که مقدار قابل توجهی رطوبت از یک میوه خارج شود زمان نگهداری آن از طریق مهار کردن رشد میکروبی و کاهش فعالیت آنزیمی افزایش می‌یابد. مزیت دیگر خشک کردن میوه‌ها که می‌توان از آن به عنوان مهم‌ترین مزیت خشک کردن نام برد، افزایش ظرفیت نگهداری ماده خشک است. به عبارت دیگر خشک کردن میوه کاهش اندازه ی آن را در برداشته که این امر برای حمل و نقل و ذخیره سازی قابل اهمیت است. از سوی دیگر با خشک کردن میوه‌ها دیگر نیازی به سیستم سردخانه‌ی گران قیمت برای حفظ آنها نیست. از میان میوه‌ها خشک کردن انگور، انجیر، آلو، زرد آلو و هلو مرسوم و در سطح تجاری انجام می‌شود و خشک کردن سیب، گلابی، موز و آناناس با توجه به سودآوری آنها در سال‌های اخیر مورد توجه خاص قرار گرفته است. نخستین روش در خشک کردن محصولات استفاده از نور طبیعی خورشید بوده است. افزایش بهره‌وری در فرآیند خشک کردن میوه‌ها می‌تواند به کاهش زمان و سودآوری این فرآیند تبدیل شود. لذا در این فصل به بررسی سوابق علمی و عملی استفاده از هواگرمکن‌ها و خشک‌کن‌های خورشیدی پرداخته می‌شود.

۲-۲- مطالعات انجام شده در زمینه هوا گرمکن‌های خورشیدی

استفاده از زبری مصنوعی روی سطح یک روش موثر برای افزایش سرعت انتقال حرارت به جریان هوای عبوری در مجرای یک هوا گرمکن خورشیدی است. در یک مطالعه مقایسه کارایی موثر هوا گرمکن‌های خورشیدی با انواع مختلف هندسه ارائه شده است [۹]. بازده موثر با استفاده از روابط انتقال گرما و ضریب اصطکاک ایجاد شده توسط محققان مختلف در محدوده بررسی شده از پارامترهای عملیاتی و سیستم محاسبه شده است. تعدادی از محققان تحقیق در مورد انتقال حرارت و اصطکاک برای کانال با زبری مصنوعی هوا گرمکن‌های خورشیدی را بررسی کردند. پراساد و ساینی تأثیر ارتفاع نسبی زبری و سطح زبری نسبی را بر انتقال گرما و ضریب اصطکاک در دنده‌های عرضی بررسی کردند و به نتایج زیر رسیدند:

- برای کارایی موثر هوا گرمکن خورشیدی، ارتفاع زبری نسبی (e/D) به عنوان پارامتر قوی عنصر زبری در نظر گرفته می‌شود.

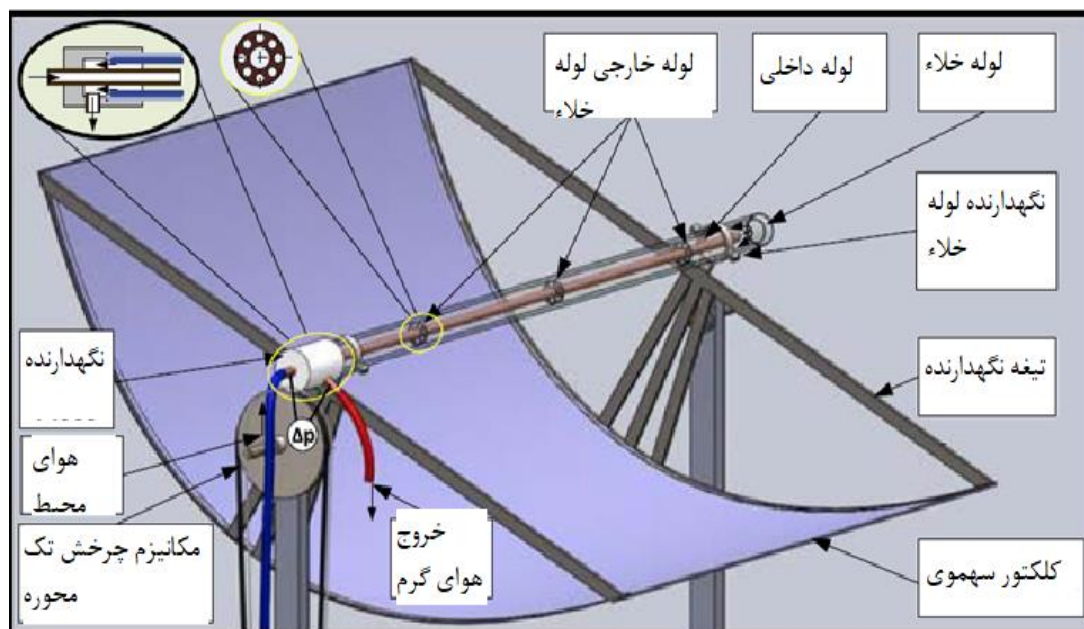
- تأثیر ارتفاع زبری نسبی بر کارایی موثر برای مقادیر بهینه سایر پارامترها بسیار قابل ملاحظه است.

از این ارقام می‌توان مشاهده کرد که برای مقادیر داده شده از پارامترهای زبری، روند مشابهی در تغییر کارایی موثر با عدد رینولدز بدست می‌آید. در ابتدا کارایی موثر با افزایش تعداد رینولدز افزایش می‌یابد، به حداکثر می‌رسد و پس از آن شروع به کاهش می‌کند.

دنده‌های مکرر یک روش موثر برای افزایش انتقال حرارت همرفت در کانال‌ها در نظر گرفته می‌شود. به منظور ایجاد عملکرد بهتر کانال‌های هوا در هوا گرمکن‌های خورشیدی با دنده‌های زبر، هم انتقال گرما و هم خصوصیات اصطکاک باید در نظر گرفته شود. در یک مقاله ضرایب انتقال حرارت و اصطکاک به طور آزمایشی برای یک کانال مستطیل شکل دارای یک دیواره که دارای دنده‌های متوالی است و با شار یکنواختی گرم می‌شود بررسی شده است. دیواره‌های دیگر صاف و عایق بندی شده بودند. [۱۰]

عملکرد یک کلکتور خورشیدی سهموی با لوله خلاء به طور آزمایشی به عنوان یک واحد سلول فشرده برای

هوا گرمکن با سرعت جریان پایین و ثابت مورد مطالعه قرار گرفت. سیستم مورد بررسی توسط بکری و همکاران [۱۱] برای بدست آوردن افزایش دمای متوسط استفاده شد. به منظور افزایش دما، یکی از این واحدهای سلول لوله خلاء با یک متمرکز کننده سهموی خورشیدی با چرخش تک محوره (SPC) ادغام شد و همزمان در روزهای آفتابی بررسی شد. مشخص شد که افزایش دمای لحظه ای به دست آمده مستقل از میزان جریان است اما به تغییرات خورشید حساس است. این ویژگی نشانگر زمان کوتاه پاسخ این سیستم است. در مورد یک واحد سلول ساده، یک اختلاف دما بالاتر از ۶۰ درجه سانتیگراد برای شدت تابش متوسط خورشید با 710 W/m^2 حاصل شد. از طرف دیگر، در صورت وجود واحد سلول با SPC، اختلاف دما ۱۰۰ درجه سانتیگراد برای شدت تابش کم خورشیدی 600 W/m^2 بدست آمد. با استفاده از این تکنیک که از یک لوله خلاء به عنوان دریافت کننده کلکتور خورشیدی استفاده شد باعث شد اتلاف حرارتی از لوله خلاء به دلیل جذب بالای روکش لوله داخلی و همچنین خلاء موجود بین دو لوله به حداقل برسد. نتایج این آزمایش برای دبی های مختلف به دست آوردن دماهایی بین ۱۰۶ الی ۱۱۳ درجه سانتیگراد است که نشان دهنده پتانسیل بالای این سیستم برای تولید دماهای متوسط و بالا با دبی جریان پایین است



شکل ۱-۲ کلکتور سهموی با دریافت کننده لوله خلاء [۱۱]

زارع [۱۲] در دانشگاه شیراز کلکتور با جاذب متخلخل با دو نوع پوشش شیشه ای تخت و پله ای را برای بررسی

کارایی حرارتی مورد آزمایش قرار داد. این کلکتور را با پوشش شیشه‌ای پله‌ای و تخت و صفحه جاذب آلومینیومی متخلخل (با ضریب تخلخل ثابت 0.314 و ضخامت $2/5 \text{ mm}$) در معرض مستقیم تابش خورشید مورد بررسی قرار داد. اثر نوع پوشش شیشه‌ای کلکتور بر کارایی حرارتی آن در محدوده دبی جرمی هوا (0.056 تا $0.384 \text{ kgm}^2/\text{s}$) در شش دبی هوای ورودی مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایشات در سه تکرار در فواصل زمانی ساعت ۱۱ تا ۱۳، با متوسط تابش خورشید در این فاصله زمانی برابر با 1404 W/m^2 انجام گرفت. نتایج حاصله از این آزمایشات حاکی از صحت این نظریه مورد بررسی در این تحقیق است که با تغییر نوع پوشش شیشه‌ای از حالت تخت به نوع پله‌ای، بازده حرارتی کلکتور افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت در دبی‌های پایین (دبی کمتر از $0.1 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$) بازده برای دو پوشش متفاوت تقریباً یکی است که نتیجه می‌شود در دبی‌های پایین نوع پوشش تأثیر چندانی بر بازدهی کلکتور ندارد. اما با دقت در می‌یابیم که در دبی‌های بالا در کلکتور با پوشش پله‌ای تغییرات بازده کمینه و بیشینه بیشتر از حالتی است که پوشش از نوع تخت باشد. با بررسی اثر پوشش شیشه‌ای پله‌ای و مقایسه با آزمایشات گذشته مشاهده می‌شود که در پوشش شیشه‌ای پله‌ای به دلیل عبور هوا از فواصل بین شیشه‌ها تلفات حرارتی جاذب و شیشه‌ها کمتر شده و اثر مثبتی در افزایش بازده به منظور کاربرد در خشک‌کن‌های خورشیدی داشته است.

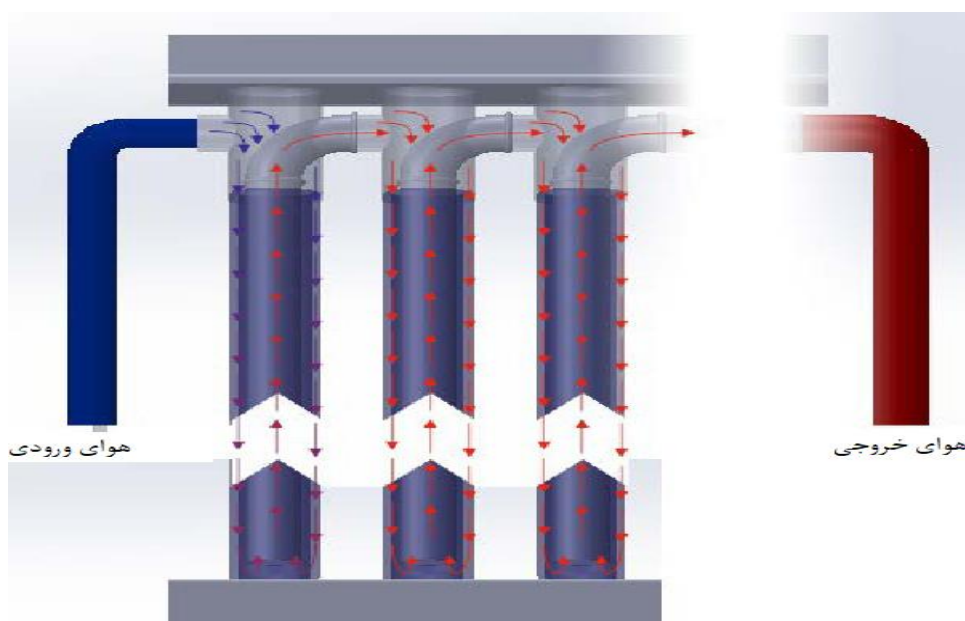
در مطالعه دیگر، بررسی عددی عملکرد حرارتی و هیدرولیکی هوا گرمکن‌های خورشیدی با زبری‌های V شکل روی سطح جاذب انرژی صورت گرفت تا مقادیر عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در کانال مستطیلی شکل گرمکن و نحوه تغییرات این پارامترها با توجه به هندسه زبری‌ها و پارامترهای عملیاتی به کمک روش حل عددی بررسی گردد و با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی مقایسه گردد. با بررسی دو کانال با زبری‌های V شکل دارای شکاف با عرض نسبی (g/e) برابر با 0.5 و $1/0$ می‌توان دریافت که عملکرد حرارتی در کانال با (g/e) برابر با $1/0$ بهتر از (g/e) برابر با 0.5 می‌باشد. از طرفی با به کارگیری زبری‌ها روی سطح گرم، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک به ترتیب $6/16$ و $6/71$ برابر آن‌ها در یک کانال بدون زبری گردیده است. در ادامه با تغییر سطح مقطع تیغه‌ها از دایره به مثلثی شکل یک افزایش در عدد ناسلت و ضریب اصطکاک حاصل گردید به طوری که مقادیر آن‌ها در مقایسه با یک کانال بدون زبری به ترتیب $6/9$ و $8/1$ برابر ثبت گردید. تغییر سطح مقطع تیغه‌ها از دایره به مثلث در زبری‌های دارای

شکاف با عرض نسبی $1/0$ باعث رشد بیشتر عدد ناسلت گردید. در این نوع گرمکن ها تا $20/7\%$ گردید. چرا که این امر نواحی مرده ایجاد شده دقیقاً در پشت تیغه ها و به دنبال آن دما در این نواحی را کاهش داده که در نتیجه آن، ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد [۱۳].

زمردیان [۱۳] یک گرمکن خورشیدی با پوشش تک لایه ای که دارای صفحه جاذب فلزی مشبک است را برای دستیابی به اثر میزان مشبک بودن صفحه جاذب و نرخ عبور هوای خنک کننده بر بازده آن و همچنین مقدار افت فشار هوا در شرایط طبیعی مورد آزمایش قرار داد. در روی سه صفحه جاذب از جنس آلومینیوم با آرایش مربعی سوراخ های منظمی به شکل دایره تعبیه گردید، بطوریکه قطر سوراخ های ایجاد شده و همچنین فاصله آن ها نسبت بهم متفاوت بودند. پنج نرخ عبور هوا $0/065$ تا $0/032$ کیلو گرم بر متر مربع - ثانیه) برای انجام آزمایشات انتخاب گردیدند. هوای وارد شده به گرمکن ابتدا توسط امواج کوتاه جذب شده توسط پوشش شفاف و امواج بلند ساطع شده توسط صفحه جاذب پیش گرم شده و سپس از صفحه مشک جاذب عبور کرده و گرم می شود. بازده حرارتی تا 84% برای مشبک ترین صفحه جاذب و در بالاترین نرخ عبور هوا قابل دسترسی است. کلکتور مجهز به صفحه جاذب با کمترین تخلخل حداکثر افت فشار را نشان داد. برای ارزیابی حضور پوشش شیشه ای و اثر آن در بازده حرارتی کلکتور خورشیدی در شرایط طبیعی در چند آزمایش پوشش مزبور برداشته و آزمایش هایی انجام گردید. نتایج نشان دادند که جمع کننده بدون پوشش بطور متوسط بازدهی حدود 25 درصد کمتر از جمع کننده پوشش دار دارد که البته این کاهش را می توان بحساب افزایش تلفات حرارتی بصورت تابشی و همرفتی در کلکتور بدون پوشش گذاشت. جمع کننده بدون پوشش مقادیر کمتری از افت فشار هوا را نشان داد. هوای محیط بعد از گذر از گرمکن خورشیدی بین 21 تا 59 درجه سانتیگراد گرم تر از هوای ورودی می گردد و از آنجائی که کلکتور بصورت مدار باز کار می کند همواره می تواند هوای گرم و تازه برای مقاصد خشک کردن فراهم کند.

در دانشگاه سلیمان دمیرال ترکیه طراحی کلکتور لوله خلاء به صورت سری برای هوا گرمکن خورشیدی صورت گرفت [۱۴]. با استفاده از اتصال لوله های خلاء به صورت سری به منظور تهیه آب و هوای گرم برای مصارف آب گرم خانه ها و اماکنی همچون هتل ها، سالن های ورزشی و غیره و همچنین هوای گرم به منظور گرمایش فضا،

گلخانه‌ها و همچنین کاربردهایی نظیر خشک کردن محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته است. کارایی حرارتی لوله‌های خلاء از کلکتورهای صفحه تخت بالاتر است با این حال، هیچ طرحی برای استفاده از لوله‌های خلاء به عنوان گرم کننده هوا وجود ندارد. مهمترین ویژگی‌های کلکتور طراحی شده استفاده از لوله‌های خلاء و اتصال سری لوله‌های آن‌ها است. استفاده از این کلکتورها در گرمایش هوا باعث افزایش کارایی می‌شود. علاوه بر این، اتصال سری لوله‌ها از افزایش دمای هوای خروجی اطمینان حاصل می‌کند. مقادیر عملکرد برای لوله خلاء در محدوده ۴۸٪ الی ۵۸٪ متفاوت است در حالی که برای کلکتورهای سطح صفحه تخت تحت همان شرایط این مقدار در محدوده ۳۷-۴۷٪ باقی می‌ماند.

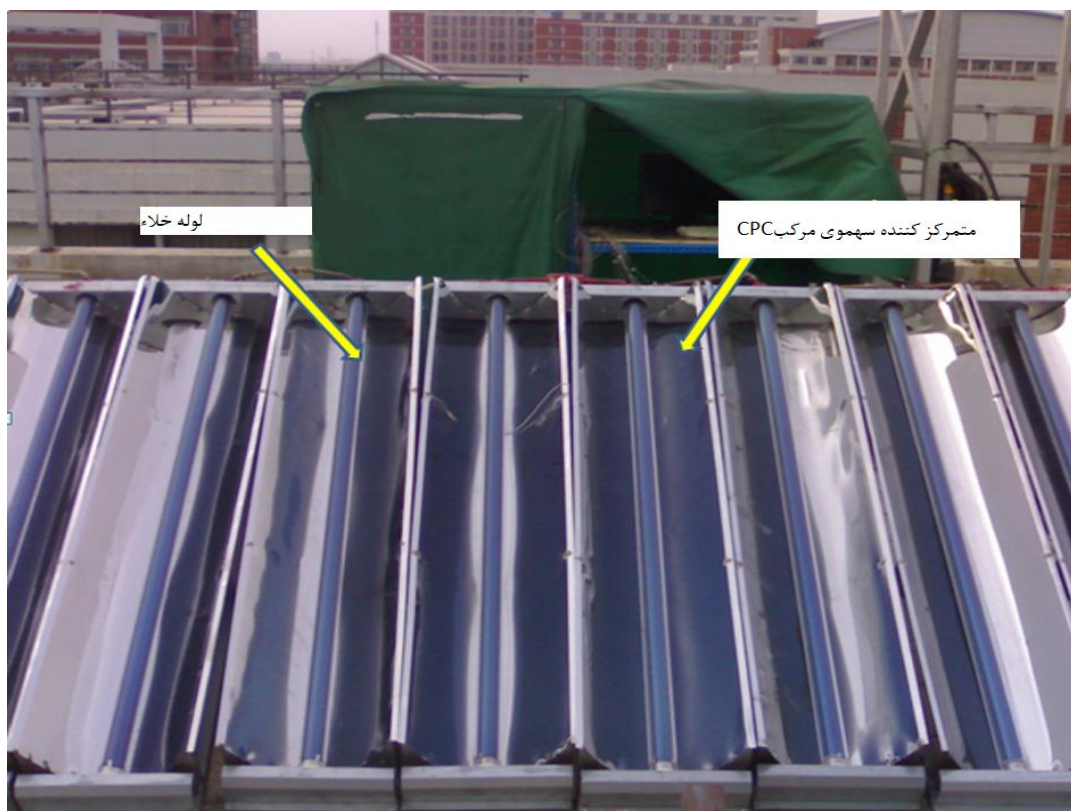


شکل ۲-۲ اتصال سری لوله‌های خلاء جهت افزایش حدکثری دما [۱۴]

ساخت و مطالعه عملکرد هوا گرمکن خورشیدی همراه با لوله‌های خلاء و لوله‌های حرارتی (هیت پایپ) توسط دواسنا و همکاران [۱۵] انجام شد. از لوله‌های حرارتی برای جذب انرژی خورشیدی و از لوله‌های خلاء برای جلوگیری از تلفات حرارتی همرفت استفاده می‌شود. برای پوشش دهی سمت داخلی لوله خلاء از پوشش جاذب مخصوص استفاده می‌شود. هوا توسط یک فن، که توسط یک صفحه فتوولتائیک هدایت می‌شود به کانالی با اندازه 10×10 سانتی متر وارد می‌شود. از شش لوله حرارتی و شش لوله خلاء برای جذب تابش خورشید استفاده می‌شود. برای

اندازه گیری تابش خورشیدی از یک شارسنج خورشیدی استفاده می شود. آزمایشات با و بدون لوله خلاء انجام می شود. برای هر دو سیستم، تغییرات بازده حرارتی با توجه به زمان گزارش شده است. حداکثر بازده حرارتی بدست آمده برای لوله خلاء همراه با لوله گرمایی ۳۵٪ است. میانگین بازده لوله خلاء با لوله حرارتی ۱/۵ برابری است که فقط لوله گرمایی به تنهایی استفاده می شود.

وانگ و همکاران [۱۶] آزمایش و شبیه سازی بر روی یک هوا گرمکن خورشیدی لوله خلاء تمام شیشه ای با یک متمرکز کننده ساده سهموی (CPC) را انجام دادند. این سیستم از ۱۰ پانل جمع آوری به هم پیوسته تشکیل شده است و هر پانل شامل یک CPC ساده و یک لوله خلاء کاملاً شیشه ای با یک مبدل حرارتی لوله مسی U شکل است که در داخل آن نصب شده است. هوا هنگام عبور از هر لوله مسی U شکل به تدریج گرم می شود. مدل انتقال حرارت هوا گرمکن خورشیدی، دمای هوای خروجی، توان حرارتی و بازده گرمایی محاسبه می شود. نتایج تئوری و تجربی نشان می دهد که سیستم آزمایشی موجود می تواند هوای گرمی تا بیش از ۲۰۰ درجه سانتیگراد تأمین کند. کل سیستم از یک وضعیت بسیار خوب برخوردار است. عملکرد کلکتور دما بالا و مدل انتقال حرارت فعلی می تواند نیازهای کلی محاسبات مهندسی را پاسخگو باشد. این سیستم برای تأمین نیاز هوای داغ با دمای ۱۵۰ الی ۲۰۰ درجه سانتیگراد طراحی شده است. نتایج تجربی نشان می دهد که سیستم هوا گرمکن خورشیدی فعلی دارای عملکرد فوق العاده ای است. دمای هوای خروجی سیستم حتی در زمستان نیز می تواند تحت دبی نسبتاً زیاد جریان هوا به ۲۰۰ درجه سانتیگراد برسد.



شکل ۲-۳ کلکتور دما بالا با لوله خلاء و متمرکز کننده CPC [۱۶]

۳-۲. مطالعات انجام شده بر روی خشک‌کن‌های خورشیدی

مطالعات زیادی در زمینه خشک‌کن‌های خورشیدی صورت گرفته است که به برخی از آنها اشاره می‌شود. وارون و همکارانش [۱۷] در انستیتو ملی هند، یک خشک‌کن خورشیدی همرفت طبیعی از نوع غیرمستقیم را ساختند. هدف از این مطالعه ارزیابی عملکرد خشک‌کن تحت حالت‌های همرفت طبیعی و اجباری خشک کردن است. در همرفت طبیعی و اجباری، سرعت جریان توده هوا به ترتیب 0.0653 کیلوگرم در ثانیه و 0.19 کیلوگرم در ثانیه رسید. هوای گرم در همرفت طبیعی به دمای متوسط خشک شدن 45 درجه سانتیگراد و در همرفت اجباری 40 درجه سانتیگراد رسید. محدوده دمای هوای خروجی از کلکتور بین 50 الی 62 و محدوده دمای محیط بین 23 الی 32 درجه سانتیگراد و دمای داخل محفظه خشک‌کن بین 45 الی 52 درجه و متوسط تابش بین 440 الی 935 W/m^2 اندازه‌گیری شد. سرعت هوای خشک‌کن برای حالت جابجایی طبیعی 0.75 m/s است. مدت زمان لازم برای خشک کردن 1800 گرم گوجه فرنگی در این حالت نسبت به حالت سنتی 56% کاهش داشت. در حالت جابجایی اجباری سرعت هوای خشک‌کن 2.18 m/s است و مدت زمان خشک کردن نسبت به حالت سنتی 65%

کاهش یافت. مقایسه بین حالت خشک کردن طبیعی و خشک کردن غیرمستقیم با فن نشان داد که مدت زمان خشک شدن بسیار کاهش می یابد و این به دلیل نرخ انتقال حرارت بالا در حالت استفاده از فن می باشد. رنگ، طعم و زمان لازم برای خشک کردن در مقایسه با خشک کردن طبیعی در محیط مطلوب است.

یک خشک کن خورشیدی نوع چرخش مجدد (ICDC) توسط چان و همکارانش [۱۸] طراحی، ساخته و آزمایش گردید. خشک کن خورشیدی از یک خوراک دهنده، دمنده سانتریفیوژ، نوار نقاله پنوماتیک و یک ساختار شفاف به عنوان محفظه خشک کن که حاوی یک قیف در بالای آن است تشکیل شده است. آزمایش با ۱۰۴ کیلوگرم برنج نشان داد که زمان خشک شدن مورد نیاز برای کاهش میزان رطوبت برنج از ۲۸/۴ (wb)٪ اولیه به رطوبت نهایی (wb) ۱۴/۳٪ به مدت ۵ ساعت بود. در طول آزمون، دمای خشک کن در ۵۰/۱ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۲۱/۷۳٪ ثابت نگه داشته شد. توان مورد نیاز نوار نقاله پنوماتیک ۵۸۱ W با کل انرژی ورودی ۲۱۰/۷ MJ شامل LPG و تابش خورشید بود. بازده خشک کن ۲۲/۴٪ محاسبه شد. آزمایش دیگر با استفاده از ۲۰۰ کیلوگرم برنج با رطوبت اولیه ۲۷/۶٪ درصد وزنی برنج نشان داده است که زمان خشک شدن مورد نیاز برای رسیدن به رطوبت نهایی ۱۴/۳ درصد ۸ ساعت بوده است. در طول آزمون دمای خشک کردن در ۴۶/۹ درجه سانتیگراد و رطوبت در ۲۱/۷٪ حفظ شد. بازده خشک کردن ۳۱/۷٪ محاسبه شد.

بنا و فولر [۱۹] یک خشک کن خورشیدی همرفت طبیعی از نوع مستقیم و یک مشعل زیست توده ساده با هم ترکیب شده اند تا یک فناوری خشک کردن مناسب برای مقیاس های کوچک برای میوه ها و سبزیجات را در مناطقی که برق ندارند نشان دهد. از یک سری آزمایش های ارزیابی سیستم، مشخص شد که ظرفیت خشک کن ۲۰-۲۲ کیلوگرم آناناس تازه است که در یک لایه واحد از برش های ضخامت ۱ سانتی متر مرتب شده است. بازده کلی خشک کردن واحد ۹٪ محاسبه شد. در طی همین آزمایش، بازده خشک شدن اجزای خورشیدی به تنهایی ۲۲٪ بود. در سایر آزمایشات کارایی مشعل در تولید گرمای مفید برای خشک کردن ۲۷٪ تخمین زده شد.

رابا و موتوکومار [۲۰] در هند یک خشک کن که از دو هوا گرمکن خورشیدی دو طرفه، یک واحد ذخیره کننده حرارت نهان، پوسته و موم پارافین، یک دمنده و یک محفظه خشک کن تشکیل شده بود ساختند. دستگاه خشک کن

با خشک کردن ۲۰ کیلوگرم فلفل قرمز در محدوده دمای هوای خشک ۳۶ تا ۶۰ درجه سانتیگراد آزمایش شد. متوسط رطوبت اولیه فلفل ۷۳/۵٪ (معادل وزنی) بود و در ۴ روز متوالی به رطوبت نهایی ۹/۷٪ (معادل وزنی) کاهش یافت. خشک‌کن به مدت ۱۰ ساعت در روزانه کار می‌کرد. از ۸:۰۰ تا ۱۸:۰۰ مخزن ذخیره گرمای نهان به خشک‌کن کمک می‌کند تا هوای گرم خروجی از کلکتور بعد از ساعت ۱۴:۳۰ که تابش به مرور کم می‌شود همچنان در دمای بالا باقی بماند تا ساعت ۱۸:۰۰. محدوده دمای محیط بین ۲۴ تا ۳۵ و بالاترین دمای مخزن ۷۰ درجه ثبت شد. این مخزن همچنین باعث کاهش نوسانات دمایی در ساعت‌هایی که هوا ابری است می‌شود. این سیستم هیبریدی تازه توسعه یافته مدت زمان خشک کردن را در مقایسه با روش خشک کردن طبیعی ۱۲۲/۸٪ کاهش داده است. کارایی انرژی و انرژی هر یک از اجزا بطور جدا بررسی شد. متوسط بازده انرژی هواگرمکن اول و دوم به ترتیب ۳۲/۵٪ و ۱۴/۱٪ و بازده انرژی هواگرمکن اول و دوم به ترتیب ۰/۹٪ و ۰/۸٪ اندازه گیری شد. بازده انرژی هواگرمکن با افزایش شدت تابش افزایش می‌یابد. بازده متوسط انرژی و انرژی مخزن ذخیره گرمای نهان ۴۳/۶٪ تا ۴۹/۸٪ و ۱۸/۳٪ الی ۲۰/۵٪ به ترتیب اندازه گیری شد. بازده متوسط محفظه خشک‌کن ۵۲/۵٪ محاسبه شد.

یک خشک‌کن خورشیدی با واحد کمکی ذغال چوب برای خشک کردن میوه‌ها توسط تیببو [۲۱] در سال ۲۰۱۵ ساخته شد. تاثیر استفاده از واحد کمکی چوب برای یک خشک‌کن غیرمستقیم خورشیدی بررسی شده است. این مقاله به بررسی خشک کردن دو میوه آناناس و انبه و تاثیر استفاده از یک واحد کمکی ذغال چوب می‌پردازد. رطوبت اولیه آناناس و انبه به ترتیب ۸۷٪ و ۸۵٪ است که باید به رطوبت نهایی ۱۶٪ و ۱۳٪ (به ترتیب) برسد. میزان کاهش رطوبت (نرخ خشک شدن) در حالی که تنها منبع مورد استفاده خورشید است برای آناناس به میزان ۲۳/۷ g/h و برای انبه به میزان ۱۵/۵ g/h می‌باشد. این میزان به ۲۵/۵ g/h و ۱۸/۳ g/h برای آناناس و انبه تغییر می‌کند زمانی که از یک واحد کمکی با سوخت ذغال چوب استفاده می‌شود و این در حالی است که بخاری کمکی تنها در زمان شب استفاده می‌شود. اگر از این بخاری به طور همزمان با تابش خورشید استفاده شود نرخ خشک شدن به ۳۲/۵ g/h برای آناناس و ۱۹/۳ g/h برای انبه تغییر می‌کند. بازده خشک کردن بین ۷/۵ الی ۹/۷ متغیر است.

در سال ۲۰۱۹ بهبود عملکرد خشک‌کن خورشیدی مستقیم با استفاده از مبدل حرارتی آب زمین گرمایی به

عنوان منبع انرژی مکمل نیز توسط سندلی و همکاران [۲۲] مورد بررسی قرار گرفت. با هدف بهبود عملکرد حرارتی خشک کن خورشیدی مستقیم، یک روش جدید تأمین گرما با استفاده از یک مبدل حرارتی لوله ای با آب زمین گرمایی، در آزمایشگاه LENREZA (آزمایشگاه توسعه انرژی های تجدید پذیر و جدید در مناطق خشک و صحرا) دانشگاه اوارگلا، الجزایر پیشنهاد و بررسی شد. مبدل حرارتی در بالای صفحه جاذب و روبروی سوراخ ها قرار داده شد تا نفوذ هوا را امکان پذیر کند. دمای آب در گردش ۷۰ درجه سانتیگراد و به طور مشابه با دمای آب زمین گرمایی در مناطق جنوبی الجزایر تنظیم شد. علاوه بر این، شبیه سازی عددی انجام شد و نتایج با آزمایش مقایسه شد. یافته ها نشان داد که ادغام مبدل حرارتی عملکرد خشک کن خورشیدی را به طور قابل توجهی بهبود می بخشد. با استفاده از مبدل حرارتی، کمترین دمای هوای خشک کن ۴۶ درجه سانتیگراد است و بالاترین دما ۵۸ درجه سانتیگراد ثبت شد. پس از غروب آفتاب و در طول شب، دمای خشک شدن هوا با مقدار متوسط ۴۶ درجه سانتیگراد تقریباً ثابت باقی می ماند. ادغام مبدل حرارتی تداوم روند خشک شدن در شب و حتی در روزهای ابری را تضمین می کند. علاوه بر اهمیت نتایج به دست آمده در رابطه با بهبود سیستم خشک کردن با یک منبع حرارتی تکمیلی، مطالعه حاضر در صورت کاربرد زیاد، می تواند آب لوله کشی را با درجه حرارت مطلوب و متوسط مطابق با ترجیح شهروندان مصرف کننده فراهم کند. با استفاده از این روش مشکل عدم قطع روند خشک شدن برطرف شده است.

در سال ۲۰۱۸ التویل و همکارانش [۲۳] از کشورهای هند و عربستان تحلیل انرژی خشک کن تونل خورشیدی ترکیبی با سیستم PV و کلکتور خورشیدی برای خشک کردن نعنای را انجام دادند. خشک کن با تونل خورشیدی ترکیبی (STD) با سیستم PV و کلکتور خورشیدی صفحه تخت ساخته شده و برای خشک کردن نعنای فلفلی مورد استفاده قرار گرفته است. خشک کن STD تحت حالت مخلوط کار کرده و با استفاده از سه لایه نعنای پر شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. عملکرد خشک کن STD با خشک کردن آفتاب طبیعی مقایسه شد و مشخص شد زمان خشک شدن بسیار کم می شود. میانگین بازده روزانه سلول فتوولتائیک ۹/۳۸٪ با میانگین دمای ۵۵ درجه سانتیگراد برای روزهای آزمایش ثبت شد. زمان خشک شدن نعنای STD از ۲۱۰ تا ۳۶۰ دقیقه متغیر بود، در حالی که این زمان برای خشک شدن در محیط از ۲۷۰ تا ۴۲۰ دقیقه متفاوت بود. بیشترین بازده خشک شدن ۳۰/۷۱ درصد و کارایی کلی ۱۶/۳۲ درصد در حالت دو طبقه نعنای ثبت شد. دمای خشک شدن تأثیر چندانی بر رنگ

نمونه‌های خشک شده نداشت.

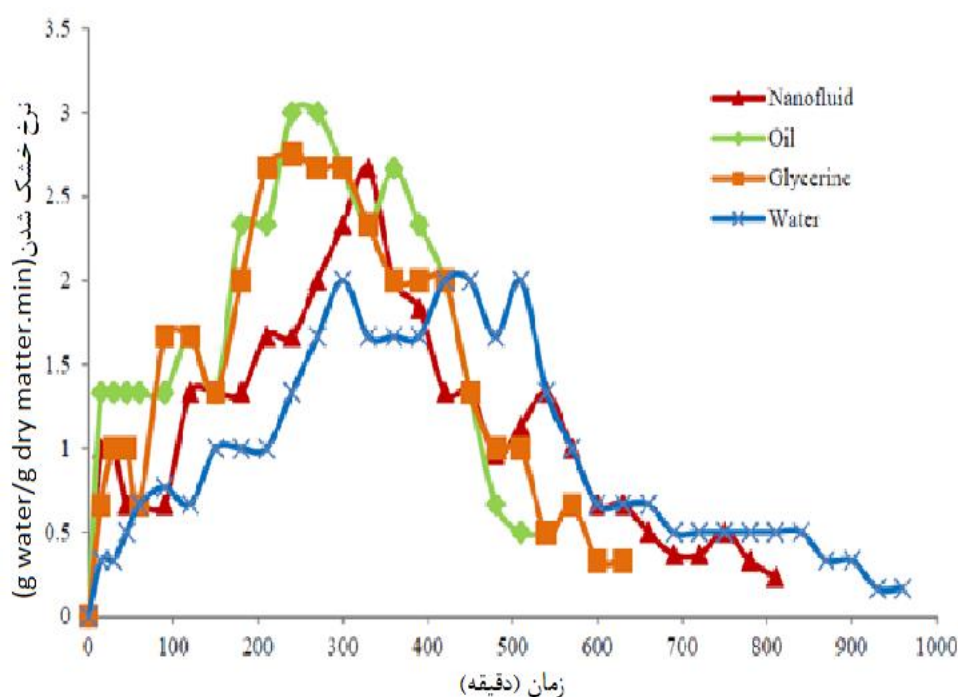
در مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۲۰ مدل سازی یک خشک‌کن خورشیدی ترکیبی با حالت همرفت طبیعی برای خشک کردن محصولات کشاورزی در محیطی با مدت زمان کوتاه آفتاب صورت گرفت [۲۴]. از این خشک‌کن خورشیدی برای خشک کردن فلفل قرمز در شرایط آب و هوایی منطقه ساحلی جنوب شرقی نیجریه که از شدت تابش خورشید کم و با مدت زمان کوتاه آفتاب برخوردار است استفاده شده است. در این مدل خصوصیات ترموفیزیکی هوای خشک‌کن و فلفل قرمز خشک شده در نظر گرفته شده است. مقادیر تجربی نسبت رطوبت، دما و رطوبت نسبی در طی فرآیند خشک کردن خورشیدی در حالت مخلوط با و بدون NaCl برای اعتبار سنجی مدل پیشنهادی استفاده شد. نتایج شبیه سازی عددی مطابقت نزدیک با نتایج تجربی داشتند. مدل موجود می‌تواند به عنوان پایگاه‌های مرجع خوبی برای توضیح پدیده خشک کردن خشک‌کن خورشیدی در حالت مخلوط برای سایر محصولات کشاورزی باشد. در صورتی که خواص ترموفیزیکی آن محصولات شناخته شده باشد. با استفاده از این مدل خشک‌کن سالانه پتانسیل کاهش انتشار CO₂ ناشی از سوختن ذغال سنگ به میزان ۱۲۸۰۱۴۸ تن در سال را فراهم می‌شود.

ایرانمنش و همکاران [۲۵] عملکرد سیستم خشک‌کن کابینتی خورشیدی مجهز به کلکتور خورشیدی لوله خلاء (ETSC) و سیستم ذخیره حرارتی با استفاده از PCM را بررسی نمودند. آنها به تجزیه و تحلیل حرارتی کلکتور خورشیدی، بازده خشک کردن، مدل سازی CFD سیستم و ارزیابی کیفیت برش‌های سیب خشک پرداختند. این آزمایشات در سه نرخ جریان هوا (۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۰۹ کیلوگرم در ثانیه) برای سیستم خشک کردن با و بدون استفاده از PCM برای خشک کردن برش‌های سیب با ضخامت ۵ میلی‌متر انجام شد. نتیجه تجزیه و تحلیل حرارتی نشان داد که استفاده از PCM باعث افزایش انرژی گرمایی ورودی به میزان ۱/۷۲٪ و ۵/۱۲٪ برای میزان جریان هوا به ترتیب ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ کیلوگرم در ثانیه می‌شود، اما افزایش بیش از حد در سرعت جریان هوا (بالتر از ۰/۰۵ کیلوگرم در ثانیه) کاهش می‌یابد. حداکثر بازده کلی خشک کردن مربوط به سیستم دارای PCM با نرخ جریان هوا به میزان ۰/۰۲۵ کیلوگرم در ثانیه بود و ۳۹/۹٪ محاسبه شد. برای خشک کردن برش‌های سیب سه سرعت جریان

هوا ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۰۹ کیلوگرم بر ثانیه انتخاب شد. نتایج نشان داد که استفاده از PCM در داخل مخزن ذخیره سازی باعث کاهش زمان خشک شدن در حدود ۹/۳۷، ۹/۶۷ و ۱۰/۰۲ برای سرعت جریان هوا به ترتیب ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۰۹ کیلوگرم بر ثانیه، نسبت به سیستم های بدون PCM می شود. حداکثر بهره وری کلی خشک کردن ۳۹/۹٪ مربوط به سیستم دارای PCM با سرعت جریان هوا ۰/۰۲۵ کیلوگرم بر ثانیه بود کیفیت (رنگ، چروکیدگی و مزه) سیب خشک شده توسط خشک کن با PCM، کیفیت بالاتری نسبت به نمونه های دیگر خشک شده توسط سیستم های دیگر دارد. حداکثر دمای هوا در کابینت خشک کن ۶۹ درجه سانتیگراد و در نرخ جریان ۰/۰۲۵ کیلوگرم بر ثانیه، بدون PCM، با شدت تابش خورشید 854 W/m^2 و دمای هوای محیط ۳۵/۷ درجه سانتیگراد ثبت شد. زمان خشک شدن مورد نیاز برای برش های سیب که توسط سیستم با PCM خشک شده بود از ۸۱۰ تا ۸۷۰ دقیقه متغیر بود تا به رطوبت مطلوب برسد. با افزایش سرعت جریان هوا از ۰/۰۲۵ کیلوگرم بر ثانیه به ۰/۰۹ کیلوگرم بر ثانیه این زمان کاهش یافت زمان و خشک شدن برای حالت بدون PCM از ۹۰۰ تا ۹۶۰ دقیقه متفاوت بود.

در سال ۲۰۲۰ علی محمدی و همکاران [۲۶] تأثیر نوع سیال بر عملکرد حرارتی کلکتور خورشیدی سهموی (PTSC) را مطالعه نمودند. فرآیند شبیه سازی برای پیش بینی تغییرات حرارتی در لوله جاذب و مخزن ذخیره PCM توسط CFD انجام شد. این آزمایشات با ۰/۰۲۵ کیلوگرم بر ثانیه به عنوان سرعت جریان هوا انجام شد. چهار نوع مایعات از جمله مایع نانو (Al_2O_3 ، ۴٪)، روغن موتور (۱۰W۴۰)، گلیسرین و آب برای تجزیه و تحلیل عملکرد در نظر گرفته شد. علاوه بر این، فرآیند خشک کردن در این خشک کن خورشیدی در هنگام خشک شدن برش های سیب با ضخامت ۵ میلی متر در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که انرژی کلی گرمایی ورودی به خشک کن به ترتیب در مورد مایعات نانو، روغن، گلیسرین و آب به ترتیب حدود ۱۷/۳۶، ۱۸/۴۶، ۱۷/۷۶ و ۱۶/۸۰ مگا ژول بود. این همچنین حاکی از این است که استفاده از نانوسیال، روغن و گلیسرین باعث بهبود کارایی کلی خشک کن در حدود ۹/۷٪، ۲۰/۲٪ و ۱۲/۴٪ نسبت به آب. نتایج نشان داد که درجه حرارت بالاتر مایعات در مخزن ذخیره سازی با استفاده از نانو مایعات، روغن موتور، گلیسرین و آب به ترتیب ۸۳/۸، ۸۸/۲، ۸۵/۶ و ۷۹/۲ درجه سانتیگراد بود. بازده کلکتور با مایعات کاری مختلف به ترتیب در مورد ۶۹.۹٪، ۷۳.۴٪، ۷۱.۹٪ و ۶۳.۸٪ برای نانوسیال، روغن، گلیسرین و آب به دست آمد. سینتیک خشک شدن برش های سیب برای تمام مایعات در حال کار نشان داد که زمان مصرف

شده برای فرآیند خشک کردن با مایعات مختلف کار متفاوت است. علاوه بر این، سرعت خشک شدن با افزایش تابش خورشید افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد. شبیه سازی CFD از کلکتور و مقایسه آن با داده‌های پیش بینی شده و داده‌های آزمون حاکی از این است که توافق خوبی بین این دو وجود دارد (R^2 بالاتر از ۰/۹۵). در نظر گرفتن کیفیت (رنگ، انقباض و چروکیدگی) محصول خشک حاکی از آن است که استفاده از نانوسیال مختلف با PCM در طی فرآیند خشک کردن، کیفیت نمونه‌ها را در مقایسه با حالت خشک کردن آفتاب بهبود می‌بخشد. سیب‌هایی که با سیال عامل روغن خشک شده‌اند کیفیت بالاتری دارند این ممکن است به دلیل زمان کوتاه‌تر خشک شدن باشد. نتایج نشان داد که نمونه‌های خشک شده توسط آب (به عنوان سیال عامل) به دلیل ظرفیت حرارتی بالاتر، دمای مایع در مخزن و دمای خشک شدن در داخل کابین پایین‌تر است.



شکل ۴-۲ مدت زمان خشک شدن برای سیال عامل متفاوت [۲۶]

در مطالعه‌ای دیگر طراحی و توسعه خشک‌کن خورشیدی مبتنی بر کلکتور لوله خلاء با هیت پایپ برای خشک کردن حبه سیر مورد بررسی قرار گرفت [۲۷]. برای ارزیابی عملکرد تجربی، حبه‌های سیر از رطوبت ۶۹٪ تا ۸٪ رطوبت (wb) خشک شدند. عملکرد حرارتی خشک‌کن خورشیدی لوله خلاء (ETSD) در شرایط مختلف بدون بار و با بار کامل در سرعت‌های مختلف جریان هوا (۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه) مورد آزمایش قرار گرفت. بالاترین درجه

حرارت ۸۶/۷ درجه سانتیگراد در شرایط بدون بار و با سرعت 2 m/s در محفظه خشک کن با حداکثر تابش خورشید ۱۳۶۰ وات بر متر مربع بدست آمد در حالی که حداکثر ساعت اوج تابش خورشید ۶ ساعت بود. حداکثر نرخ خشک شدن، کارایی کلکتور خورشیدی و بازده خشک کن خورشیدی به ترتیب با سرعت 2 m/s متر بر ثانیه و ۴ متر بر ثانیه به ترتیب برابر با، ۴۲/۵۶٪ و ۵۶٪ بود. بیشترین متوسط کارایی انرژی با ۵۶/۵۹٪ در سرعت 2 m/s و متوسط کمترین میزان انرژی با $4/74 \text{ W}$ با 1 m/s مشاهده شد. ETSD با سرعت 2 m/s بهترین کارایی را داشت و قادر بود که حبه سیر را در مدت ۸ ساعت خشک کند.

محمدحسین آق خانی و همکارانش [۲۸] عملکرد یک خشک کن خورشیدی با جریان هوای اجباری، مجهز به سامانه‌ی گردش هوای بسته که مناسب خشک کردن محصولات در حجم کم از قبیل گیاهان دارویی و زعفران است را بررسی کردند. خشک کن مورد ارزیابی شامل کلکتور خورشیدی، محفظه‌ی محصول، محفظه‌ی مواد جاذب رطوبت سیلیکاژل، دمنده، کانال‌های عبور هوا و سامانه‌ی اندازه گیری و کنترل بود. به منظور بررسی عملکرد دستگاه از گیاه نعنای استفاده شد و نرخ خشک شدن و میزان انرژی مصرفی در سه سطح فاکتور دما (۴۵، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس) و در دو حالت سامانه‌ی گردش هوای باز و بسته اندازه گیری و مقایسه شد. نتایج تحقیق نشان داد که سامانه گردش هوای بسته تأثیر بسیار معنی داری بر انرژی مصرفی و بازده خشک کن دارد. افزایش دمای هوای خشک کننده در سامانه‌ی هوای باز، باعث کاهش زمان و بازده خشک شدن و افزایش انرژی مصرفی شد. در حالی که در سامانه‌ی گردش هوای بسته، با افزایش دما، انرژی مصرفی کاهش، بازده خشک کن و سرعت خشک شدن افزایش یافت. بیشترین بازده خشک کن مربوط به تیمار دمای ۵۰ درجه سلسیوس و سامانه‌ی گردش هوای بسته بود. در نهایت متوسط بازدهی کلکتور خورشیدی و بیشترین بازده خشک کن به ترتیب ۳۴٪ و ۴۱٪ به دست آمد. افزایش دمای هوای خشک کننده و استفاده از سامانه‌ی گردش هوای بسته به ترتیب سبب کاهش ۵۳ و ۳۳ درصدی در زمان خشک شدن محصول شد. با افزایش دمای هوای خشک کننده در سامانه‌ی گردش هوای بسته، مصرف انرژی ۱۴٪ کاهش و در نتیجه بازده خشک کن افزایش یافت. در سامانه‌ی هوای باز، افزایش دمای هوای خشک کننده سبب افزایش ۲۴ درصدی در مصرف انرژی و کاهش بازده خشک کن گردید.

۲-۴- انواع خشک‌کن‌های خورشیدی با سیستم لوله خلاء

یک دستگاه خشک‌کن خورشیدی لوله خلاء با هیت پایپ و سیستم بازیابی توسط دقیق و شفائیان [۲۹] مورد ارزیابی قرار گرفت که در آن از آب به عنوان سیال عامل و بازیافت‌کننده در سیستم خورشیدی و خشک‌کن استفاده شده است. از هوا نیز به عنوان سیال عامل میانی در قسمت خشک‌کن استفاده شده است. از سیستم بازیافت گرما برای افزایش کارایی کلی سیستم و استفاده حداکثری از آن استفاده شد. آب گرم موجود در مخزن ذخیره سازی که توسط حلقه خورشیدی گرم می‌شود، بسته به نیاز سیستم به خشک‌کن ارسال می‌شود و گرمای آن در مبدل حرارتی به هوای دمیده شده منتقل می‌شود. این سیستم در شرایط آب و هوایی شهر سنندج مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج بدست آمده حاکی از اثربخشی سیستم بازیابی گرما است. در دبی حجمی $0.328 \text{ m}^3/\text{s}$ متر مکعب در ثانیه، حداکثر دمای هوای خروجی خشک‌کن تقریباً $44/3^\circ\text{C}$ سانتیگراد بود. در اوایل صبح، به دلیل دمای پایین مخزن یک سیستم کمکی الکتریکی به بالا رفتن دما کمک می‌کند که با افزایش تابش خورشیدی به مرور نیاز به این واحد کمکی کم می‌شود و از ساعت $12:30$ به بعد نیاز به آن نیست. عملکرد مبدل حرارتی بسیار وابسته به دمای محیط است و در دمای پایین محیط نوسانات بیشتری دارد. این سیستم نشان داد که استفاده از بازیافت گرمایی در ابتدا و انتهای روز که تابش کم است در بالا بردن دمای هوای ورودی به خشک‌کن تاثیر بسزایی دارد و باعث کاهش زمان خشک شدن محصول می‌شود. همچنین این مدل خشک‌کن نسبت به مدل‌های مشابه بدون سیستم بازیافت از هزینه ساخت بالاتری برخوردار است.

ساندری و همکاران [۳۰] یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به کلکتور لوله‌ای خلاء با و بدون مواد ذخیره سازی انرژی حرارتی (سنگریزه) طراحی و اجرا نمودند. عملکرد خشک‌کن خورشیدی برای خشک کردن ادویه‌جات در شرایط آب و هوایی هند (تنجاور، تامیلنادر) بررسی شد. خشک‌کن طراحی شده با خشک کردن تحت شرایط نور خورشید مقایسه شد. برای خشک کردن ادویه جات در خشک‌کن طراحی شده با میانگین رطوبت اولیه $87/36\%$ و رطوبت نهایی $3/4\%$ با مواد ذخیره سازی انرژی حرارتی برای مدت زمان ۱۰ ساعت و در حالت بدون مواد ذخیره سازی انرژی حرارتی مدت ۱۲ ساعت و تحت نور خورشید به مدت ۳۲ ساعت به طول انجامید. خشک‌کن طراحی شده موفق به کاهش

زمان خشک کردن به میزان ۶۶٪ گردید. بازده خشک کن با مواد ذخیره سازی انرژی حرارتی ۳۴/۲۳٪ و بدون مواد ذخیره ساز انرژی حرارتی ۲۲/۰۳٪ و تحت نور خورشید ۹/۳۲٪ گزارش گردید. نسبت استخراج رطوبت ویژه برای خشک کن با مواد ذخیره سازی انرژی حرارتی $0/345 \text{ kg/kwh}$ بوده است. کیفیت ادویه جات خشک شده در خشک کن خورشیدی طراحی شده از نظر رنگ، بو و طعم بالا بود. عملکرد، کیفیت و سرعت بالای خشک کردن نشان داد که خشک کن خورشیدی مجهز به کلکتور لوله‌ای خلاء با استفاده از مواد ذخیره سازی انرژی حرارتی نسبت به روش‌های دیگر خشک کردن برتری قابل ملاحظه‌ای دارد.

در پژوهش دیگر مقایسه تجربی خشک کردن طبیعی و خشک کن خورشیدی بر اساس کلکتور لوله خلاء صورت گرفت [۳۱]. در این سیستم از یک کلکتور لوله خلاء، مبدل حرارتی پوسته و لوله و محفظه خشک کردن استفاده می‌شود. مشخص شد که حداکثر اختلاف دما بین هوای گرم و هوای محیط ۳۵/۴ درجه سانتی‌گراد است و حداکثر بازده این سیستم ۵۵٪ است. میانگین میزان خشک شدن گیاهان *Phyllanthus Emblica* (Anvla)، آلوئه ورا و *Aegle Marmelos* (Bel) به ترتیب ۰/۴۶ گرم در دقیقه، ۰/۴۴ گرم در دقیقه و ۰/۳۹ گرم در دقیقه اندازه‌گیری شده است که بالاتر از خشک شدن در معرض آفتاب است. برگ‌های *Azadirachta Indica* (Neem)، *Aegle Marmelos* (Bel) و *Psidium Guajava* (Guava) نیز با سرعت سریعتر ۰/۱۸، ۰/۱۷ و ۰/۱۴ گرم در دقیقه خشک شدند. بهترین دما برای خشک کردن آلوئه ورا ۴۵-۵۵ درجه و برای گیاه بل ۵۵ درجه ثبت شد.

۲-۵- معرفی مطالعه حاضر

با بررسی مطالعات پیشین مشخص گردید در بین انواع خشک کن‌های خورشیدی، خشک کن‌هایی که کلکتور آن‌ها از نوع لوله خلاء می‌باشد در مقایسه با سایر خشک کن‌های دیگر از راندمان بالایی برخوردار هستند و عملکرد خوبی را در انواع شرایط آب و هوایی نشان داده‌اند.

در این پژوهش ضمن بهره‌گیری از تجارب سایر پژوهشگران این حوزه با تغییر کاربری یک دستگاه هوا گرمکن خورشیدی لوله خلاء و انجام طراحی‌های لازم از قبیل اضافه کردن فن، طبقات و یک دستگاه خشک کن خورشیدی

لوله خلاء مجهز به سیستم گردش هوای بسته طراحی و آزمایش شد. دستگاه حاضر با وجود اینکه فاقد برخی دستگاه‌های کمکی از قبیل سوخت گاز یا واحد الکتریکی کمکی و ... می‌باشد در طول آزمایشات نتایج خوبی را نشان داد و همین امر موجب کاهش هزینه‌های ساخت و هزینه‌های جاری دستگاه از قبیل هزینه سوخت و تعمیرات می‌شود.

۳- فصل سوم:

طراحی و ساخت

۳-۱- مقدمه

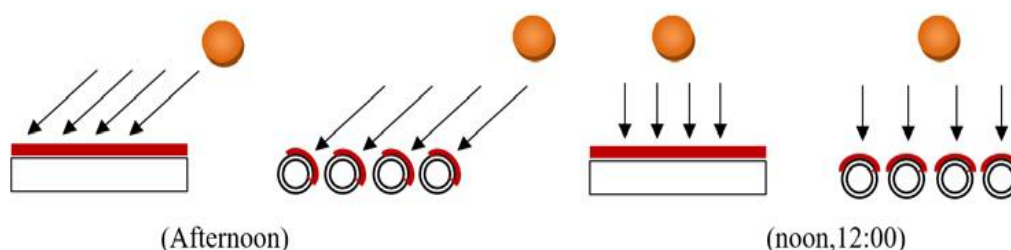
در فصل قبل در مورد انواع کلکتورهای خورشیدی و مزایا و معایب هر کدام توضیح داده شد. از بین کلکتور موجود کلکتور خورشیدی صفحه تخت با توجه با سادگی طراحی بیشترین کلکتور مورد استفاده در اکثر سیستم‌های خورشیدی می‌باشد. این کلکتور علی‌رغم مزایای زیاد دارای معایبی می‌باشد که از جمله آن می‌توان به این موارد اشاره کرد:

- بالا بودن اتلاف حرارتی از سطح کلکتور مخصوصا زمانی که فشار هوا بین پوشش روی کلکتور و صفحه جاذب برابر با فشار هوای محیط باشد.
- در صورت آسیب دیدن یک قسمت از پوشش روی کلکتور یا صفحه جاذب تمام آن باید تعویض شود که این باعث بالا رفتن هزینه‌های این نوع کلکتور می‌شود.
- در این نوع کلکتور زمانی که تابش بر صفحه جاذب عمود است بیشترین میزان جذب را دارد و با تغییر زاویه تابش به مرور از میزان جذب انرژی خورشید کم می‌شود.

با توجه به موارد ذکر شده در خصوص معایب کلکتورهای صفحه تخت و در جهت رفع نقص و استفاده حداکثری از میزان تابش خورشید در طول روز کلکتورهای لوله خلاء طراحی و توسعه یافتند. این کلکتور از دو لوله شیشه‌ای هم محور تشکیل شده است که سطح لوله خارجی کاملا شفاف و سطح لوله داخلی از مواد مخصوص از جنس آلایژ مس که بیشترین میزان جذب تابش را داشته باشد پوشیده شده است و بین دو لوله نیز خلاء شده است. از مزایای این نوع کلکتورهای خورشیدی به موارد زیر می‌توان اشاره کرد :

- اتلاف حرارتی از سطح این نوع کلکتور به دلیل خلاء موجود بین دو لوله داخلی و خارجی در حداقل ممکن است.
- در صورت آسیب دیدن یک لوله فقط همان لوله را باید تعویض کرد که این باعث پایین آمدن هزینه‌های این کلکتورها می‌شود.

- با توجه شکل دایره‌ای این نوع کلکتور آفتاب در بیشتر ساعات روز بر سطح کلکتور عمود بوده و این باعث جذب حداکثری تابش خورشید می‌شود (شکل ۳-۱).



شکل ۳-۱ مقایسه کلکتور لوله خلاء و کلکتور صفحه تخت در جذب تابش در ساعات مختلف [۲۷]

۳-۲- طراحی سیستم آزمایشگاهی خشک‌کن خورشیدی لوله خلاء

سیستم خشک‌کن لوله خلاء طراحی شده در این آزمایش در واقع یک هواگرمکن خورشیدی لوله خلاء ساخت شرکت سولارکار است که با تغییر کاربری و اضافه کردن طبقات به فضای داخلی مخزن از آن به عنوان یک خشک‌کن خورشیدی استفاده گردید (شکل ۳-۲).



شکل ۳-۲ خشک‌کن خورشیدی لوله خلاء

اجزای سیستم آزمایشگاهی خشک کن خورشیدی لوله خلاء

- **پایه نگه دارنده** که از جنس آهن با ضخامت ۲ میلی متر ساخته شده است که مخزن خشک کن و انتهای لوله های خلاء بر روی این پایه اصلی قرار می گیرد. زاویه پایه با توجه به موقعیت جغرافیایی شاهرود در زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق و زاویه صفر درجه نسبت به جنوب تنظیم شده است.
- **مخزن خشک کن** که از مخزن استوانه ای با قطر داخلی ۳۶ سانتی متر و قطر خارجی ۵۰ سانتی متر و طول ۲ متر تشکیل شده است. لذا حجم داخلی این مخزن حدود ۲۰۰ لیتر است. سطح داخلی مخزن از ورق گالوانیزه و ورق خارجی از ورق آهن رنگی ساخته شده است و بین لایه داخلی و خارجی با استفاده از فوم پلی اوتان تزریقی پر شده است. در قسمت زیرین این مخزن سوراخ هایی جهت قرار گیری لوله های خلاء قرار دارد.
- **سینی ها:** شامل دو سینی هر یک به طول یک متر که از یک قاب چوبی تشکیل شده است و سطح آن با توری فلزی پوشانده شده است. محصولات بر روی این توری قرار گرفته و داخل مخزن گذاشته می شود.
- **دمنده** که یک فن سانتریفیوژ با توان اسمی ۱۰۰ وات است که در یک انتهای مخزن نصب شده است و هوا را در مخزن خشک کن به گردش در می آورد. این دمنده سرعت تا ۵ متر بر ثانیه را فراهم می کند و تنظیم سرعت هوا نیز بوسیله یک دریچه کنترل کننده روی فن انجام می شود. لازم به ذکر است سرعت جریان هوا عامل مهمی در افزایش سرعت انتقال حرارت و جرم از محصول به محیط و در نتیجه کاهش مدت زمان خشک شدن محصول می باشد.
- **لوله های گردش هوا:** از لوله های گالوانیزه جهت چرخش هوای داخل مخزن استفاده شده است. یک سر این لوله ها به دمنده متصل شده و سر دیگر آن به ابتدای مخزن خشک کن متصل گردیده است.
- **دریچه کنترل رطوبت:** یک دریچه روی این لوله جهت تنظیم دما و رطوبت و یک سوراخ به قطر ۱۰ میلی متر جهت اندازه گیری سرعت هوا تعبیه شده است. کل مسیر لوله توسط عایق پشم شیشه

پوشانده شده است.

- **لوله‌های خلاء** که جزء اصلی این سیستم و وظیفه جذب انرژی خورشیدی و تامین حرارت برای خشک‌کن را به عهده دارد. این سیستم ظرفیت ۲۴ لوله خلاء را دارا می‌باشد. لذا با توجه به نیاز طرح



شکل ۳-۳ لایه‌های مختلف پوشش سطح لوله داخلی

از تعداد لوله دلخواه برای رسیدن به شرایط دمایی مطلوب داخل مخزن، استفاده شده است.

۳-۳- تجهیزات اندازه گیری

ترازو :

جهت اندازه گیری محصولات از یک ترازوی دیجیتالی با دقت اندازه گیری ۰/۱ گرم استفاده شده است.

سرعت سنج باد :

جهت اندازه گیری سرعت و در نتیجه دبی هوای در گردش درون مخزن، از یک دستگاه سرعت سنج فیلم داغ^۱

شرکت smart sensor مدل ar866 استفاده شده است. اندازه‌گیری سرعت در لوله چرخش هوا خارج از مخزن

صورت می‌گیرد. یک سوراخ به قطر ۱۰ میلی‌متر جهت ورود سنسور دستگاه سرعت سنج تعبیه شده است.

دماسنج :

^۱ Hot Flim

برای اندازه گیری دما از یک دماسنج دیجیتال مدل TEMPERATURE/ HTC2 با دقت اندازه گیری ۱ درجه سانتی گراد که مجهز به یک سنسور سیم دار برای اندازه گیری دمای داخل مخزن می باشد. این دما سنج همزمان قادر به محاسبه دمای داخل مخزن، محیط و رطوبت محیط می باشد (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴ دماسنج مورد استفاده جهت ثبت دمای داخل مخزن و دما و رطوبت محیط

رطوبت سنج:

جهت اندازه گیری رطوبت داخل مخزن از یک دماسنج و رطوبت سنج سنسور اکسترنال مدل LX8011 با دقت اندازه گیری ۰/۱ استفاده شده است (شکل ۳-۵).



شکل ۳-۵ رطوبت سنج و دما سنج اکسترنال مدل LX8011

تابش سنج خورشیدی

برای اندازه گیری تابش روزانه خورشید از یک دستگاه پیرانومتر مدل ۱۶۱۰۳ شرکت آلمانی Lambrecht استفاده شده است. با توجه به بروز مشکل برای دستگاه و نداشتن میزان تابش روزانه برای برخی روزهای آزمایش، از نرم افزار متلب و با استفاده از کد نویسی محاسبه تابش به صورت موازی و با توجه به موقعیت جغرافیایی شاهرود

نیز انجام گردید.



شکل ۶-۳ دستگاه تابش سنج خورشیدی (پیرانومتر)

۴-۳- روش انجام آزمایش

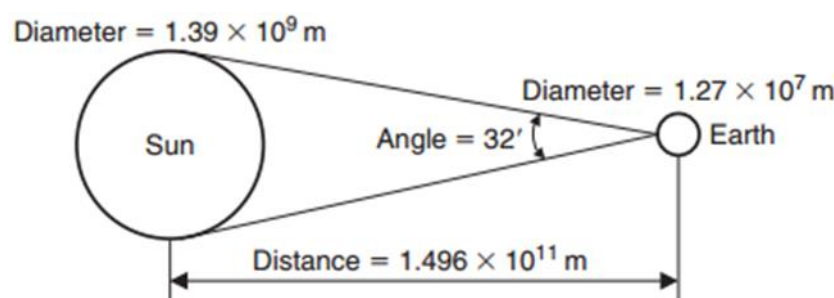
آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش بر روی پنج میوه سیب، هلو، شلیل، فلفل و زردآلو انجام شد. اکثر آزمون‌های انجام شده بر روی این میوه‌ها در مقادیر وزنی کم و به منظور انجام مقایسه با یکدیگر و سایر آزمایش‌های انجام شده توسط سایر محققین این حوزه انجام گرفته است. آزمایش‌های دیگری نیز با حداکثر ظرفیت سینی‌ها و داخل مخزن، جهت برآورد حد اکثر گنجایش و کارایی دستگاه در حالت تمام بار انجام شد. به صورت موازی آزمایش‌هایی نیز در محیط انجام شد بر روی یک طبق چوبی و روی یک پایه جهت در امان ماندن از حشرات انجام شد. آزمایش‌های مخزن در یک طبقه انجام شد. برای هریک از میوه‌ها آزمایش‌های مختلفی شامل آزمایش محیط (خشک کردن طبیعی در آفتاب)، آزمایش در مخزن در حالت خاموش بودن فن، آزمایش در مخزن با سرعت ۲ متر بر ثانیه و آزمایش در مخزن با سرعت ۴ متر بر ثانیه انجام شد و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید. دستگاه اولیه هواگرمکن مورد استفاده، فاقد تجهیزات جهت چرخش هوای داخل مخزن بود که با توجه به ضرورت این موضوع جهت کاهش ساعات خشک شدن محصول، طراحی لازم جهت نصب یک دمنده بر روی این دستگاه انجام و اجرا گردید. جهت انجام آزمایش ابتدا آزمایش‌هایی با مخزن خالی و بدون میوه و با تعداد لوله‌های مختلف و همچنین سرعت‌های مختلف فن جهت برآورد کردن حداکثر دمای قابل حصول توسط این سیستم انجام شد. تنظیم دما

توسط کم یا زیاد کردن تعداد لوله‌ها انجام گرفت. نتایج به طور خلاصه در فصل بعد ارائه می‌شود.

۳-۵- معادله‌های حاکم و مدل‌سازی شدت تابش خورشید

بدون شک تخمین صحیح شدت تابش خورشید اولین گام در طراحی صحیح یک سیستم خورشیدی می‌باشد. مدل‌های مختلفی برای شدت تابش از سوی محققین ارائه گردیده است که در این پژوهش از مدل ارائه شده توسط کالوگرو [۳۲] استفاده شده است.

ثابت خورشیدی^۱ (G_{sc}) یا میزان انرژی خورشیدی دریافتی در واحد زمان روی صفحه‌ای عمود بر خورشید به اندازه‌ی یک متر مربع در فاصله‌ی میانگین زمین و خورشید خارج از جو زمین تعریف می‌گردد که این شرایط در شکل (۳-۷) مشاهده می‌شود. بر اساس مقادیر ارائه شده در مراجع عدد (1367 W/m^2) برای آن در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳-۷ رابطه بین زمین و خورشید

با توجه به حرکت زمین در مداری بیضی در طول سال شار تشعشعی دریافتی خارج از جو تغییر می‌کند لذا وابستگی ثابت خورشیدی با تشعشع دریافتی در n -امین روز سال نسبت به روز اول سال میلادی از معادله (۳-۱) بدست می‌آید:

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \quad 3-1$$

¹ Solar Constant

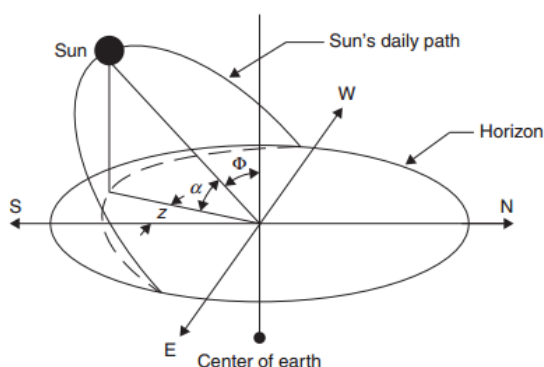
ابتدا برای محاسبه میزان شدت تابش روی یک صفحه افقی بدون در نظر گرفتن جو زمین از معادله (۳-۲)

استفاده می‌شود:

$$G_o = G_{on} \cos \phi \quad 3-2$$

که در آن ϕ زاویه سمت الراس^۱ می‌باشد که در شکل (۳-۹) مشاهده می‌گردد.

با استفاده از روابط مثلثاتی و روابط تجربی زمانی، ثابت می‌شود که زاویه برخورد پرتو مستقیم با جهت عمود بر صفحه افقی (ϕ) از معادله (۳-۳) بدست می‌آید.



شکل ۳-۸ مسیر روزانه خورشید از طلوع تا غروب

$$\cos \phi = \cos (L) \cos (\delta) \cos (h) + \sin (\varphi) \sin (\delta) \quad 3-3$$

در معادله بالا L عرض جغرافیایی^۲ ($-90 \leq L \leq +90$) که برای شمال خط استوا مثبت در نظر گرفته

می‌شود و δ زاویه انحراف محور زمین^۳ نسبت به موقعیت خاص اولیه ($-23.45 \leq \delta \leq +23.45$) است که از

¹ Zenith Angle

² Latitude

³ Declination

معادله (۳-۴) محاسبه می‌شود و h زاویه ساعت^۱ یا زاویه جابجایی خورشید نسبت به طول جغرافیایی است. این زاویه قبل از ظهر منفی و بعد از ظهر مثبت بوده و مقدار آن به ازای هر ساعت ۱۵ درجه می‌باشد که منظور از ظهر در اینجا، ظهر خورشیدی است که از معادله (۳-۵) بدست می‌آید.

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad 3-4$$

$$h = 15(AST - 12) \quad 3-5$$

در معادله ۳-۵، AST زمان خورشیدی در منطقه مورد نظر است. در واقع در رابطه فوق اختلاف ساعت خورشیدی از ظهر خورشیدی محاسبه شده است و از معادله (۳-۶) قابل محاسبه است. در شکل (۳-۱۰) زاویه خط مرکزی بین خورشید و زمین و تصویر آن بر روی صفحه استوایی مشاهده می‌شود.

$$AST = LST + ET \pm 4(SL - LL) - DS \quad 3-6$$

که در آن LST زمان استاندارد محلی^۲، ET معادله زمان^۳، SL طول جغرافیایی استاندارد^۴، LL طول جغرافیایی محلی^۵ و DS صرفه جویی روشنایی روز^۶ با مقدار صفر یا ۶۰ دقیقه می‌باشد.

¹ Hour Angle

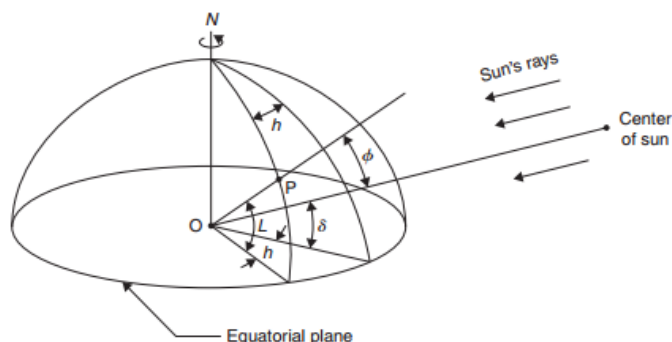
² Local Standard Time

³ Equation Of Time

⁴ Standard Longitude

⁵ Local Longitude

⁶ Daylight Saving

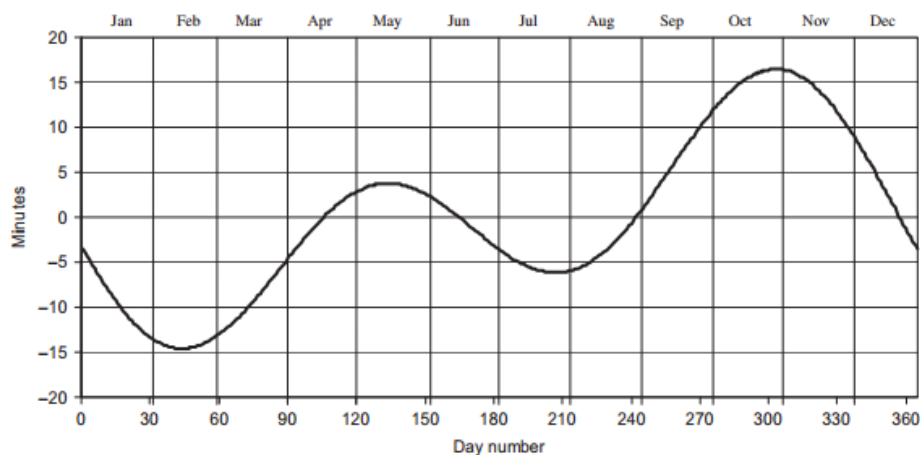


شکل ۳-۹ تعریف عرض جغرافیایی، زاویه ساعت و زاویه انحراف محور زمین

از معادله (۷-۳) مقدار معادله زمان (ET) قابل محاسبه است که علاوه بر آن می‌توان از شکل (۳-۴) بصورت مستقیم مقدار آن را بدست آورد.

$$ET = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad ۳-۷$$

$$B = (n - 81) \frac{360}{364} \quad ۳-۸$$



شکل ۳-۱۰ معادله زمان

تابش خورشید بعد از ورود به جو زمین و برخورد به لایه ازن، ملکول‌های هوا، گرد و غبار و بخار آب و

همچنین ابرها، تضعیف می‌شود. لذا این اثر با استفاده از روابط تجربی در معادلات لحاظ گردیده است که در

ادامه مطرح می‌شود. از طرفی مدل‌های فراوانی برای محاسبه تابش کل روی سطح شیبدار ارایه شده است که

اولین آن‌ها مدل ایزوتروپیک^۱ است که توسط هاتل و همکارانش توسعه داده شد و بعد از آن‌ها توسط ليو و جوردن بازنویسی گردید. از معادله (۳-۹) تا (۳-۱۴) کل تابش روی سطح شیبدار بر اساس این مدل محاسبه می‌شود.

$$G_{CT} = G_{cb}R_b + G_{cd}\left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + (G_{cb} + G_{cd})\rho_g\left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad 3-9$$

$$G_{cb} = G_o\tau_b \quad 3-10$$

$$G_{cd} = G_o\tau_d \quad 3-11$$

$$\tau_d = 0.271 - 0.294\tau_b \quad 3-12$$

$$\tau_b = a_0 + a_1e^{-k/\cos\phi} \quad 3-13$$

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\phi} \quad 3-14$$

که ضریب هندسی^۲ (R_b) نسبت تشعشع مستقیم روی سطح شیب دار به تشعشع مستقیم رسیده روی سطح افقی در هر زمان می‌باشد. β زاویه پِنل نسبت به سطح افق و ρ_g ضریب انعکاس^۳ تابش از زمین اطراف است که بطور میانگین محاسبه شده و برای زمین مسطح معمولی ۰/۲ بوده و در صورت برفی بودن حتی می‌تواند بیش از ۰/۶ باشد. ضریب تصحیح منطقه‌ی آب و هوایی از معادله‌های (۳-۱۵) تا (۳-۲۰) و شکل (۳-۱۰) قابل محاسبه است که در معادله‌ها A ارتفاع از سطح دریای آزاد برحسب کیلومتر می‌باشد.

$$a_1 = a_1^* \times r_1 \quad 3-15$$

$$a_0 = a_0^* \times r_0 \quad 3-16$$

$$k = k^* \times r_k \quad 3-17$$

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00821(6 - A)^2 \quad 3-18$$

$$a_1^* = 0.5055 + 0.00595(6.5 - A)^2 \quad 3-19$$

¹ Isotropic

² Beam Radiation Tilt Factor.

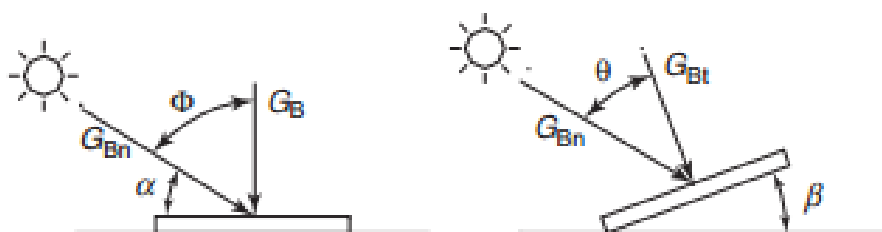
³ Ground Albedo

$$k^* = 0.2711 + 0.01858(2.5 - A)^2 \quad ۳-۲۰$$

جدول ۳-۱ ضریب تصحیح منطقه آب و هوایی

Climate Type	r_0	r_1	r_k
Tropical	0.95	0.98	1.02
Midlatitude summer	0.97	0.99	1.02
Subarctic summer	0.99	0.99	1.01
Midlatitude winter	1.03	1.01	1.00

در شکل (۳-۱۱) تابش مستقیم بروی دو سطح افقی و شیبدار قابل مشاهده است.



شکل ۳-۱۱ تابش مستقیم بروی سطح افقی و شیبدار

۳-۲- نحوه انجام محاسبات و ارزیابی خشک کن

آزمایش‌هایی که در این پژوهش انجام شد در فاصله زمانی ۷:۰۰ الی ۸:۰۰ صبح تا زمان غروب آفتاب صورت گرفت. البته در آزمایش‌هایی که چند روز طول کشیده است محصول درون دستگاه تا روز بعد باقی می‌مانده است. در طول مدت زمان آزمایش داده‌هایی نظیر سرعت جریان هوا، میزان تابش، دمای داخل مخزن و دمای محیط و همچنین رطوبت به صورت منظم هر یک ساعت یک بار ثبت شد. جهت اندازه گیری هر یک از داده‌های فوق از تجهیزاتی که پیشتر معرفی شد استفاده گردید. در این گونه دستگاه‌های خشک کن خورشیدی پارامترهایی چون بازده، محاسبه رطوبت، میزان تبخیر و بازده انرژی مورد محاسبه قرار می‌گیرند که در ادامه به بعضی روش‌های محاسبه هر یک اشاره می‌شود :

محاسبه رطوبت :

توجه به اینکه در مورد هر یک از میوه‌های مورد آزمون در این تحقیق تنوع گونه بسیار زیاد است لذا جهت

بالا بردن هر چه بیشتر دقت رطوبت هر یک از میوه‌ها به صورت جدا گانه محاسبه شد.

جهت این کار ابتدا مقدار مشخصی از هر میوه با ترازوی دیجیتالی با دقت بالا وزن شد و سپس میوه به صورت کامل خشک شد به طوری که رطوبت نهایی آن‌ها به صفر و سپس میوه خشک شده توزین گردید. در نهایت با استفاده از رابطه زیر رطوبت اولیه محاسبه می‌شود:

۳-۲۲

$$RHi = \frac{M_1 - M_2}{M_1}$$

که در آن :

RHi درصد رطوبت ابتدایی محصول، M_1 وزن ابتدایی محصول و M_2 وزن نهایی محصول کاملاً خشک است.

وزن نهایی محصول خشک شده بر اساس رطوبت مطلوب نهایی:

از آنجا که در طی فرآیند خشک شدن محصول کاهش وزن آن ناشی از تبخیر آب موجود در آن است لذا با استفاده از رابطه زیر می‌توان وزن نهایی محصول مورد نظر را به صورت تئوری محاسبه کرد:

وزن بافت میوه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Md = M_1 * (1 - RHi) \quad ۳-۲۳$$

وزن نهایی محصول خشک بر حسب رطوبت مطلوب نهایی آن نیز از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$M_{dry} = \frac{Md}{(1 - RHe)} \quad ۳-۲۴$$

که در آن M_{dry} وزن نهایی تئوری محصول، Md وزن بافت میوه و RHe رطوبت نهایی مطلوب برای محصول است.

محاسبه بازده خشک‌کن:

برای محاسبه بازده خشک‌کن از رابطه زیر استفاده شد :

$$\eta = \frac{ML}{(I_c/1000)At} \quad ۳-۲۵$$

که در آن M اختلاف جرم اولیه و نهایی نمونه، L گرمای نهان تبخیر آب، I_c شدت تابش بر حسب w/m^2 ، A مساحت سطح کلکتور و t زمان می‌باشد.

۴- فصل چہارم

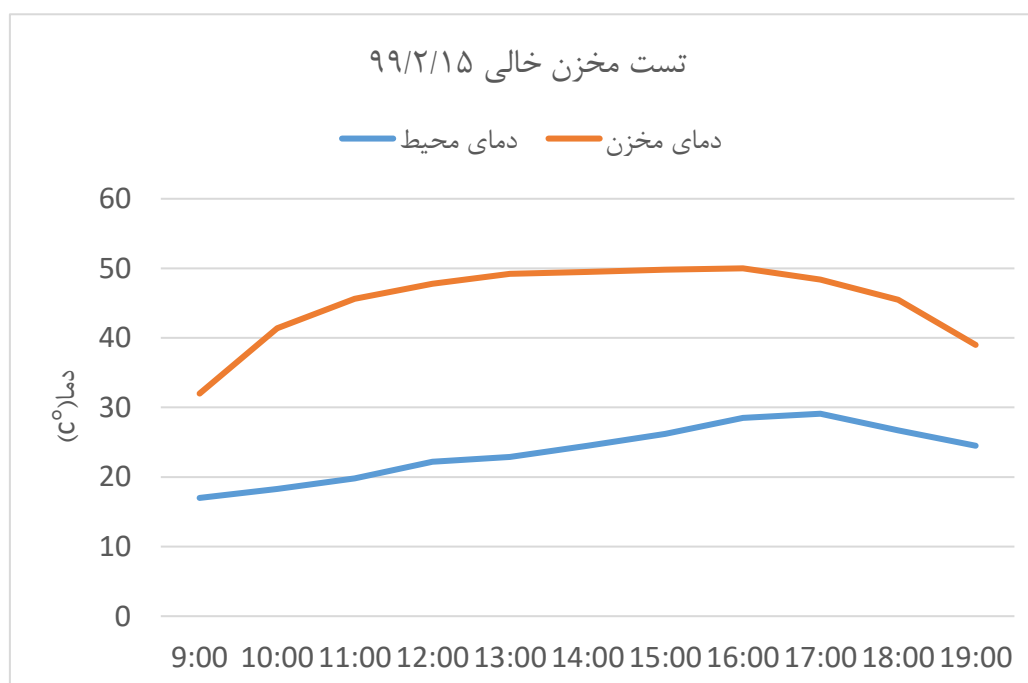
نتائج

۴-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا نتایج مربوط به حالت هواگرمکن دستگاه (بدون محصول) ارایه می‌گردد. در این آزمایش‌ها هدف بررسی بیشینه دمای قابل دستیابی در داخل مخزن و ارزیابی اثر تعداد لوله‌های خلا و گردش هوا بر روی این پارامتر بوده است. سپس نتایج بدست آمده از خشک کردن هر یک از محصولات مورد بررسی ارایه شده است.

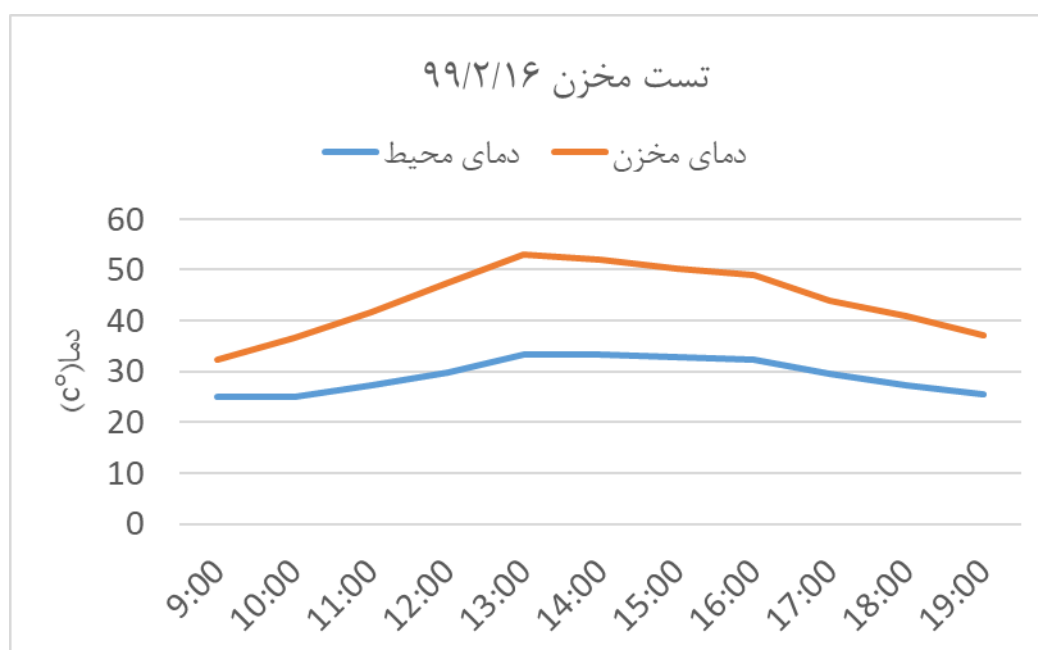
۴-۲- نتایج مربوط به آزمایش دستگاه در حالت هواگرمکن

در جداول این بخش به بررسی اثر تعداد لوله‌های خلا و حالت گردش هوا در تغییرات دمای داخل مخزن در طول روز پرداخته شده است. نمودار (۴-۱) تست مخزن خالی با تعداد ۵ لوله خلاء در حالت خاموش بودن فن می‌باشد. این آزمایش در اردیبهشت ماه انجام شده است و بیشینه دمای محیط در این تاریخ ۲۹/۱ درجه سانتیگراد و بیشینه دمای مخزن ۵۰ درجه سانتیگراد است. حداکثر دمای محیط در ساعت ۱۷ و حداکثر دمای مخزن در ساعت ۱۶ به ثبت رسیده است.



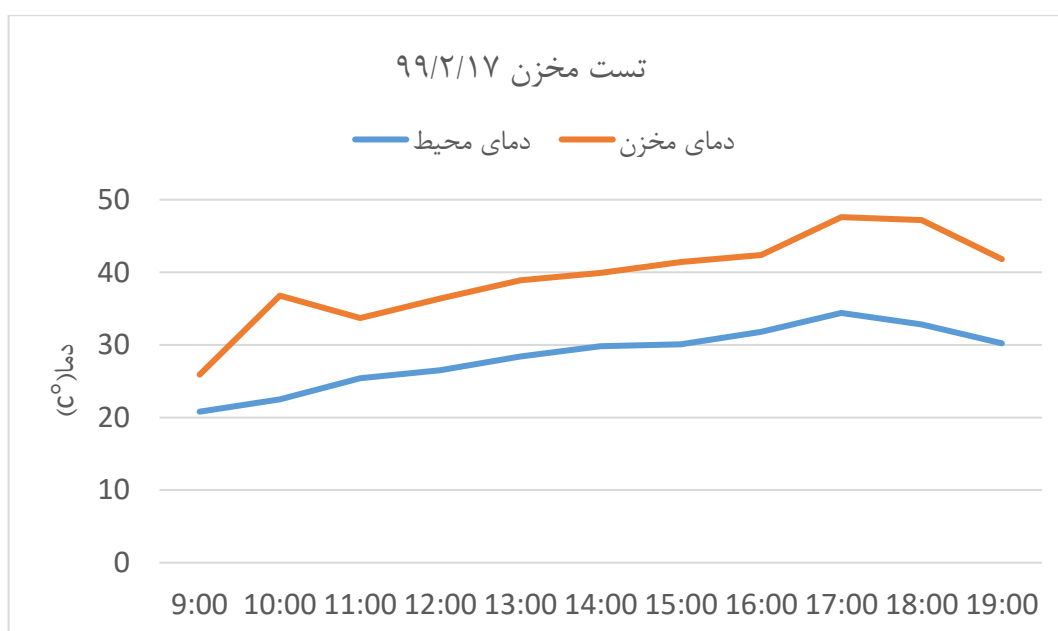
شکل ۴-۱ تست مخزن بدون فن با ۵ لوله خلاء

در نمودار (۲-۴) تست مخزن بدون محصول در تاریخ ۹۹/۲/۱۶ با تعداد ۵ لوله خلاء در حالی که فن با سرعت ۲ متر بر ثانیه کار می‌کند نشان داده شده است. این روز نسبت به روز قبل گرم‌تر بوده و حداکثر دمای محیط و مخزن در ساعت ۱۳ و با مقدار به ترتیب ۳۳/۴ و ۵۳ به ثبت رسید. روشن بودن فن باعث کاهش دمای داخل مخزن به اندازه ۴ الی ۵ درجه می‌شود. این تست نشان می‌دهد که بالاتر بودن دمای محیط تاثیر مستقیمی روی دمای مخزن دارد. دمای محیط در این روز نسبت به روز قبل ۴/۳ درجه گرم‌تر بود که با وجود روشن بودن فن و کاهش ۴ الی ۵ درجه‌ای دمای مخزن، به دلیل بالاتر بودن دمای محیط این کاهش دما جبران شده و افزایش ۳ درجه‌ای دمای مخزن نسبت به روز قبل مشاهده می‌شود.



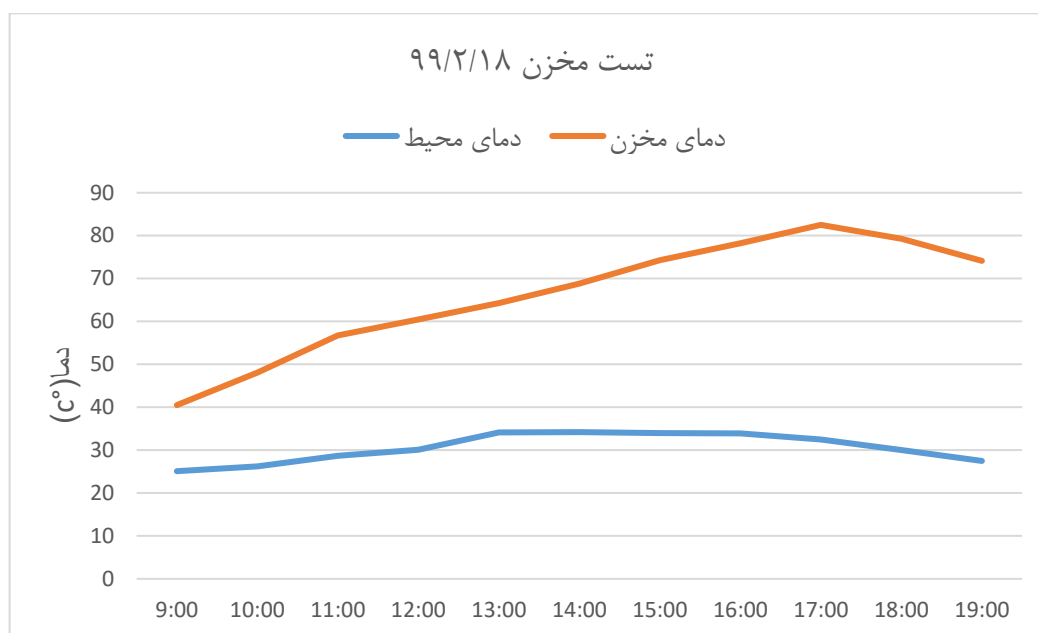
شکل ۲-۴ تست مخزن با ۵ لوله و سرعت ۲ متر بر ثانیه

در تاریخ ۹۹/۲/۱۷ تست مخزن با تعداد ۵ لوله و سرعت فن ۴ متر بر ثانیه انجام شد. حداکثر دمای محیط ۳۳/۴ به ثبت رسید که نسبت به روز قبل ۱ درجه بالاتر بود و حداکثر دمای مخزن مقدار ۴۷/۶ را نشان می‌دهد که نسبت به روز قبل کاهش ۵/۴ درجه‌ای را نشان می‌دهد که این کاهش هم به خاطر سرعت بالاتر فن و ابری بودن مختصر هوا در عصر این روز می‌باشد.



شکل ۳-۴ تست مخزن ۹۹/۲/۱۷ با سرعت ۴ متر بر ثانیه و تعداد ۵ لوله خلاء

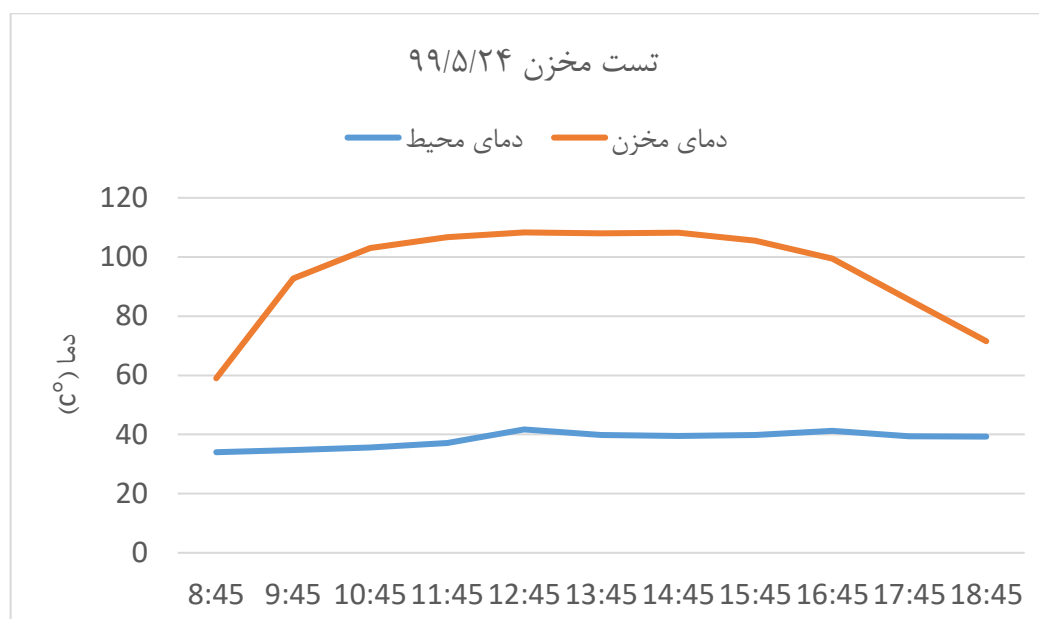
تست ۹۹/۲/۱۸ با تعداد ۱۸ لوله و سرعت ۴ متر بر ثانیه انجام شد. حداکثر دمای محیط ۳۳/۹ درجه سانتیگراد و حداکثر دمای مخزن برابر با ۸۲/۵ درجه سانتیگراد ثبت شد. دمای محیط افزایش ۰/۵ درجه‌ای نسبت به روز قبل داشت و در شرایط مشابه آب و هوایی دمای مخزن ۳۳/۹ درجه سانتیگراد افزایش داشت که به دلیل افزایش تعداد لوله‌های خلاء می‌باشد.



شکل ۴-۴ تست مخزن ۹۹/۲/۱۸ با ۱۸ لوله خلاء و سرعت ۴ متر بر ثانیه

آخرین تست مخزن در ۲۴ مرداد ماه انجام شد. این تست با حداکثر ظرفیت لوله خلاء دستگاه به تعداد ۲۴ عدد و در حالت خاموش بودن فن انجام شد. حداکثر دمای محیط در این روز ۴۱/۷ و حداکثر دمای مخزن برابر با ۱۰۸/۳ درجه سانتیگراد به ثبت رسید. دمای محیط در این روز نسبت به روز هجدهم اردیبهشت ماه افزایش ۷ درجه‌ای داشت و دمای مخزن با تعداد ۲۴ لوله بدون فن افزایش ۲۵/۸ درجه سانتیگراد افزایش داشت. با توجه به کاهش ۴ الی ۵ درجه‌ای دمای مخزن در حالت روشن بودن فن می‌توان دمای حدود ۱۰۲ درجه سانتیگراد را در حالت روشن بودن فن برای این دستگاه در نظر گرفت.

دمای داخل مخزن تابعی از دمای محیط و تعداد لوله‌های خلاء می‌باشد که با افزایش هر یک از این دو دمای داخل مخزن افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۵ تست مخزن در تاریخ ۹۹/۵/۲۴ با لوله خلاء و در حالت فن خاموش

۴-۳- نکاتی در خصوص انجام آزمایش‌های خشک‌کن خورشیدی

دو عامل موثر در خشک کردن مواد غذایی عبارتند از دما و سرعت جریان هوا که سعی شده است هر دو در فرآیند خشک کردن هر محصول مورد ارزیابی قرار گیرد.

الف- دما: اولین و مهمترین عامل در خشک کردن میوه‌ها و محصولات غذایی دما می‌باشد. هر میوه محدوده دمای مجازی برای خشک کردن دارد و هر چه دمای خشک‌کن به این دما نزدیک‌تر باشد فرآیند خشک کردن بهتر و کیفیت محصول نیز بالاتر است.

ب- سرعت جریان هوا: بعد از دما دومین عاملی که در سرعت خشک شدن میوه‌ها تاثیر بسزایی دارد، سرعت جریان هوای عبوری از روی محصول است که باعث سریع‌تر خشک شدن محصول می‌شود. هر چه جریان هوای عبوری از سطح محصولات بیشتر باشد، تبخیر رطوبت از سطح ماده غذایی نیز بیشتر خواهد بود. به دلیل محدودیت هوادهی فن مورد استفاده دو سرعت ۲ و ۴ متر بر ثانیه در آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به اینکه در بحث خشک کردن میوه‌ها با توجه به انواع (ارقام) بسیار متنوع هر کدام از میوه‌ها و سبزیجات، تفاوت هر نوع نسبت به انواع دیگر، از لحاظ مقدار رطوبت، فیبر و سایر مشخصات وجود دارد. از طرفی استانداردهای

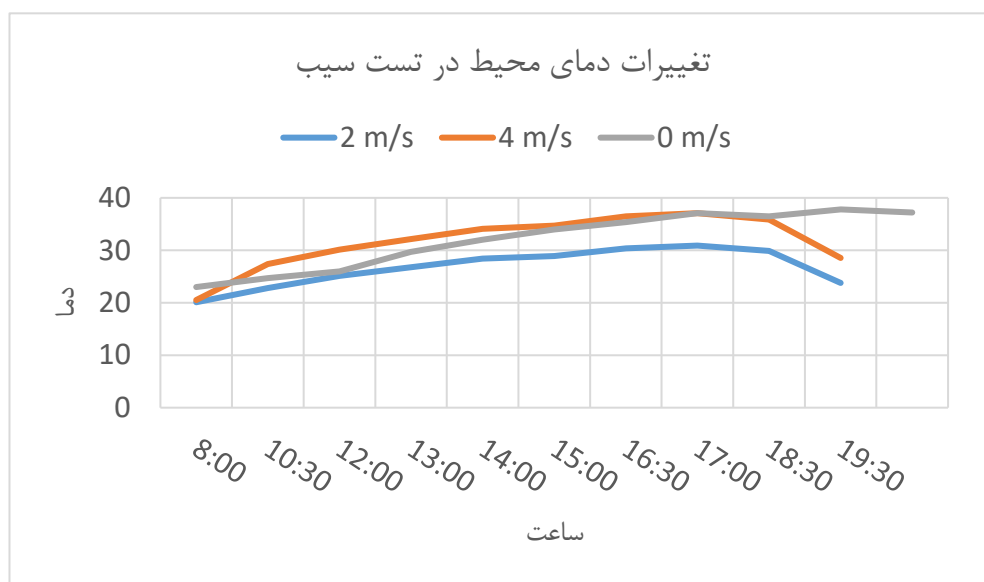
ارایه شده به صورت کلی بوده و متناسب با مشخصات کیفی هر یک از انواع مختلف یک محصول به صورت جداگانه ارایه نگردیده است. از سوی دیگر مواردی مانند بازارپسندی و نیز سلیقه‌ها و ذائقه‌های مختلف در بحث مصرف محصولات غذایی خشک، موجب می‌گردد تا میزان خشک شدن کمی وابسته به نوع (رقم) یک محصول باشد. از این رو سعی شده است تا زمان نهایی آزمایش که بر اساس میزان رطوبت نهایی آن و از طریق توزین میوه خشک شده تعیین می‌گردد، همزمان با بررسی استانداردها، از طریق مشاوره با افراد مجرب در این زمینه و ارزیابی ظاهر محصول تعیین گردد. با توجه به اینکه اندازه‌گیری رطوبت محصول نیاز به داشتن تجهیزات مخصوص می‌باشد، لذا از روش وزن نمودن محصول برای تعیین رطوبت داخل آن استفاده شده است. از این رو به منظور حفظ دمای داخل مخزن ارزیابی محصولات و توزین آنها در فاصله زمانی مشخص صورت گیرد. لذا اختلاف جزئی بین وزن نهایی تئوری و وزن نهایی واقعی در بیشتر موارد دیده می‌شود.

۴-۴- نتایج آزمایش دستگاه خشک‌کن خورشیدی لوله خلا برای محصول سیب:

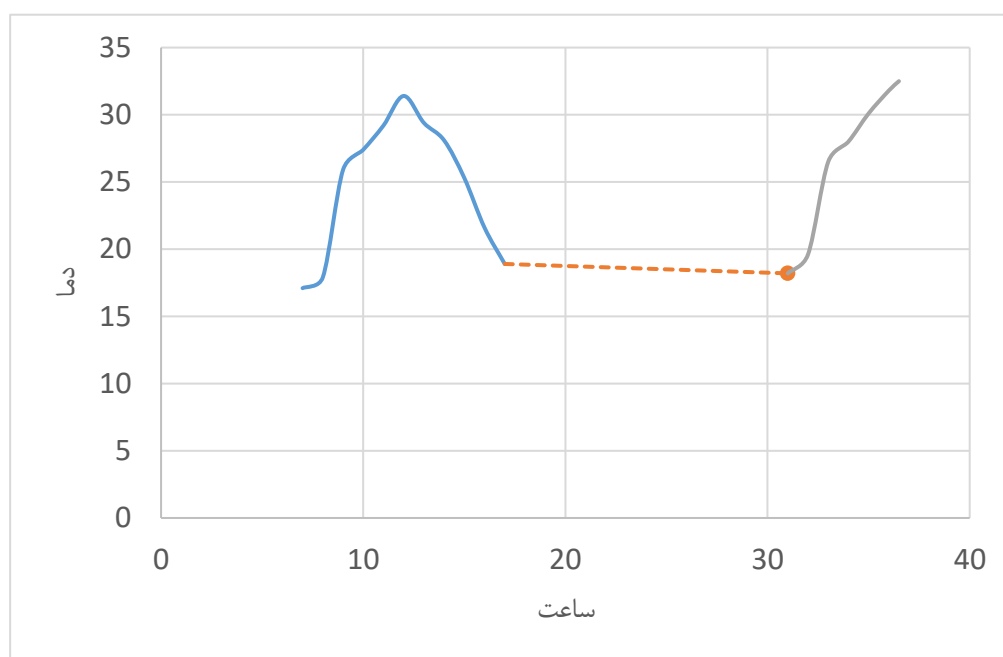
برای محصول سیب چهار آزمایش در سرعت‌های مختلف دمنده انجام شد. نوع سیب انتخاب شده از سیب‌های کشت شده در منطقه شاهرود انتخاب گردید. رطوبت اولیه سیب ۸۵ درصد و رطوبت نهایی آن ۱۵ درصد تعیین گردید [۱]. سیب‌ها با ضخامت‌های تقریبی ۵ تا ۷ میلی‌متر برش زده شدند. مقدار رطوبت ابتدایی محصول به این صورت محاسبه گردید که مقدار مشخصی از هر محصول را انتخاب نموده و بعد از برش زدن آن را وزن کرده سپس آن را کاملاً خشک می‌کنیم تا رطوبت نهایی آن به صفر برسد. با وزن کردن مقدار میوه خشک شده و کم کردن آن از وزن اولیه و تقسیم آن بر وزن اولیه مقدار رطوبت اولیه هر محصول به دست می‌آید.

دما و تابش روزانه بصورت ساعتی ثبت شد. در نمودار شکل (۴-۶) تغییرات دمای محیط در سه آزمایش سرعت ۴ و ۲ متر بر ثانیه و همچنین حالت خاموش بودن فن نشان داده شده است. با توجه به زمان خشک شدن این سه آزمایش که کمتر از یک شبانه روز بوده است، دمای محیط در یک نمودار نشان داده شده است. برای آزمایشی که در دو روز متوالی انجام شده است دمای محیط در نمودار (۴-۷) ارایه شده است. از آنجا که مدت زمان این تست طولانی بوده و در دور روز متوالی انجام شده است، لذا کل تغییرات دما در یک نمودار نشان داده شده

است و قسمت خط چین شکل نشان دهنده ساعات شب می‌باشد. در ساعات شب ثبت دمای محیط صورت نگرفته است. مشاهده می‌شود که با توجه به اینکه آزمایش‌ها در روزهای مختلف صورت گرفته، تا ۸ درجه سانتیگراد اختلاف دما در ساعات مشابه دیده می‌شود.

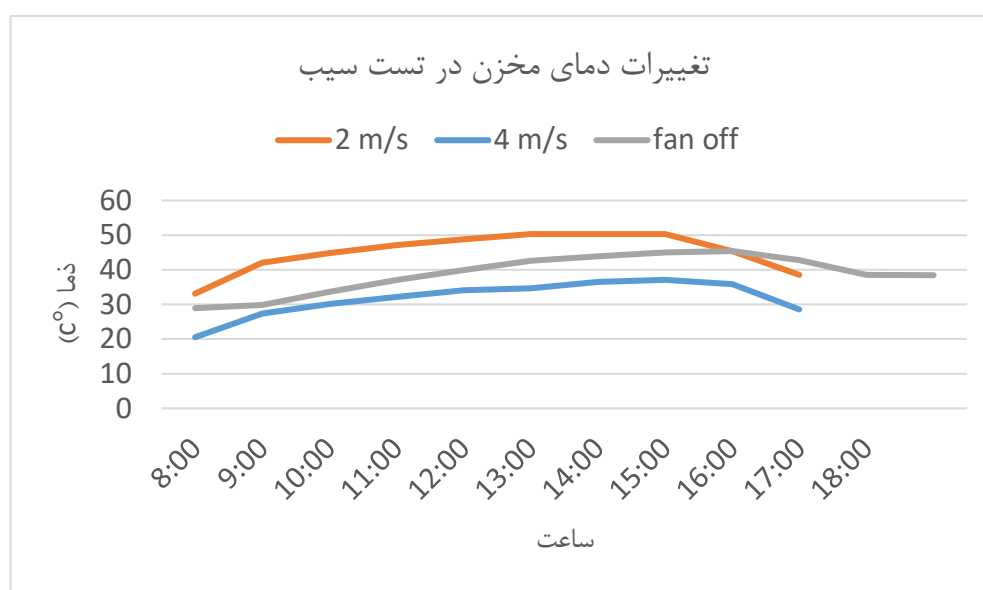


شکل ۴-۶ تغییرات دمای محیط در طول روزهای آزمایش سیب



شکل ۴-۷ تغییرات دمای محیط در آزمایش محیطی

نمودار (۴-۸) تغییرات دمای مخزن را در همان روزهای آزمایش نشان می‌دهد. بر اساس این نمودارها بیشینه دمای مخزن در حالت فن با سرعت بالا رخ داده است که بالاترین دمای محیط را نیز داشته است. بر اساس نتایج بدست آمده اثر دمای محیط (با فرض ثابت بودن تابش که تقریباً محقق می‌شود) بر بیشینه دمای مخزن تأثیر بالایی دارد.



شکل ۴-۸ تغییرات دمای مخزن در تست سیب

در نمودار (۴-۸) تغییرات دمای مخزن در سرعت ۲ متر بر ثانیه در تاریخ ۹۹/۲/۲۹ و سرعت ۴ متر بر ثانیه در ۹۹/۳/۱ و تست با فن خاموش در تاریخ ۹۹/۳/۱۱ نشان داده شده است. بیشترین دمای مخزن در تست ۲ متر بر ثانیه ۵۰/۳ درجه و در تست ۴ متر بر ثانیه ۳۷ درجه و در تست با فن خاموش برابر با ۴۷/۸ درجه ثبت گردید.

کیفیت محصولات خشک شده در مخزن از لحاظ رنگ و چروکیدگی و... کیفیت به مراتب بالاتری از محصول خشک شده در محیط دارد. همچنین کیفیت نمونه‌های خشک شده در مخزن در سرعت‌های مختلف از لحاظ رنگ و طعم و چروکیدگی تفاوت چندانی ندارد و از کیفیت نمونه خشک شده در محیط بالاتر است.



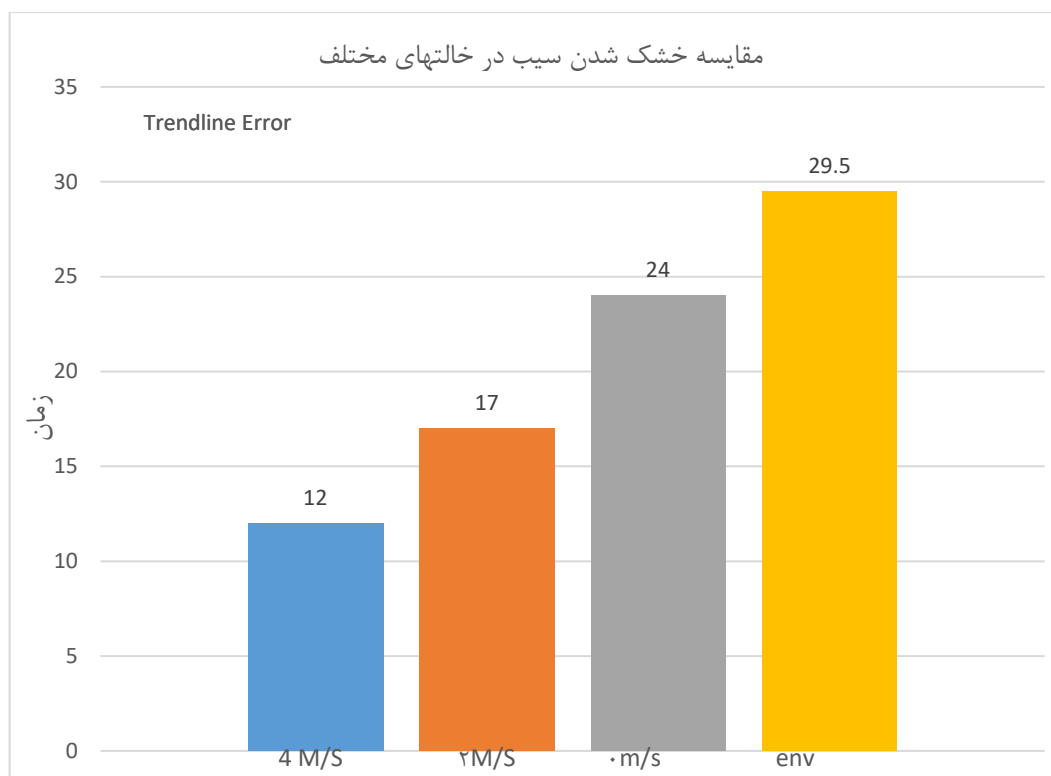
شکل ۹-۴ برش‌های سیب جهت آزمایش در دستگاه خشک‌کن



شکل ۱۰-۴ سیب‌های خشک شده در مخزن

نتایج حاصل از این چهار آزمایش نشان می‌دهد خشک کردن در مخزن با سرعت ۴ متر بر ثانیه کمترین زمان خشک شدن را دارد. مدت زمان (تعداد ساعات) خشک شدن سیب در هر یک از چهار آزمایش محیط، داخل مخزن با فن خاموش، سرعت ۲ و سرعت ۴ متر بر ثانیه ثبت و در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است.

همانگونه که انتظار می‌رود زمان خشک شدن در مخزن بالاتر از محیط و در سرعت‌های بالاتر نیز بیشتر است. به دلیل محدودیت هوادهی فن آزمایش در سرعت‌های بالاتر امکان‌پذیر نبوده است. در بهترین حالت (سرعت بالا) زمان خشک شدن حدود ۶۰٪ کاهش یافته است.



شکل ۱۱-۴ مقایسه مدت زمان خشک شدن سیب در حالات مختلف

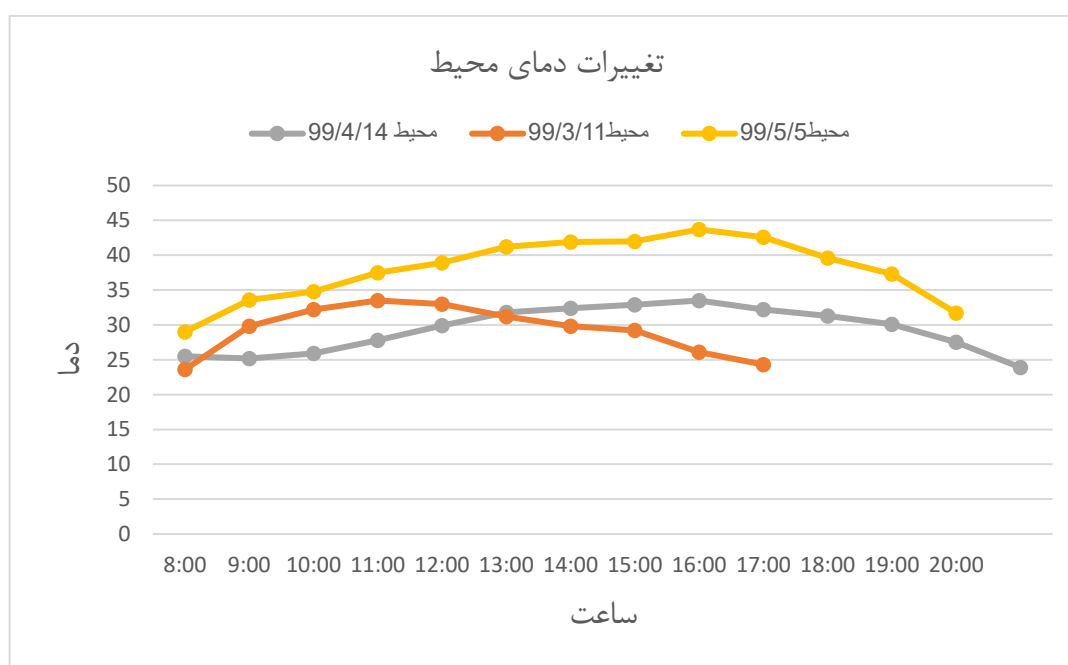
همانطور که از نمودار (۴-۱۱) پیداست تست خشک کردن با سرعت ۴ متر بر ثانیه به دلیل بالاتر بودن سرعت جریان هوا و افزایش سرعت تبخیر از سطح محصول، کوتاه‌ترین زمان را نسبت به سایر حالت‌های دیگر تست دارد. خشک شدن محصول در زمان کوتاه باعث کاهش چروکیدگی و افزایش کیفیت محصول نیز می‌شود.

۴-۵- نتایج آزمایش دستگاه خشک‌کن خورشیدی لوله خلا برای محصول زردآلو:

زردآلو یکی از محصولات پر طرفدار جهت خشک کردن می‌باشد که جزء محصولات اصلی منطقه شاهرود نیز می‌باشد. زردآلوی انتخاب شده در این آزمایش نیز از ارقام زردآلوی مرغوب این منطقه می‌باشد. رطوبت ابتدایی

زردآلو ۸۶٪ و رطوبت انتهایی آن ۱۸٪ می‌باشد. با توجه به رقم‌های متفاوت زردآلو و تاریخ‌های مختلف برداشت آن در این منطقه آزمایش‌های متنوعی در تاریخ‌های مختلف روی این محصول انجام شد. زردآلوه‌ها به صورت لایه‌های ۵ تا ۷ میلی‌متر برش زده شدند. کیفیت نمونه‌های خشک شده در مخزن از لحاظ ظاهری و طعم نسبت به مدل خشک شدن طبیعی بالاتر است و چروکیدگی کمتری دارد.

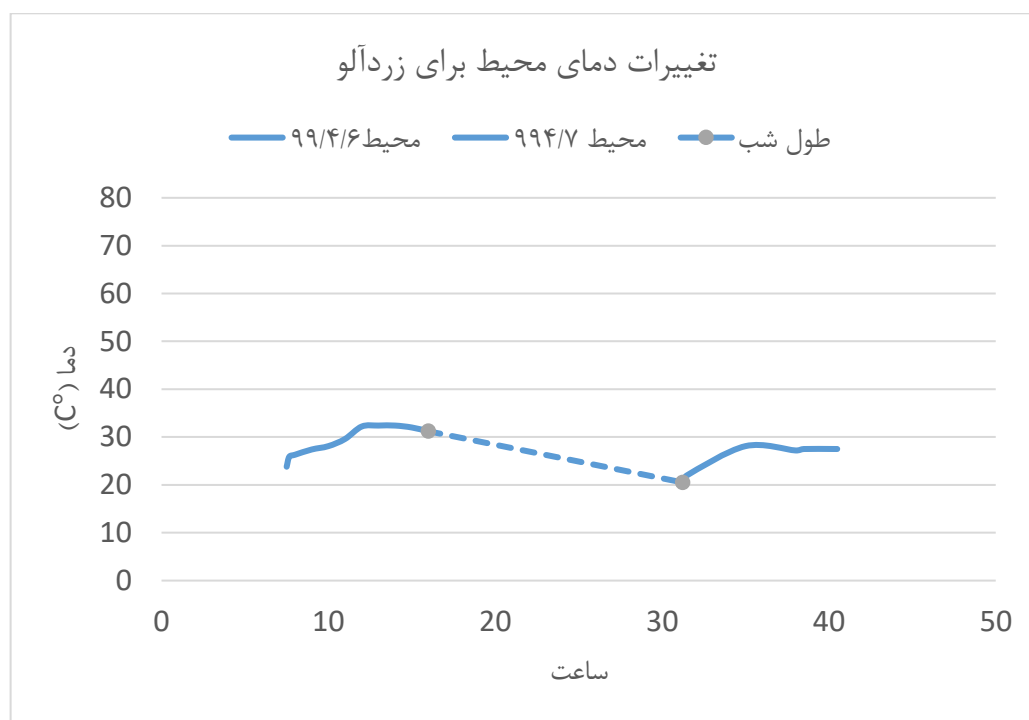
در نمودار (۴-۱۲) تغییرات دمای محیط در سه تست زردآلو که در مخزن و سرعت‌های مختلف انجام شده است نشان داده شده است:



شکل ۴-۷ تغییرات دمای محیط در آزمایش زردآلو

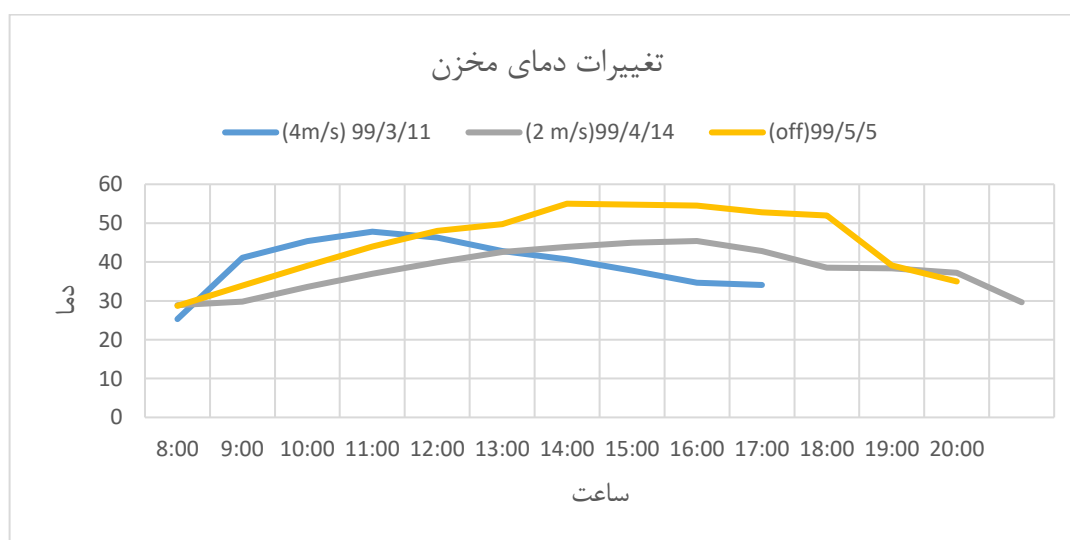
همانطور که از نمودار پیداست بالاترین دمای محیط مربوط به تاریخ ۹۹/۵/۵ و برابر با ۴۳/۷ مربوط به آزمایش خشک کردن در حالت خاموش بودن فن است که نمونه را در مدت زمان ۱۲ ساعت به رطوبت مورد نظر رسانده است.

تست خشک کردن زردآلو در محیط که بیشترین زمان خشک شدن را دارد و به مدت ۳۲/۵ ساعت به طول انجامیده است. بالاترین دمای محیط در روز اول آزمایش برابر با ۳۷/۵ و در روز دوم برابر با ۲۸/۱ می‌باشد. در نمودار (۴-۱۳) این تغییرات نشان داده شده است:



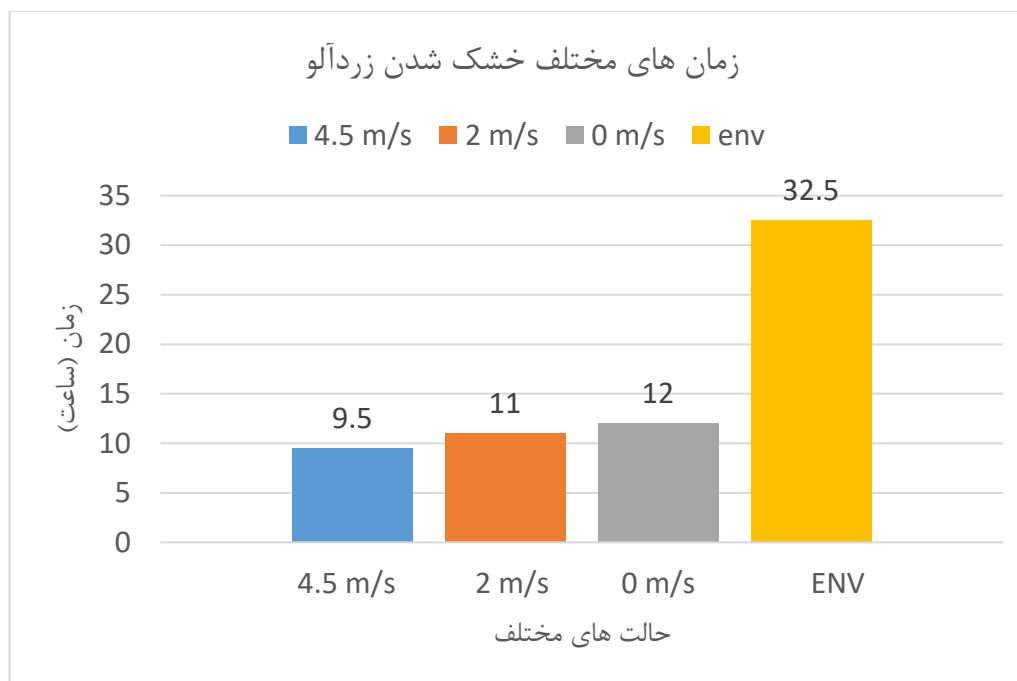
شکل ۸-۴ تغییرات دمای محیط در تست محیطی زردآلو

در تست خشک کردن زردآلو در محیط به دلیل پایین بودن دما نسبت به مخزن که عامل مهمی در مدت زمان خشک شدن می‌باشد، زمان بیشتری صرف خشک شدن محصول و رسیدن به رطوبت نهایی می‌شود. علاوه بر این در تست محیطی عواملی چون گرد و غبار و حشرات و پرندگان نیز بر کاهش کیفیت محصول تاثیر می‌گذارند. در نمودار (۴-۱۴) تغییرات دمای مخزن در سه تست ۲ و ۴ متر بر ثانیه و فن خاموش نشان داده شده است:



شکل ۹-۴ تغییرات دمای مخزن در تست زردآلو

در نمودار (۴-۱۵) مدت زمان خشک شدن محصول زردآلو در تست های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۰ مدت زمان خشک شدن زردآلو در حالت های مختلف

بالاترین مدت زمان خشک شدن در آزمایش زردآلو مربوط به حالت خشک شدن طبیعی در محیط است که به مدت ۳۲/۵ ساعت طول کشیده است. لازم به ذکر است در آزمایش هایی که مدت زمان خشک شدن در بیش از یک روز به طول انجامیده است، بعد از غروب آفتاب و نبود تابش خورشید طی مدت حدود ۲ ساعت دمای مخزن با دمای محیط تقریباً یکسان شده و در طول مدت شب با توجه به نبود دمای بالا فرآیند خشک شدن متوقف و یا بسیار کند صورت گرفته است.

۴-۶- نتایج آزمایش دستگاه خشک کن خورشیدی لوله خلا برای محصول هلو و شلیل

برای آزمایش خشک کردن هلو و شلیل نیز از ارقام مرغوب بازار جهت این کار استفاده شد. رطوبت اولیه هلو و

شلیل به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۷۵٪ و رطوبت نهایی آن ها ۰/۱۵ درصد می باشد. وزن هلو و شلیل مورد استفاده در این

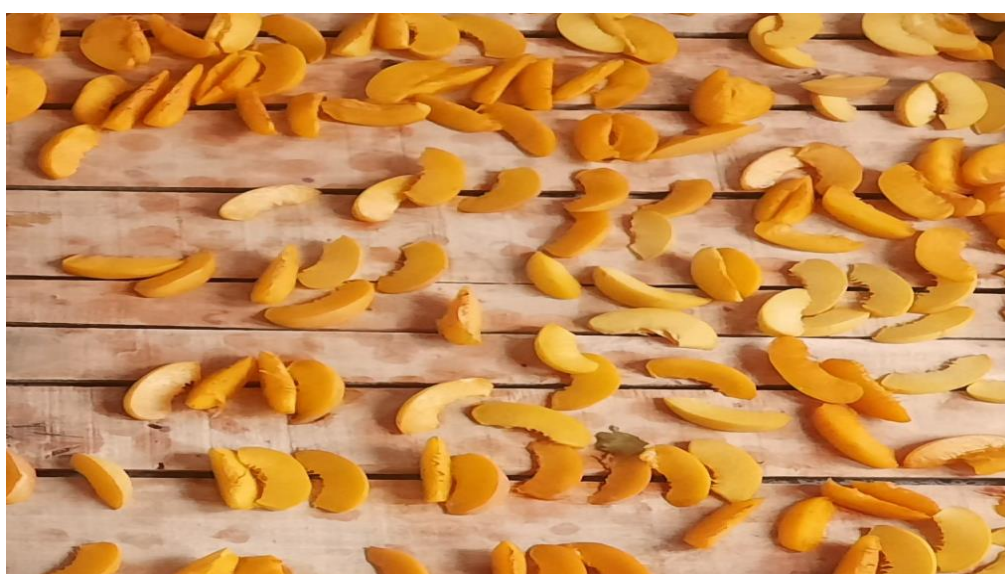
آزمایش ها در حدود ۳۰۰ گرم بود که هلو باید به وزن نهایی ۴۲/۳ گرم و شلیل به وزن نهایی ۸۸/۲ گرم برسد. وزن

نهایی واقعی در انتهای آزمایش برای هلو $47/8$ گرم اندازه گیری شد که مقدار $5/5$ گرم با وزن نهایی تئوری اختلاف داشت و برای شلیل نیز برابر با 93 گرم شد که $4/8$ گرم با وزن نهایی تئوری فاصله داشت و درصد خطای آن برابر با 3 درصد اندازه گیری شد.



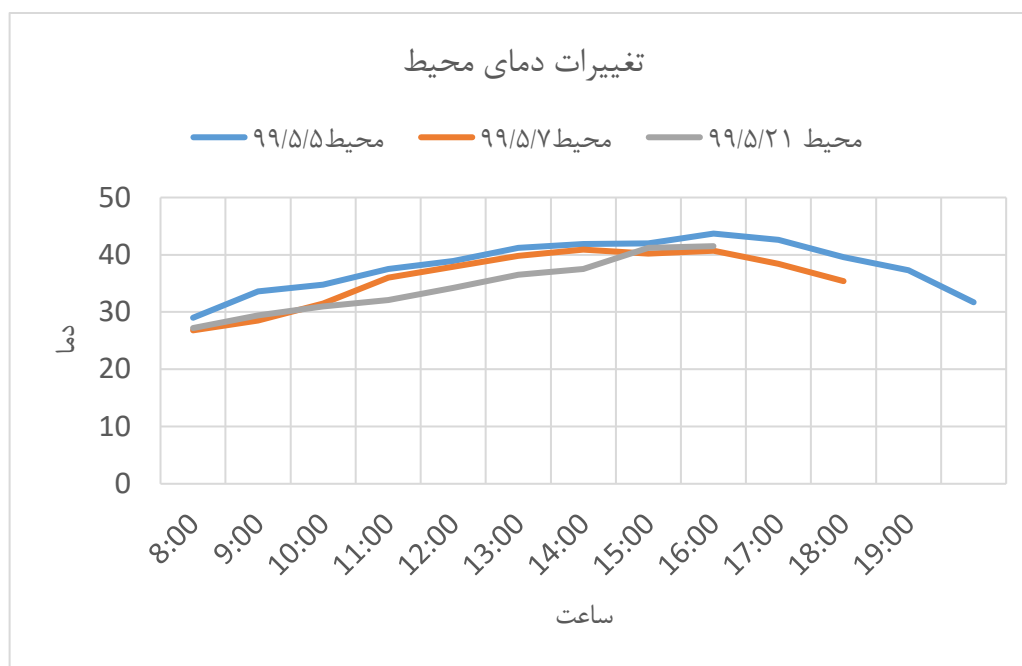
شکل ۱۱-۴ برش‌های هلو جهت خشک کردن در دستگاه خشک‌کن

شکل زیر برش‌های شلیل جهت آماده سازی برای خشک را نشان می‌دهد:



شکل ۱۲-۴ آماده سازی شلیل جهت خشک کردن

در نمودار (۴-۱۸) تغییرات دمای محیط در تست هلو و شلیل نشان داده شده است:

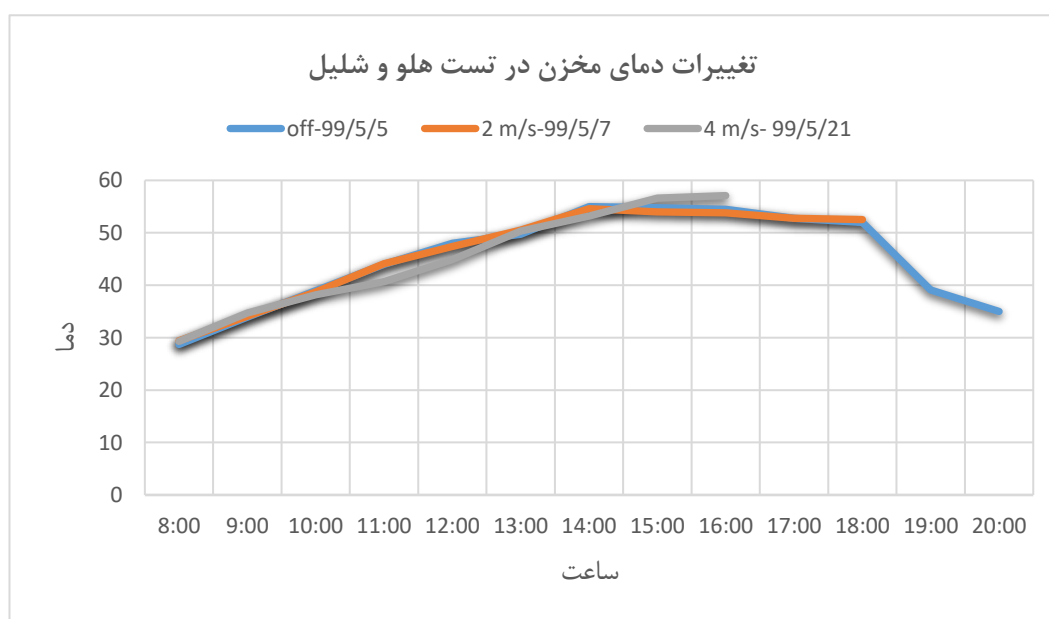


شکل ۴-۱۳ تغییرات دمای محیط در روزهای مختلف تست هلو و شلیل

همانطور که از نمودار (۴-۱۸) پیداست بالاترین دمای محیط در طی این سه آزمایش برای میوه‌های شلیل و

هلو برابر با ۴۳/۷ در تاریخ ۹۹/۵/۵ می‌باشد.

تغییرات دمای مخزن در تست خشک کردن هلو و شلیل در نمودار (۴-۱۹) نشان داده شده است:



شکل ۴-۱۹ تغییرات دمای مخزن در تست هلو و شلیل

در نمودار تغییرات دمای مخزن بالاترین دما مربوط به تاریخ ۹۹/۵/۲۱ و برابر با ۵۷/۱ درجه سانتیگراد می‌باشد.

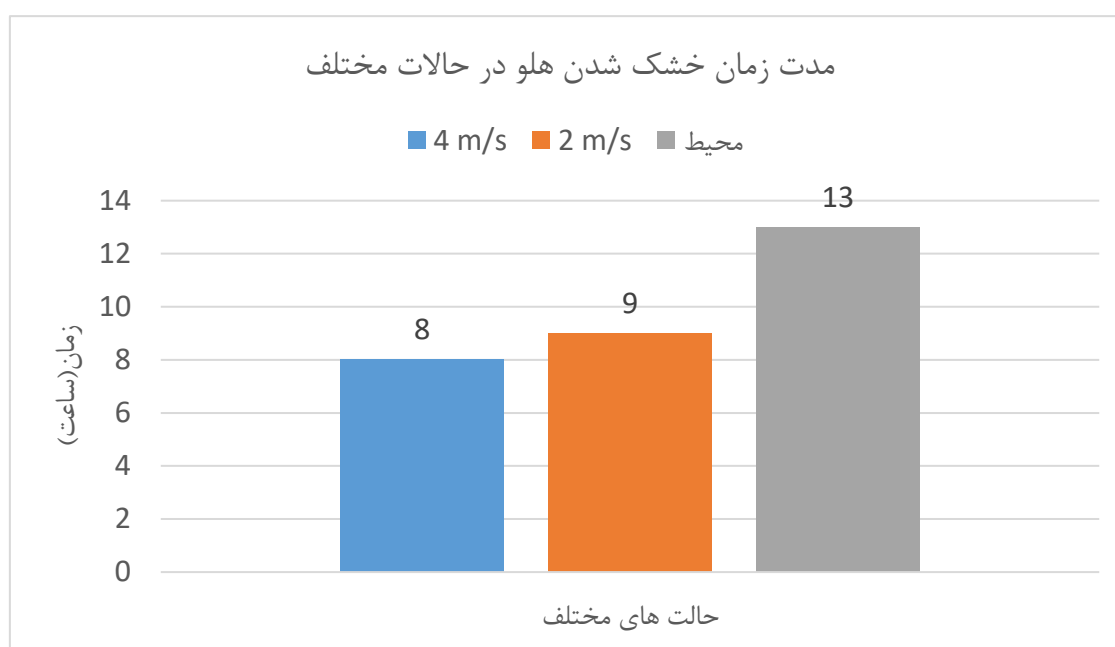
مدت زمان خشک شدن هلو برای آزمایش‌های مختلف هلو عبات است از ۸ ، ۹ و ۱۳ ساعت می‌باشد که به

ترتیب مربوط به سرعت ۴ متر بر ثانیه، ۲ متر بر ثانیه و حالت محیط می‌باشد. در صد خطا در آزمایش هلو ۳/۵

درصد می‌باشد. محدوده مجاز دمای خشک کردن هلو ۴۵ الی ۶۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که در این آزمایش

دمای مخزن در محدوده ۵۴ الی ۵۷ درجه سانتی‌گراد ثبت شد.

در نمودار (۴-۲۰) مدت زمان خشک شدن هلو در هر یک از آزمایش‌ها نشان داده شده است.



۴-۲۰ مدت زمان خشک شدن هلو در تست‌های مختلف

محدوده مجاز دما برای خشک کردن شلیل ۴۵ الی ۶۰ درجه سانتیگراد می‌باشد که در این آزمایش محدوده

دمایی ۵۴/۶ الی ۵۷ درجه سانتیگراد به ثبت رسید. کوتاه‌ترین زمان خشک شدن مربوط به سرعت ۴ متر بر ثانیه با

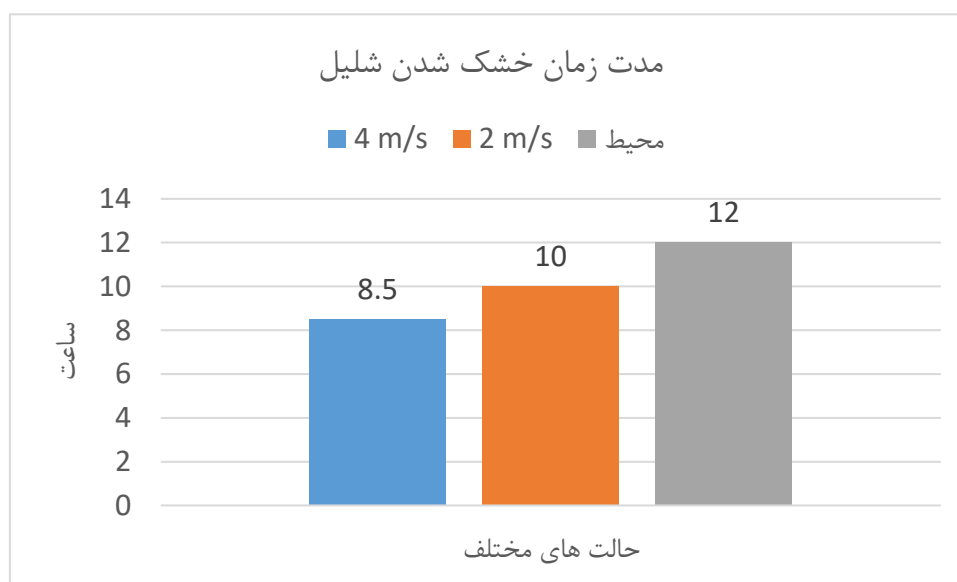
۸/۵ ساعت و بالاترین زمان با ۱۲ ساعت مربوط به خشک شدن در محیط می‌باشد. برای حالت سرعت ۲ متر بر ثانیه

نیز مدت زمان ۱۰ ساعت به ثبت رسید.

آزمایش هلو و شلیل همزمان در یک مخزن انجام شد. با توجه به تجربه به دست آمده از آزمایش‌های قبلی و

تخمین مدت زمان خشک شدن هر یک از میوه‌ها، پس از گذشتن چند ساعت از شروع آزمایش در چند مرحله نمونه‌ها توزین شد و با توجه به میزان رطوبت مورد نظر، هر کدام از نمونه‌ها که به مقدار رطوبت مورد نظر رسیده بودند از دستگاه خارج و توزین شد و مدت زمان آزمایش برای هر یک از نمونه‌ها ثبت گردید و مابقی نمونه‌ها تا رسیدن آخرین نمونه به رطوبت مورد نظر در دستگاه قرار داده شد. این دستگاه در آزمون خشک کردن همزمان میوه‌های مختلف نیز کارایی خوبی نشان داد و عملکرد آن در این زمینه نیز رضایت بخش بود.

در نمودار (۴-۲۱) مدت زمان خشک شدن شلیل در حالت‌های مختلف خشک کردن نشان داده شده است:



شکل ۲۱-۴ مدت زمان خشک شدن شلیل در حالت‌های مختلف

۴-۷- نتایج آزمایش دستگاه خشک کن لوله خلاء برای فلفل قرمز:

برای خشک کردن محصول فلفل قرمز از فلفل‌های کشت شده در منطقه شاهرود (روستای فرومد) استفاده شد. فلفل قرمز دارای رطوبت ابتدایی ۰/۸۴ درصد می‌باشد که باید کاملاً خشک شود و به رطوبت نهایی صفر برسد. برای فلفل دو آزمایش محیط و مخزن با سرعت ۴ متر بر ثانیه انجام شد. وزن ابتدایی نمونه برای مخزن ۱۵۰۰ گرم و برای محیط ۵۰۰ گرم در نظر گرفته شد.

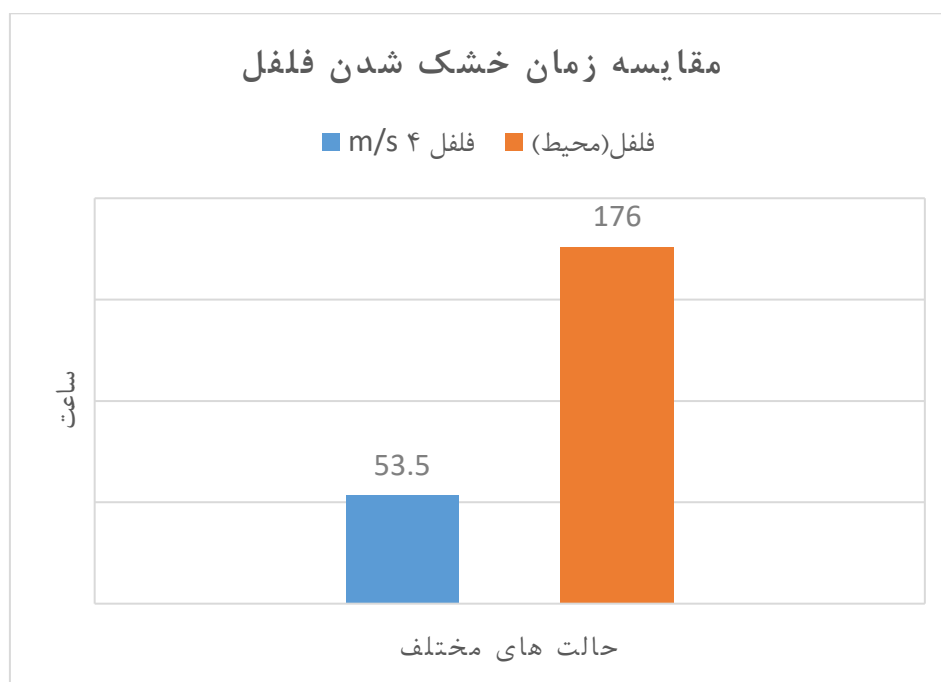
مدت زمان خشک شدن برای نمونه درون مخزن با سرعت ۴ متر بر ثانیه ۵۳/۵ ساعت و برای خشک شدن

طبیعی در محیط برابر ۱۷۶ ساعت ثبت شد. وزن نهایی نمونه داخل مخزن ۲۳۰ گرم و وزن نهایی نمونه محیط برابر با ۵۰ گرم اندازه گیری شد. بر این اساس حدود ۷۰ درصد در زمان خشک شدن این محصول صرفه جویی صورت گرفته است.



شکل ۱۴-۴ فلفل قرمز جهت خشک کردن در مخزن

در نمودار (۴-۲۲) مدت زمان خشک کردن فلفل تست های ۴ متربرثانیه و حالت محیطی نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۵ مدت زمان خشک شدن فلفل در تست های مختلف

۸-۴- محاسبه بازده دستگاه خشک کن خورشیدی لوله خلا:

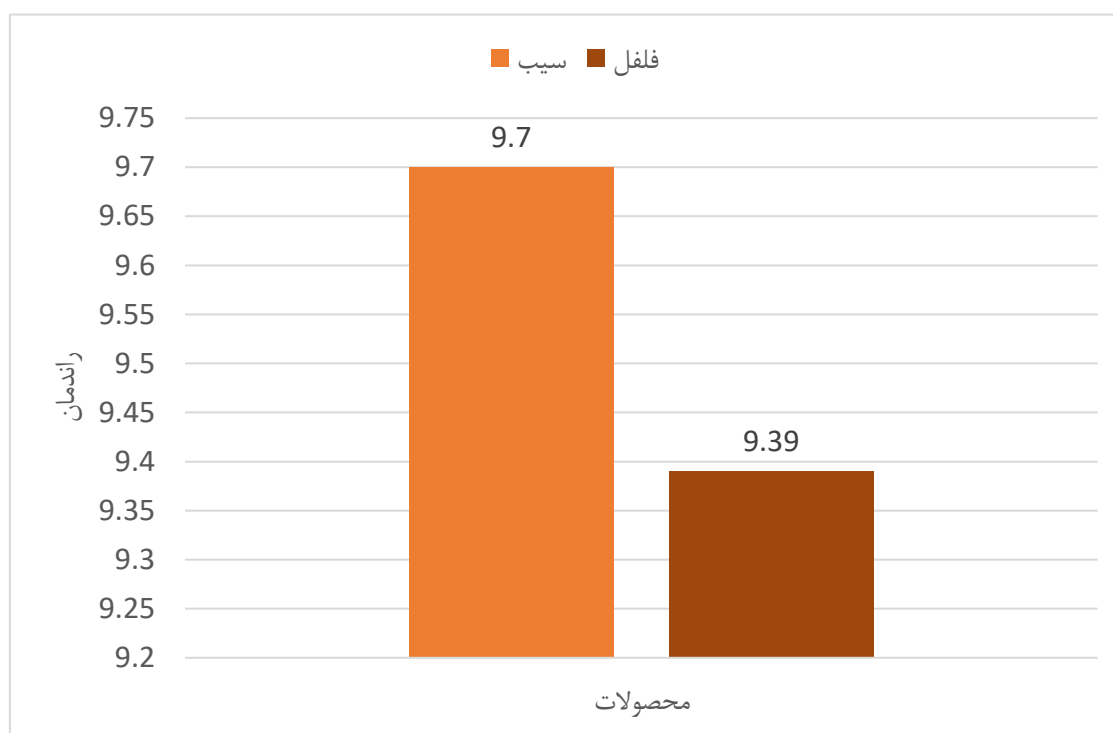
قبل از ارایه این نتایج باید نکاتی درخصوص بازده دستگاه ذکر شود. به منظور ارزیابی گنجایش مخزن از لحاظ وزنی و همچنین تخمین عملکرد دستگاه خشک کن در حالت کاملاً پر، دو آزمایش سیب و فلفل به صورت مخزن پر انجام شده است. در بقیه آزمایش ها بخشی از حجم داخل مخزن به دلیل محدودیت های زمانی و هزینه ای مورد آزمایش قرار گرفت و هدف مقایسه پارامتر سرعت گردش هوا و در برخی موارد تعداد لوله های خلاء بود.

اما طبق روابط ارایه شده در فصل سوم، بازده متناسب با میزان تبخیر آب از محصول محاسبه می شود. لذا تنها با استفاده از آزمایش های تمام بار می توان بازده دقیق آن را محاسبه نمود. لذا در آزمون هایی که محصول روی تمام سطح سینی ها چیده شده است، بازده دستگاه محاسبه و ارایه گردیده است.

در این آزمایش ها دو سینی داخل مخزن کاملاً با محصول های ذکر شده پر و سرعت دمیده ۴ متر بر ثانیه انتخاب شده است. وزن سیب ۱۵۴۲ گرم و وزن فلفل قرمز ۱۵۰۰ گرم بوده است.

در نمودار شکل (۴-۲۳) بازده محصولات مختلف با شرایط آزمایش متفاوت در دستگاه خشک کن نشان داده

شده است.



شکل ۱۶-۴ مقایسه راندمان در محصولات فلفل و سیب

بالاترین بازده خشک کردن مربوط به حالت تمام بار دو محصول سیب و فلفل با مقدار ۹/۷ و ۹/۳۴ می‌باشد. سرعت فن در هر دو آزمایش ۴ متر بر ثانیه می‌باشد. در مقایسه با بازده محاسبه شده در کارهای مشابه با موضوع این پایان‌نامه مشخص می‌شود که دستگاه مورد استفاده در این پایان‌نامه عملکرد خوبی داشته و بازده به دست آمده در محدوده‌ی قابل قبولی می‌باشد. برای مثال راندمان یک دستگاه خشک‌کن خورشیدی با پشتیبانی یک مشعل زیست توده برابر با ۹٪ محاسبه شد [۱۹] و در مورد دیگری راندمان یک دستگاه با سیستم ذخیره ساز گرمایی موم پارافین ۱۰/۸٪ به دست آمد [۲۰]. راندمان خشک کردن یک دستگاه خشک‌کن با واحد کمکی ذغال چوب [۲۱] نیز در محدوده ۷/۵ الی ۹/۷ درصد محاسبه شد. راندمان دستگاه مورد بحث این پایان‌نامه با وجود نداشتن سیستم‌های کمکی یاد شده در محدوده بسیار خوبی قرار دارد ضمن اینکه نداشتن این سیستم‌های کمکی باعث کاهش هزینه اولیه و هزینه‌های جاری می‌شود.

۹-۴- بررسی اقتصادی ساخت و بهره‌برداری از دستگاه خشک‌کن خورشیدی لوله‌خلاء

با توجه به نتایج به دست آمده از دستگاه خشک‌کن مورد بحث در این پایان نامه ساخت محصولی با عنوان "خشک‌کن خورشیدی لوله‌خلاء" با قابلیت خشک کردن انواع میوه و سبزیجات با کاربری تجاری و خانگی مورد بررسی قرار گرفته است.

حجم مخزن دستگاه پیشنهادی برابر با ۲۶۰ لیتر است که با داشتن سه طبقه (از جنس توری فلزی) و ظرفیت خشک کردن ۲ الی ۴ کیلوگرم (با توجه به نوع محصول) بتواند جهت تامین دمای مناسب فرآیند خشک‌کن در فصول و شرایط آب و هوایی مختلف مورد استفاده قرار گیرد. در حالت پایه از ۱۰ عدد لوله خلاء برای این دستگاه استفاده می‌گردد که البته امکان تغییر این تعداد توسط کاربر در شرایط آب و هوایی مختلف وجود دارد. جهت سیرکوله کردن هوای داخل مخزن از یک دمنده با توان ۱۰۰ وات استفاده می‌شود که سرعت تا ۵ متر بر ثانیه را در داخل مخزن تامین می‌کند.

جهت استفاده هر چه بیشتر از انرژی خورشید و صرفه جویی در مصرف برق و به تبع آن سوخت‌های فسیلی، جهت تامین برق دمنده دستگاه از یک پنل فتوولتاییک استفاده می‌شود که ضمن عدم نیاز به برق شهری استفاده از دستگاه را در مکان‌هایی که دسترسی به شبکه برق ندارند را امکان پذیر می‌سازد.

۱۰-۴- تحلیل اقتصادی

- دوره بازگشت سرمایه

برای محاسبه مدت زمان بازگشت سرمایه از رابطه زیر استفاده شده است:

$$PB = \frac{CC}{AS} \quad (4-4)$$

که PB دوره بازپرداخت (سال) است، CC هزینه سرمایه پروژه است و AS صرفه جویی در هزینه خالص سالانه به دست آمده است. صرفه جویی در هزینه خالص سالانه (Annual Saving) صرفه جویی در هزینه است که پس از تمام هزینه های عملیاتی حاصل می شود. برای محاسبه AS باید مقدار صرفه جویی سالانه یا سود را از

مصرف انرژی سالانه و یا هزینه‌های کارگری کم کنیم.

$$AS = \text{Annual cost(energy, ...)} - \text{operating cost} \quad (4-5)$$

هزینه سرمایه گذاری برای دستگاه خشک کن مورد بحث در این پایان‌نامه با تعداد ۱۰ لوله خلاء برابر با ۷۰۰۰۰۰۰ ریال در نظر گرفته شده است. هزینه های جاری شامل هزینه‌های برق، کارگری و خرید میوه تازه می‌باشد.

برای محاسبه مدت زمان برگشت سرمایه گذاری انجام شده بابت دستگاه خشک کن خورشیدی لوله خلاء سود حاصل از خشک کردن دو محصول فلفل و سیب را در نظر می‌گیریم:

• الف: فلفل قرمز

مدت زمان برداشت فلفل قرمز ۳ ماه است و با توجه به یک دوره سه ماهه در سال مدت زمان بازگشت سرمایه برابر است با:

بازگشت سرمایه (سال)	سود سالانه (ریال)	سرمایه گذاری اولیه (ریال)	هزینه دوره ۳ ماهه (برق، کارگری و ..)	قیمت میوه خشک (ریال)	قیمت میوه تازه (ریال)
۵/۸	۱۴۴۰۰۰۰	۷۰۰۰۰۰۰	۲۴۰۰۰۰۰	۱۶۰۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰۰

• ب: سیب

سیب نسبت به فلفل و برخی دیگر از میوه ها دارای تنوع نژادی بسیار می‌باشد و به همین علت طول دوره برداشت طولانی‌تری نسبت به برخی میوه‌های دیگر دارد (از تابستان تا پاییز).

بازگشت	سود سالانه	سرمایه	هزینه دوره ۳	قیمت میوه	قیمت میوه
سرمایه (سال)	(ریال)	گذاری اولیه	ماهه (برق، کارگری و ..)	خشک (ریال)	تازه (ریال)
۳/۵	۲۱۰۰۰۰۰۰	۷۰۰۰۰۰۰۰	۲۴۰۰۰۰۰	۸۵۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰

لازم به ذکر است دوره بازگشت تنها برای دوره ۳ ماهه استفاده شده است و در صورت استفاده از سایر میوه ها از قبیل گوجه، انجیر، توت و سبزیجات مدت زمان فوق بسیار کمتر از مقدار محاسبه شده می باشد.

۵- فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه گیری

در این پایان نامه با ایجاد تغییراتی بر روی یک دستگاه هوا گرمکن خورشیدی و نصب سیستم چرخش هوا بر روی آن جهت ایجاد جریان هوا با سرعت‌های مختلف بر روی محصول، یک دستگاه خشک‌کن خورشیدی لوله خلاء ایجاد گردید. جهت برقراری جریان هوا از یک دمنده با قدرت ۱۰۰ وات استفاده گردید که قادر به تامین جریان هوا با سرعت حداکثر ۱۰ متر بر ثانیه می‌باشد. در این پایان نامه تست‌های مختلفی بر روی پنج محصول سیب، زردآلو، هلو، شلیل و فلفل انجام شد. تمامی تست از ساعت‌های ابتدایی صبح شروع شدند و در طول تست دمای محیط، دمای مخزن، رطوبت و شدت تابش به صورت ساعتی ثبت شدند. پس از گذشت چند ساعت از شروع تست، در چند نوبت محصولات با ترازوی دیجیتالی دقیق وزن کشی شدند و مقدار رطوبت باقی مانده در محصول از این طریق کنترل و پس از رسیدن محصولات به رطوبت مورد نظر از دستگاه خارج شدند.

در هر یک از تست‌ها میوه‌ها پس از آماده سازی و برش زدن با لایه‌های ۵ الی ۷ میلی‌متر بر روی طبق‌های توری چیده شده و درون دستگاه خشک‌کن قرار داده شدند. بر روی هر یک از میوه‌ها تست‌های مختلفی شامل تست در محیط، تست در مخزن در حالت خاموش بودن فن و تست در مخزن با سرعت ۲ و ۴ متر بر ثانیه انجام شد. در محصول سیب مدت زمان خشک شدن برای چهار تست برابر با ۲۹/۵، ۲۴، ۱۷ و ۱۲ ساعت است که به ترتیب برای تست محیط، فن خاموش، سرعت ۲ و سرعت ۴ متر بر ثانیه می‌باشد. همانطور که پیداست مدت زمان خشک شدن در محیط بیشترین و کمترین زمان نیز مربوط به سرعت ۴ متر بر ثانیه است. در محصول زردآلو نتایج تست عبارتند از ۳۲/۵، ۱۲، ۱۱ و ۹/۵ ساعت که به ترتیب برای تست‌های محیط، مخزن خاموش، سرعت ۲ و سرعت ۴ متر بر ثانیه می‌باشد. مشابه تست سیب در این محصول نیز سرعت ۴ متر بر ثانیه کمترین زمان خشک شدن را دارد. محصول دیگری که بر روی آن تست انجام شد هلو می‌باشد که تست‌های محیط، سرعت ۲ و ۴ متر بر ثانیه بر روی آن انجام شد و نتایج آن به ترتیب ۱۳، ۹ و ۸ ساعت به ثبت رسید.

شلیل محصول دیگری است که سه تست محیط، سرعت ۲ و سرعت ۴ متر بر ثانیه بر روی آن انجام شد و

مدت زمان خشک شدن برای هر تست نیز عبارت است از: ۱۲، ۱۰ و ۸/۵ ساعت. آخرین محصولی که بر روی آن تست انجام شد فلفل قرمز می باشد. با توجه به نتایج تست های قبلی و از آنجا که بیشترین زمان خشک شدن مربوط به تست محیط و کمترین زمان نیز مربوط به تست مخزن با سرعت ۴ متر بر ثانیه می باشد لذا در این محصول تنها دو تست محیط و سرعت ۴ متر بر ثانیه انجام شد که نتایج آن عبارت است از ۵۳/۵ و ۱۷۶ ساعت. با مشاهده نتایج تست های انجام شده بر روی هر یک از محصولات مشخص می شود که بیشترین زمان خشک شدن محصول مربوط به تست محیط و کمترین زمان نیز مربوط به تست مخزن با سرعت ۴ متر بر ثانیه است که بیانگر تاثیر فراوان سرعت جریان هوا در حذف رطوبت محصولات غذایی می باشد. همچنین خشک کردن در مخزن علاوه بر صرفه جویی در زمان، باعث حفظ محصولات غذایی از گرد و غبار و آلودگی ها و بالا رفتن کیفیت محصولات می شود.

۲-۵- پیشنهادات

- استفاده از صفحات منعکس کننده در زیر لوله خلاء

با توجه به اینکه لوله های خلاء فقط با قسمتی که در مقابل خورشید قرار می گیرد تابش خورشید را جذب می کنند و قسمت پشت لوله خلاء تابش را جذب نمی کند یا تنها مقدار بسیار کمی را جذب میکند لذا با قرار دادن یک کلکتور CPC در پشت لوله های خلاء از تمام ظرفیت لوله خلاء می توان استفاده کرد و دما را تا حد زیادی افزایش داد. با به کار بردن این سیستم دما را تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد میتوان افزایش داد که باتوجه به بالا بودن دما می توان ابعاد مخزن را بزرگتر انتخاب نمود تا ظرفیت خشک کردن محصول نیز افزایش یابد.

- استفاده از پنل فتوولتائیک جهت تامین برق دمنده دستگاه خشک کن

جهت گردش هوا در مخزن دستگاه خشک کن از فن یک مشعل با توان ۱۰۰ وات استفاده شده است. جهت به حداقل رساندن مصرف برق و استفاده حداکثری از انرژی خورشید و همچنین در مواقعی که دستگاه خشک کن در مکانی استفاده می شود که دسترسی به نیروی برق امکان پذیر نیست می توان جهت تامین نیروی برق از یک سلول

فتوالتائیک استفاده کرد.

- بکارگیر ذخیره سازی انرژی درون دستگاه به منظور استفاده طولانی تر در طول شبانه روز و کاهش زمان

خشک کردن

• مراجع

1. Fudholi, A., et al., *Review of solar dryers for agricultural and marine products*. Renewable and sustainable energy reviews, 2010. 14(1): p. 1-30.
2. پایگاه اطلاع رسانی صنعت برق-بیست و یکم شهریور ۹۵. نقشه تابش خورشید www.barghnews.com در ایران/پتانسیل تابشی نقاط مختلف ایران، ۱۳۹۵
3. López, J.C., et al., *Parabolic trough or linear fresnel solar collectors? An exergy comparison of a solar-assisted sugarcane cogeneration power plant*. Renewable Energy, 2021. 165: p. 139-150.
4. Qazi, S., *Standalone Photovoltaic (PV) Systems for Disaster Relief and Remote Areas* 1st Edition. 24th August 2016.
5. M.U.H. Joardder, M.H.M., *Clean Energy for Sustainable Development*,. 2017.
6. cheraghi, r., <http://www.ecogeek.ir/>. 1399.
7. Saxena, A., *Solar Air Heaters with Thermal Heat Storages*. Chinese Journal of Engineering, 2013.
8. خشک کن خورشیدی و راههای افزایش کارایی آن -مجله آموزش و ترویج کشاورزی شماره ۱۲۴-سال ۱۳۹۷
9. Mittal, M., R. Saini, and S. Singal, *Effective efficiency of solar air heaters having different types of roughness elements on the absorber plate*. Energy, 2007. 32(5): p. 739-745.
10. Jawad, Q.A., et al., *Improve the performance of a solar air heater by adding aluminum chip, paraffin wax, and nano-SiC*. Case Studies in Thermal Engineering, 2020: p. 100622.
11. Bakry, A.I., et al., *Performance of the one-ended evacuated tubes as medium temperature solar air heaters at low flow rates*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2018. 30: p. 174-182.
12. زارع، مریم. (۱۳۹۴) اثر دو نوع پوشش شیشه‌ای بر کارایی هواگرمکن خورشیدی با جاذب متخلخل
13. حق شناس فرد، مسعود. (۱۳۹۲)، بررسی عددی عملکرد حرارتی و هیدرولیکی هوا گرمکن های خورشیدی با زبری (وی) روی سطح جاذب انرژی، فصلنامه تخصصی علمی شماره ۴.
14. Külcü, R., *Design of Serial Connected Vacuum Tube Solar Air Collector*. European Scientific Journal, Volume special edition ISSN, 1857. 7881: p. 32-37.
15. Devasena, P., et al. *Experimentation with a Solar Air Heater Coupled with Evacuated Tubes and Heat Pipes*. in *Proceedings of International Conference on Thermofluids*. 2021. Springer.
16. Wang, P.-Y., et al., *High temperature collecting performance of a new all-glass evacuated tubular solar air heater with U-shaped tube heat exchanger*. Energy Conversion and Management, 2014. 77: p. 315-323.
17. Sharma, A. and N. Sharma, *Construction and performance analysis of an indirect solar dryer integrated with solar air heater*. Procedia Engineering, 2012. 38: p. 3260-3269.
18. Chan, Y., N. Dyah, and K. Abdullah, *Performance of a recirculation type integrated collector drying chamber (ICDC) solar dryer*. Energy procedia, 2015. 68: p. 53-59.
19. Bena, B. and R.J. Fuller, *Natural convection solar dryer with biomass back-up heater*. Solar

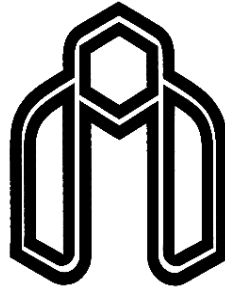
- energy, 2002. 72(1): p. 75-83.
20. Rabha, D. and P. Muthukumar, *Performance studies on a forced convection solar dryer integrated with a paraffin wax-based latent heat storage system*. Solar Energy, 2017. 149: p. 214-226.
 21. Tibebu, T.B., *Design, construction and evaluation of performance of solar dryer for drying fruit*. 2015.
 22. Sandali, M., et al., *Improvement of a direct solar dryer performance using a geothermal water heat exchanger as supplementary energetic supply. An experimental investigation and simulation study*. Renewable Energy, 2019. 135: p. 186-196.
 23. Eltawil, M.A., M.M. Azam, and A.O. Alghannam, *Energy analysis of hybrid solar tunnel dryer with PV system and solar collector for drying mint (MenthaViridis)*. Journal of Cleaner Production, 2018. 181: p. 352-364.
 24. Simo-Tagne, M., et al., *Numerical analysis and validation of a natural convection mix-mode solar dryer for drying red chilli under variable conditions*. Renewable Energy, 2020. 151: p. 659-673.
 25. Iranmanesh, M., H.S. Akhijahani, and M.S.B. Jahromi, *CFD modeling and evaluation the performance of a solar cabinet dryer equipped with evacuated tube solar collector and thermal storage system*. Renewable Energy, 2020. 145: p. 1192-1213.
 26. Alimohammadi, Z., H.S. Akhijahani, and P. Salami, *Thermal analysis of a solar dryer equipped with PTSC and PCM using experimental and numerical methods*. Solar Energy, 2020. 201: p. 157-177.
 27. Malakar, S., V.K. Arora, and P.K. Nema, *Design and performance evaluation of an evacuated tube solar dryer for drying garlic clove*. Renewable Energy, 2020.
 28. آق خانی ، محمدحسین (۱۳۹۲) . بررسی عملکرد یک خشک کن خورشیدی مجهز به سامانه گردش هوای بسته ومحفظه جاذب رطوبت. نشریه ماشین های کشاورزی، جلد ۳، شماره ۲.
 29. Daghigh, R. and A. Shafieian, *An experimental study of a heat pipe evacuated tube solar dryer with heat recovery system*. Renewable Energy, 2016. 96: p. 872-880.
 30. Sundari, A.U., P. Neelamegam, and C. Subramanian, *Performance of evacuated tube collector solar dryer with and without heat sources*. Iranica Journal of Energy & Environment, 2013. 4(4): p. 336-342.
 31. Singh, P., S. Vyas, and A. Yadav, *Experimental comparison of open sun drying and solar drying based on evacuated tube collector*. International Journal of Sustainable Energy, 2019. 38(4): p. 348-367.
 32. Kalogirou, S.A., *Solar energy engineering: processes and systems*. 2013: Academic Press.

Abstract:

Drying fruits and vegetables has long been considered in order to maintain quality and facilitate storage, as well as increase added value for the benefit of farmers. There are several methods used to dry food products, depending on the type of energy used, such as electricity, gas and solar energy. Among the types of energy sources, solar energy has received more attention than other sources due to its cleanliness and also the high potential of the country in the field of benefiting from this type of energy. Solar dryers are divided into flat plate (FPC), linear parabolic collector (PTC) and vacuum tube collector (ETC) according to the type of solar energy absorption. In terms of type of drying, they are divided into direct, indirect and combined types. Vacuum tube collector has high efficiency in different weather conditions. In this dissertation, a new practical work has been done on vacuum tube dryer, and unlike previous types that indirectly (water heating or storage materials) use solar energy for drying, in this method, the heat absorbed directly by the sun is used to heat The air inside the vacuum tubes and the heated air are directed directly into the dryer tank and used to dry the product. To perform the experiments, first by designing and executing the air cycle, the device was ready to perform the experiments. To evaluate the performance of the device, 4 types of fruits including apples, apricots, peaches and nectarines, as well as peppers, which are mostly cultivated in Shahroud region, were selected for drying. Different experiments with different air velocities as well as without air flow (off fan) and drying in the environment have been performed and compared with each other. The results of these experiments show a 30 to 70% reduction in drying time compared to drying in the environment. Also, the efficiency of the dryer was up to 10% for the products to fill the tank completely.

Keywords:

Dryer, solar Enrgy, Evacuated tube collector, Energy Efficiency



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Systems

Solar dryer with evacuated tube collector

By:

Mohammad Naghie

Supervisors:

Dr. Mohammad Zamen

Dr. Mohammad.H Ahmadi

March 2021