



مروری بر خشک کن های خورشیدی محصولات کشاورزی

حسن مسعودی^{1*}، مجتبی مروج²

1- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

2- عضو هیات علمی گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

* اهواز، کدپستی: ۶۱۳۵۷۸۳۱۵۱، hmasoudi@scu.ac.ir

چکیده

با توجه به اینکه سوخت های فسیلی همراه با آلاینده گی بوده و استفاده دائمی از آنها مقدور نیست، توجه به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر از جمله خورشید، آب و باد برای خشک کردن محصولات کشاورزی افزایش یافته است که در این میان، انرژی خورشیدی بیشترین پتانسیل را داراست. خشک کن های خورشیدی از لحاظ ساختار به دو دسته غیرفعال و فعال دسته بندی می شوند. در نوع غیرفعال تنها از جابجایی طبیعی جریان هوا برای خشک کردن محصول استفاده می شود. ولی در نوع فعال، از یک فن مکنده یا دمنده برای ایجاد جریان هوا در سرتاسر بستر محصول استفاده می شود. در خشک کن های مستقیم، بستر محصول در معرض تابش مستقیم خورشید قرار می گیرد، ولی در خشک کن های غیرمستقیم بستر محصول مستقیماً در معرض تابش خورشید قرار ندارد و جریان هوای گرم از سرتاسر بستر محصول عبور می کند. در خشک کن های مختلط، جریان هوای گرم از سرتاسر بستر محصول عبور می کند و در عین حال خود بستر نیز به طور همزمان در معرض تابش مستقیم خورشید قرار دارد. از نظر مسیر جریان هوا نیز خشک کن های خورشیدی در دو نوع مدار باز و مدار بسته ساخته شده اند. در نوع مدار بسته بر خلاف نوع مدار باز، از هوای گرم خروجی از محفظه خشک کن مجدداً برای کمک به گرم کردن هوای ورودی و افزایش بازده حرارتی خشک کن استفاده می شود. توسعه انواع جدید و بهینه سازی انواع موجود خشک کن ها با استفاده از تکنیک های پیشرفته مهندسی همچون شبکه های عصبی مصنوعی و دینامیک سیالات محاسباتی، با سرعت در حال انجام است و در آینده شاهد ارائه انواع هوشمند خشک کن های خورشیدی نیز خواهیم بود.

کلیدواژه ها: انرژی خورشیدی، محصولات کشاورزی، خشک کن خورشیدی، فعال، غیرفعال.

Solar dryers for agricultural products, A review

Hassan Masoudi^{1*}, Mojtaba Moravej²

1- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 6135783151 Ahvaz, Iran, hmasoudi@scu.ac.ir

Received: 07 December 2024 Accepted: 29 April 2025

Abstract

Considering that fossil fuels are associated with pollution and cannot be used permanently, attention has been paid to the use of other energy sources such as the sun, water and wind for drying agricultural products. Among renewable energies, solar energy has the most potential. Solar dryers are classified into two categories: active and passive. In the passive type, only solar energy is used to dry the product. But in the active type, a suction fan or blower is used to create air flow throughout the product bed. Also, in direct dryers, the product bed is exposed to direct sunlight, but in indirect dryers, the product bed is not directly exposed to sunlight and hot air passes through the entire product bed. In the mixed type, the air heated by the sun's energy passes all over the product bed, and at the same time, the bed itself is exposed to direct sunlight. The solar dryers are made in two types, open circuit and close circuit. In the close circuit type, unlike the open circuit type, the hot air exiting the dryer chamber is reused to heat the incoming air and increase the thermal efficiency of the dryer. The development of new types and optimization of existing types of the dryers using advanced engineering techniques such as artificial neural networks and computational fluid dynamics is underway at a rapid pace, and in the future, we will see the introduction of smart types of solar dryers.

Keywords: Solar energy, Agricultural products, Solar dryer, Active, Passive.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر حفظ و نگهداری محصولات غذایی با توجه به رشد جمعیت و کمبود مواد غذایی بسیار مورد توجه است و روز به روز اهمیت جلوگیری از اتلاف مواد غذایی و طولانی نمودن زمان ماندگاری آنها بدلیل رشد صادرات و بدست آوردن بازارهای پایدار بیشتر نمایان می‌گردد. از جمله راه‌های جلوگیری از اتلاف مزاد محصول و افزایش طول عمر آن، خشک‌کردن محصولات کشاورزی می‌باشد. با خشک نمودن، علاوه بر اینکه زمان ماندگاری محصول طولانی می‌گردد، محصول تولیدی فضای کمتری اشغال نموده و به تبع آن هزینه‌های حمل و نقل و انبارداری آن به شدت کاهش می‌یابد [1].

ایرانیان یکی از ملل پیشرو در زمینه خشک‌کردن و نگهداری محصولات کشاورزی می‌باشند، به طوری که تا چندی پیش یکی از مهمترین صادرات ایران به تمام دنیا خشکبار بوده است. خشک‌کردن مواد غذایی برای نگهداری طولانی مدت در صنایع غذایی اهمیت ویژه‌ای دارد. در محصولات غذایی مثل گوشت، و محصولات باغی و کشاورزی مثل میوه‌ها و سبزی‌ها، آب به صورت مولکول‌های آزاد وجود دارد و می‌تواند مستقیماً در فعل و انفعالات شیمیایی درون مواد غذایی شرکت کند، به همین دلیل گرفتن آب محصولات غذایی در ماندگاری آنها مؤثر است.

خشک‌کردن یعنی حذف مقدار نسبتاً کمی آب یا مایع دیگر از ماده به طوری که محتوای مایع باقیمانده تا یک مقدار قابل قبول کاهش یابد. خشک‌کردن مرحله نهایی مجموعه‌ای از عملیات است، و محصول خشک شده اغلب برای بسته‌بندی نهایی آماده است. مزایای خشک‌کردن عبارتند از [2]:

- افزایش عمر مفید محصولات کشاورزی
 - امکان ذخیره‌سازی و انبار محصولات کشاورزی تا مدت‌های طولانی
 - امکان برداشت به موقع محصول و کاهش ضایعات در مزرعه
 - کاهش وزن و حجم محصول غذایی و در نتیجه تقلیل هزینه و تسهیل حمل و نقل و انبارداری
 - جلوگیری از تغییر رنگ و در نتیجه افزایش بازار پسندی
 - کنترل رشد و فعالیت میکرو ارگانیسم‌ها از جمله قارچ‌ها
- بحران انرژی یکی از اساسی‌ترین مسائل جوامع بشری است و در این میان یافتن راهی برای تهیه انرژی سهل الوصول، پاک، ایمن، پایدار و همیشگی از اهداف اساسی است. با توجه به اینکه سوخت‌های فسیلی همراه با آلاینده‌گی هستند و استفاده دائمی از آنها مقدور نیست، توجه به استفاده از سایر منابع انرژی از جمله خورشید، آب و باد افزایش یافته است که در میان انرژی‌های تجدید پذیر، انرژی خورشیدی¹ بیشترین پتانسیل را داراست. بنابر محاسبات انجام گرفته مصرف انرژی جهان هر 20 سال دو برابر می‌شود، در نتیجه نقش یک منبع تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست اهمیت بیشتری می‌یابد. یکی از ساده‌ترین و رایج‌ترین راه‌های استفاده از انرژی خورشیدی تبدیل آن به انرژی گرمایی است که به آسانی و با تجهیزات کم هزینه قابل اجراست. در ایران به دلیل زیاد بودن روزهای آفتابی، رطوبت کم و پائین بودن ارتفاع مناطق ساحلی به نظر می‌رسد که انرژی خورشیدی جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی باشد و کمک چشم‌گیری به اقتصاد کشور نماید [3].

انسان از دیرباز سعی نموده که از طبیعت تقلید کرده و محصولات باغی، زراعی و دامی را با استفاده از تابش خورشید و وزش باد خشک نماید و از آنها در زمانی که دسترسی به مواد غذایی تازه وجود ندارد، استفاده نماید. در روش‌های سنتی² خشک‌کردن از انرژی باد و خورشید استفاده می‌شود و عمدتاً در روستاها رایج است. در روش سنتی خشک‌کردن، مواد غذایی را در سطح وسیعی بر روی زمین در معرض نور مستقیم خورشید پهن می‌کنند. در این روش مشکلاتی از قبیل عدم خشک شدن یکنواخت، آلوده شدن محصول به گرد و غبار و حشرات و از بین رفتن محصول در اثر بارش‌های ناگهانی وجود دارد. همچنین تابش مستقیم خورشید بر روی مواد غذایی به کیفیت محصول آسیب می‌رساند. در کارخانجات از خشک‌کن‌های صنعتی³ برای خشک‌کردن انواع محصولات استفاده می‌شود. این نوع خشک‌کن‌ها بسیار متنوع و در دسترس بوده و می‌توانند در هر زمان از سال مورد استفاده قرار گیرند. خشک‌کردن صنعتی در مقایسه با روش سنتی امتیازات زیادی دارد.

خشک‌کن‌های صنعتی را می‌توان به دو دسته پیوسته⁴ و ناپیوسته⁵ تقسیم نمود. در نوع پیوسته محصول بصورت جریان پیوسته از درون خشک‌کن عبور نموده و همزمان خشک می‌گردد. در مدل ناپیوسته، مقداری از محصول در درون خشک‌کن ریخته شده و پس از سپری شدن مدت زمان مشخصی خشک شده و از داخل خشک‌کن خارج می‌شود تا بقیه محصول ریخته شود. انواع خشک‌کن‌های پیوسته عبارتند از: خشک‌کن تونلی، خشک‌کن گردان، خشک‌کن نقاله پیچی و خشک‌کن پاششی. انواع خشک‌کن‌های ناپیوسته نیز عبارتند از: خشک‌کن بستر گسترده، خشک‌کن گردشی، خشک‌کن غیرمستقیم، خشک‌کن انجمادی⁶ و خشک‌کن کابینتی⁷ [2].

اگر برای خشک‌کردن مواد غذایی از خشک‌کن‌های خورشیدی⁸ استفاده شود، دیگر با مشکلات خشک‌کردن سنتی مواجه نخواهیم بود. خشک‌کردن مواد غذایی با استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی در مناطقی که رطوبت نسبی هوا کمتر از 60٪ و دما بالاتر از 22 درجه سانتیگراد و تعداد روزهای آفتابی زیاد است، قابل اجرا است. نتایج یک پژوهش نشان داد که به منظور استفاده بهینه از انرژی خورشیدی و کاهش ضایعات سبزیجات، استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی برای خشک کردن برگ نعنای تولید شده در فصل زمستان می‌تواند گزینه مناسبی باشد [4]. در نتیجه استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی در ایران به دلیل شرایط مساعد جوی عملی و مقرون به صرفه است [3]. مزایای اصلی خشک‌کن‌های خورشیدی عبارتند از [5]:

- خشک کردن سریع‌تر به دلیل گرم‌تر بودن هوای داخل خشک‌کن از هوای محیط بیرون
 - خطر فساد کمتر به دلیل سرعت خشک شدن بالا (اگر فرایند خشک کردن آهسته باشد، احتمال تخمیر و خرابی محصول افزایش می‌یابد).
 - حفاظت بیشتر محصول در برابر حشرات، آفات، باران و گرد و خاک
 - افزایش کیفیت محصول از نظر مواد مغذی، بهداشت و رنگ
 - تداوم فرایند خشک شدن در تمام ساعات روز و شرایط جوی مختلف
- هدف از این مطالعه بررسی جامع پژوهش‌های انجام شده در زمینه خشک‌کن‌های خورشیدی در ایران، دسته بندی انواع و معرفی اجزاء خشک-

5 Discrete dryer

6 Freeze dryer

7 Cabinet solar dryer

8 Solar dryers

1 Solar energy

2 Traditional methods

3 Industrial dryers

4 Continues dryer

رطوبت محصول و داخل محفظه خشک‌کن استفاده می‌شود. همچنین برای تامین برق مورد نیاز خشک‌کن‌ها (شامل روشنایی، دمنده‌ها، حسگرها و ...) از پنل‌های خورشیدی استفاده می‌شود تا بصورت مستقل از شبکه توزیع برق قابل استفاده باشند [6].

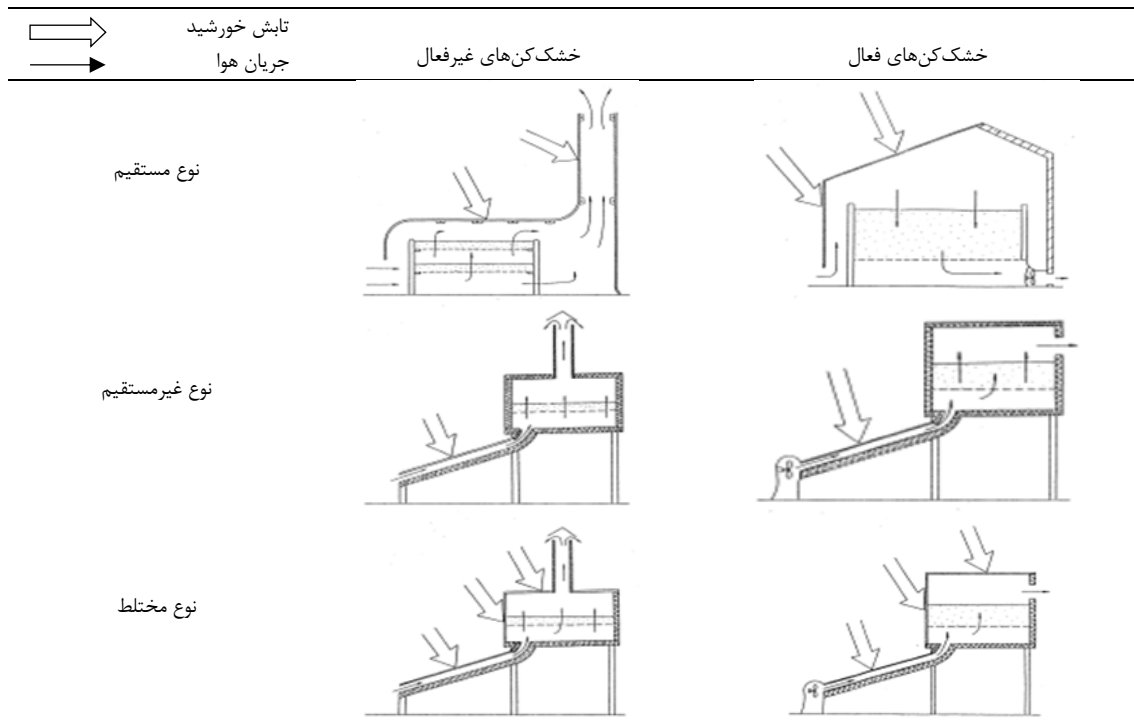
خشک‌کن‌های خورشیدی از لحاظ ساختار به دو دسته غیرفعال و فعال و از لحاظ نحوه اعمال حرارت به محصول به سه نوع مستقیم، غیرمستقیم و مختلط و از لحاظ مسیر جریان هوا به دو نوع مدار باز و مدار بسته دسته بندی می‌شوند. دسته‌بندی انواع خشک‌کن‌های خورشیدی موجود در جدول 1 آمده است، که در ادامه تشریح می‌شوند [7, 8].

کن‌های خورشیدی و بیان مزایا و معایب هر یک از آنهاست، تا در نهایت روند آینده در ساخت این نوع خشک‌کن‌ها مشخص شود.

2- مواد و روش‌ها

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی جهت ساخت و توسعه انواع مختلف خشک‌کن‌های خورشیدی برای حفاظت از محصولات کشاورزی و باغبانی صورت گرفته است. امروزه در مدل‌های تجاری پیشرفته خشک‌کن‌های خورشیدی از کنترل‌کننده خودکار دارای حسگرهای مختلف برای پایش و کنترل دما و

جدول 1 دسته‌بندی بندی خشک‌کن‌های خورشیدی [6, 7]



خشک‌کن‌های غیرفعال مختلط⁴: این نوع از خشک‌کن‌ها ترکیبی از دو روش قبلی هستند. در این روش هوای گرم شده توسط انرژی خورشید از سرتاسر بستر محصول عبور می‌کند و در عین حال خود بستر نیز به طور همزمان در معرض تابش مستقیم خورشید قرار دارد.

2-2- خشک‌کن‌های خورشیدی فعال⁵

در خشک‌کن‌های خورشیدی فعال علاوه بر انرژی خورشید، معمولاً از یک مکنده یا دمنده برای ایجاد جریان هوا در سرتاسر بستر محصول استفاده می‌شود. در نتیجه جریان هوا بصورت همرفت اجباری است [9]. سرعت خشک شدن در همرفت اجباری بیشتر از همرفت طبیعی است. در شرایط همرفت طبیعی تراکم محصول در خشک‌کن باید کمتر از همرفت اجباری باشد. بعنوان

2-1- خشک‌کن‌های خورشیدی غیرفعال¹

خشک‌کن‌هایی هستند که در آنها تنها از انرژی خورشید و جابجایی طبیعی جریان هوا برای خشک کردن محصول استفاده می‌شود. در نتیجه جریان هوا بصورت همرفت طبیعی بوده و دارای انواع زیر است:

خشک‌کن غیرفعال مستقیم²: در این خشک‌کن‌ها بستر محصول در معرض تابش مستقیم خورشید قرار می‌گیرد و جریان هوا به روش جابجایی آزاد برقرار می‌گردد.

خشک‌کن‌های غیرفعال غیرمستقیم³: در این خشک‌کن‌ها هوای گرم از سرتاسر بستر محصول عبور می‌کند و جریان هوا معمولاً به روش جابجایی آزاد برقرار می‌گردد. در این روش بستر محصول مستقیماً در معرض تابش خورشید قرار ندارد.

⁴ Mixed type dryer
⁵ Active dryers

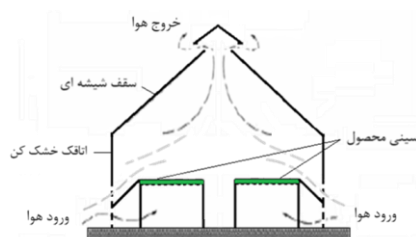
¹ Passive dryers
² Direct type dryer
³ Indirect type dryer



شکل 1 خشک کن خورشیدی غیرفعال مستقیم کابینتی

2-4- خشک کن های خورشیدی غیرفعال مستقیم از نوع گلخانه ای

خشک کن خورشیدی سقف شیشه ای که به خشک کن گلخانه ای نیز معروف است، نور خورشید را مستقیماً از طریق پوشش شفاف روی سقف سازه گلخانه جذب می کند. مطابق شکل 2 دارای یک اتاقک می باشد که شامل چند ردیف موازی سبد محصول از جنس ورق گالوانیزه یا استیل است. این خشک کن سقف شیشه ای مثلثی دارد که یکی از اضلاع به سمت شمال جغرافیایی و دیگری به سمت جنوب شیب دارند. هوای گرم شده در داخل اتاقک همراه با رطوبت جذب شده از قسمت بالای اتاقک خارج می شود. در اثر خلاء ایجاد شده، هوای تازه از قسمت پایین اتاقک وارد می شود و جریان هوا در داخل اتاقک خشک کن برقرار می گردد. هنگام ظهر درجه حرارت داخل اتاقک این خشک کن تا دو برابر درجه حرارت هوای محیط بیرونی می رسد.



شکل 2 خشک کن خورشیدی غیرفعال مستقیم گلخانه ای

چهار نوع هندسه رایج برای خشک کن گلخانه ای به ترتیب شامل گلخانه با سقف محدب، گلخانه با سقف شیبدار یکطرفه، گلخانه با سقف شیبدار دوطرفه و گلخانه با سقف محدب و دیواره های عمودی است (شکل 3). نتایج شبیه سازی ها نشان داده است که گلخانه با سقف محدب و دیواره های عمودی بهترین عملکرد را در یکنواختی سرعت جریان هوا در داخل خشک کن دارد. همچنین بهترین عملکرد در توزیع یکنواخت دمای هوای داخل خشک کن، مربوط به گلخانه با سقف شیبدار دو طرفه و گلخانه با سقف محدب و دیواره های عمودی است. کمترین فشار هوای داخل محفظه خشک کن مربوط به گلخانه با سقف محدب می باشد [11].

نمونه، در مطالعه ای زمان خشک شدن سبزی نعنای به روش همرفت اجباری نسبت به روش همرفت طبیعی حدود 30 درصد کاهش پیدا کرد، و بیشترین درصد اسانس و کلروفیل در حالت همرفت طبیعی حاصل شد [4]. این نوع خشک کن ها دارای انواع زیر می باشند:

خشک کن فعال مستقیم: در این خشک کن ها بستر محصول در معرض تابش مستقیم خورشید قرار می گیرد و جریان هوا به روش همرفت اجباری یعنی به کمک دمنده یا مکنده برقرار می گردد.

خشک کن های فعال غیرمستقیم: در این خشک کن ها هوای گرم از سرتاسر بستر محصول عبور می کند و جریان هوا معمولاً به روش همرفت اجباری برقرار می گردد. در این روش بستر محصول مستقیماً در معرض تابش خورشید قرار ندارد.

خشک کن های فعال مختلط: این نوع از خشک کن ها ترکیبی از دو نوع قبلی هستند. در این روش هوای گرم شده توسط انرژی خورشید به کمک فن از سرتاسر بستر محصول عبور می کند و در عین حال خود بستر نیز به طور همزمان در معرض تابش مستقیم خورشید قرار دارد.

مصرف انرژی در هر دو حالت فعال و غیرفعال خشک کن، مستقل از دبی جریان بوده و بیشتر تحت تاثیر محتوای رطوبتی محصول است، در حالیکه بیشترین بهره وری اکسرژی در جریان همرفت طبیعی می باشد [10].

2-3- خشک کن های خورشیدی غیرفعال مستقیم از نوع کابینتی

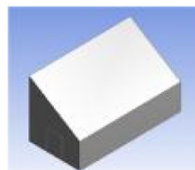
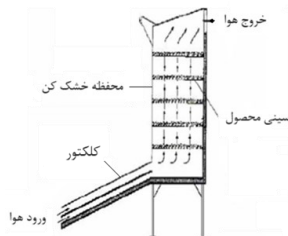
خشک کن های خورشیدی کابینتی در دو نوع غیرفعال مستقیم و فعال مختلط ساخته شده اند. در نوع غیرفعال مستقیم نور خورشید بطور مستقیم به محصول تابیده می شود و به دلیل سادگی توسط روستائیان نیز با هزینه اندک قابل ساخت است (شکل 1). در نوع مختلط این خشک کن، هوا به کمک یک مکنده و یا یک دمنده در بین محصول و محفظه خشک کن به حرکت در می آید. بدنه معمولاً از فلز یا چوب ساخته می شود و طول آن تقریباً سه برابر پهنای آن است. محفظه خشک کن دارای یک لایه شیشه یا پلاستیک شفاف است که نور خورشید از آن عبور کرده و به سطح سیاه رنگ زیر و اطراف برخورد کرده و گرما تولید می کند. درجه حرارت در داخل کلکتور می تواند به حدود 80 درجه سانتیگراد برسد. مدت زمان لازم برای خشک کردن 10 کیلوگرم انگور در این خشک کن 3-4 روز است و محصول نهایی دارای کیفیت بالاتری نسبت به خشک کردن سنتی می باشد.

در پژوهشی خشک کن خورشیدی غیرفعال مستقیم از نوع کابینتی با سه نوع محفظه مختلف ساخته شد و عملکرد آنها در شرایط طبیعی ارزیابی گردید. نرخ حذف رطوبت مواد غذایی مختلف (سیب، موز، آناناس، گواوا) از ساعت 10 تا 16 برای روزهای بسیاری در فصل های مختلف ارزیابی شد. مطابق نتایج میزان حذف رطوبت کل در مدت 6 ساعت از محفظه دارای دودکش لوله نازک 44/5 درصد، برای محفظه دارای شیروانی 33/3 درصد و برای محفظه با ککش طبیعی 58/9 درصد بود. بنابراین، مشخص شد که عملکرد محفظه با ککش طبیعی نسبت به دو محفظه دیگر بهترین و عملکرد محفظه دارای شیروانی (به دلیل تلفات انعکاس در شیشه های شیبدار شیروانی) بدترین بود. همچنین نرخ حذف رطوبت بعد ساعت 13 بیشتر از قبل ساعت 13 بود، زیرا تابش خورشید بعد از ساعت 13 بیشتر است [7].

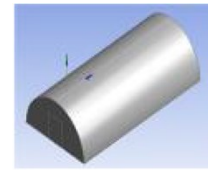
شدن شلتوک کاهش یافت. این افزایش دمای هوای خشک‌کن، ناشی از تغییرات شدت تابش، دمای محیط و سرعت باد بود. بگونه‌ای که با افزایش دمای محیط و تابش خورشید، دمای هوای خشک‌کن افزایش یافت و با افزایش سرعت وزش باد، دمای خشک‌کن کاهش یافت [14].



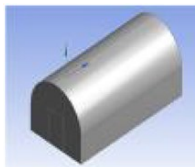
شکل 4 خشک‌کن خورشیدی غیرفعال غیرمستقیم



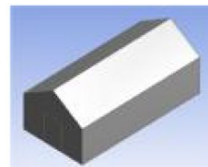
(ب) سقف شیبدار یکطرفه



(الف) سقف محدب



(د) سقف محدب و دیواره‌های عمودی



(ج) سقف شیبدار دوطرفه

شکل 3 انواع هندسه رایج برای خشک‌کن‌های گلخانه‌ای [11]

2-6- خشک‌کن خورشیدی فعال غیرمستقیم از نوع مدار باز

این خشک‌کن دارای یک کلکتور پره‌ای (به منظور افزایش سطح جذب انرژی و سطح تماس با هوای داخل کلکتور) و یک محفظه خشک‌کن می‌باشد. هوا گرم داخل کلکتور از طریق یک دمنده یا مکنده گریز از مرکز به سمت محفظه خشک‌کن حرکت می‌کند. در داخل محفظه خشک‌کن سبدهایی با چند لایه توری قرار گرفته‌اند و محصول روی این توری‌ها پهن می‌شود (شکل 5). جریان هوای داخل کلکتور از داخل این سبدها عبور کرده و ضمن گرفتن رطوبت محصول از مجرای خروجی خشک‌کن خارج می‌شود [15].

در پژوهش‌های مختلف از این نوع خشک‌کن برای خشک کردن شلتوک [16]، گوجه فرنگی [17]، پسته [18]، نعنای [4، 19]، و به‌لیمو [20] استفاده شده است. استفاده از سامانه کنترل دور فن باعث سریع‌تر و ثابت‌تر شدن آهنگ خشک شدن محصول شده و در یک دوره زمانی ثابت نسبت به حالت بدون کنترل دور فن، رطوبت نهایی محصول را حدود 8 درصد بیشتر کاهش می‌دهد (شکل 6) [21]. در پژوهشی یک خشک‌کن خورشیدی فعال غیرمستقیم طراحی و ساخته شد. از پنل خورشیدی برای تامین برق موردنیاز فن و برد کنترلی استفاده شد. نتایج ارزیابی‌های نمونه اولیه خشک‌کن نشان داد که مقادیر بدست آمده از دمای عامل خشک‌کن، سرعت جریان و سینتیک خشک‌کن برای تولید باکیفیت میوه‌های خشک، سبزیجات، قارچ‌ها، گیاهان دارویی و معطر کافی است [5]. در مطالعه‌ای دیگر یک خشک‌کن خورشیدی فعال غیرمستقیم در ترکیب با اشعه مادون قرمز طراحی و ساخته شد. تأثیر فاکتورهای دمای هوای خشک‌کننده و شدت تابش مادون قرمز بر مجموع انرژی مصرفی، سهم انرژی خورشیدی و زمان خشک شدن، در هر یک از تیمارهای آزمایش محاسبه و مقایسه گردید. طبق نتایج افزایش شدت مادون قرمز، مجموع انرژی مصرفی را بطور متوسط 36 درصد کاهش می‌دهد. همچنین افزایش دمای هوای خشک‌کننده از 45 به 65 درجه سلسیوس، زمان خشک شدن پسته را 30 درصد و افزایش شدت مادون قرمز از صفر به 0/14 وات بر سانتی‌متر مربع، این زمان را 50 درصد کاهش داد [22].

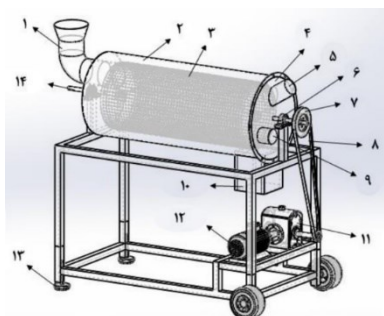
جذب تابش خورشید در خشک‌کن‌های گلخانه‌ای فقط از سمتی که تابش خورشید وجود دارد، انجام می‌شود و امکان جذب تابش خورشید از سمت مقابل وجود ندارد. عمل خشک کردن در این خشک‌کن‌ها بستگی به ویژگی‌های جریان هوا و هندسه محفظه خشک‌کن دارد. از کلکتور سهموی خورشیدی برای انعکاس نور خورشید در طرف دیگر خشک‌کن می‌توان استفاده کرد تا بازدهی خشک‌کن افزایش یابد [11]. در پژوهشی اثر استفاده از کلکتور خورشیدی سهموی خطی و سهموی نقطه‌ای و اثر شدت تابش خورشید، روی سرعت و دمای هوای داخل محفظه چهار نوع خشک‌کن گلخانه‌ای متداول به روش دینامیک سیالات محاسباتی ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که استفاده از کلکتور خورشیدی در خشک‌کن‌های گلخانه‌ای، باعث افزایش سرعت و دمای هوای داخل خشک‌کن می‌شود. اگر چه کلکتور سهموی نقطه‌ای نسبت به کلکتور سهموی خطی، نقاط داغ موضعی بیشتری در خشک‌کن ایجاد می‌کند، ولی کلکتور سهموی خطی نسبت به کلکتور سهموی نقطه‌ای، سرعت و دمای یکنواخت‌تری فراهم می‌نماید [12].

2-5- خشک‌کن خورشیدی غیرفعال غیرمستقیم

مطابق شکل 4 این خشک‌کن دارای دو قسمت کلکتور انرژی خورشیدی و محفظه خشک شدن محصول است که سبدهای محصول در آن قرار می‌گیرند. کلکتور دارای یک پوشش شفاف و یک صفحه جاذب سیاه رنگ است. محفظه خشک کردن از کلکتور مجزا بوده و دارای پوشش غیرشفاف است، لذا محصول در معرض تابش مستقیم خورشید قرار ندارد و در نتیجه کیفیت و رنگ آن حفظ خواهد شد [13]. جابجایی هوای گرم در خشک‌کن به صورت جابجایی آزاد (جابجایی در اثر تغییرات چگالی هوای گرم شده) است و در صورت وزش باد و با مکش ایجاد شده در مجرای خروجی هوا، این جریان افزایش می‌یابد. برای جلوگیری از ورود حشرات به داخل خشک‌کن‌ها، معمولاً در مجرای ورودی هوا به داخل از یک توری سیمی استفاده می‌شود.

در پژوهشی یک خشک‌کن خورشیدی از نوع غیرفعال غیرمستقیم و با جریان طبیعی هوا ساخته و با خشک کردن شلتوک مورد ارزیابی قرار گرفت. این خشک‌کن دارای کلکتور خورشیدی، محفظه محصول، کانال عبور هوا و حسگرهای دما بود. مطابق نتایج آزمایش‌ها با افزایش دمای هوا، زمان خشک-

انرژی و تلفات اکسرژی سیستم را کاهش و میزان بازده اکسرژی، مصرف انرژی سیستم را افزایش می‌دهد [26 و 27].



شکل 7 شماتیک محفظه دوار محصول برای خشک‌کن خورشیدی [25]

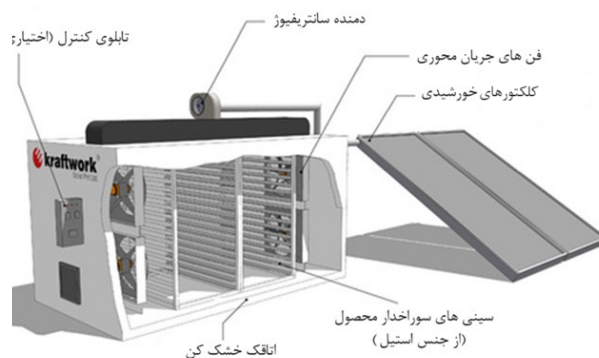
نتایج تحلیل انرژی و اکسرژی نشان داده است که حداکثر بازده انرژی در کمترین دما و بالاترین سرعت هوای خشک‌کننده و حداکثر بازده اکسرژی (انرژی در دسترس سیستم) نیز در بیشترین دما و سرعت هوای خشک‌کننده بدست می‌آید. لذا استفاده از خشک‌کن خورشیدی در دماهای کمتر و سرعت‌های بیشتر برای خشک کردن برگ‌های به‌لیمو توصیه می‌شود [20].

2-7- خشک‌کن خورشیدی فعال غیرمستقیم از نوع مدار بسته

در خشک‌کن‌های خورشیدی بخش قابل توجهی از انرژی داده شده به جریان هوای خشک‌کننده، به هدر می‌رود. بهینه نمودن خشک‌کن‌های خورشیدی می‌تواند کمک بزرگی به بهبود عملکرد آنها نماید. اصلی‌ترین قسمتی که باعث اتلاف حرارت جذب شده از خورشید توسط صفحه جذب می‌شود، قسمت انتهایی خشک‌کن است [13]. استفاده از مکانیزم بازیافت حرارتی می‌تواند راه حل مناسبی در زمینه کاهش مصرف سوخت و بهبود بازده انرژی در این خشک‌کن‌ها به شمار آید [28].

در خشک‌کن‌های خورشیدی مدار بسته دارای مکانیزم بازیافت حرارتی یا چرخش هوا، از گرمای هوای خروجی از خشک‌کن، بصورت مستقیم یا غیرمستقیم، برای گرم کردن هوای ورودی به خشک‌کن استفاده می‌شود. در حالت مستقیم هوای گرم با لوله ای به قسمت ورودی هوای خشک‌کن منتقل می‌شود (شکل 8). طبق پژوهش‌ها 75 درصد بازگشت جریان هوای گرم خروجی در خشک‌کن خورشیدی، حداقل مصرف انرژی را به دنبال دارد، اما بیش از این مقدار سبب افزایش انرژی مصرفی می‌شود، زیرا رطوبت هوای خشک‌کن افزایش یافته و روند فرایند تبخیر را کند می‌نماید. باز بودن کانال برگشت تا 5 درصد باعث افزایش دمای داخل خشک‌کن و افزایش راندمان آن می‌شود. باز بودن دریچه بازگشت بیش از این سطح باعث کاهش راندمان می‌شود، زیرا رطوبت محیط خشک‌کن افزایش می‌یابد و شدت تبخیر کم می‌شود و در نتیجه راندمان خشک‌کن کاهش می‌یابد [17].

برای رفع مشکل افزایش رطوبت هوای ورودی، در پژوهش دیگری از محفظه رطوبت گیر سیلیکاژل در مسیر برگشت هوای خروجی استفاده شد. مطابق نتایج افزایش دمای هوای خشک‌کننده و استفاده از مکانیزم گردش هوای بسته به ترتیب سبب کاهش 53 و 33 درصدی در زمان خشک شدن



شکل 5 خشک‌کن خورشیدی فعال غیرمستقیم مدار باز با سبدهای چند لایه [15]



شکل 6 خشک‌کن خورشیدی فعال غیرمستقیم با کنترلر دور فن هوای ورودی [21]

در برخی پژوهش‌ها برای افزایش راندمان انرژی خشک‌کن‌های خورشیدی از مواد تغییر فاز دهنده¹ (PCM) در مخزن ذخیره‌کننده یا محفظه خشک‌کن استفاده شده است. استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در خشک‌کن‌های خورشیدی غیرمستقیم، در مدت زمان کوتاه‌تری کیفیت محصول خشک شده را فراهم می‌کند، بگونه ای که دمای هوای داخل محفظه حتی بعد از غروب آفتاب 4 تا 20 درجه سانتیگراد بالاتر از دمای محیط است [23]. بعنوان مثال در پژوهشی یک خشک‌کن خورشیدی فعال غیرمستقیم با کلکتور صفحه ای تخت طراحی و ساخته شد و از ماده تغییر فاز دهنده پارافین جامد (با محدوده دمای تغییر فاز: 51 تا 53 درجه سلسیوس) در محفظه خشک‌کن برای ذخیره‌سازی حرارت استفاده شد. مطابق نتایج آزمایش‌ها، زمانی که دمای محفظه خشک‌کن به بیش از 53 درجه رسید، پارافین تغییر فاز داده و انرژی حرارتی ذخیره شده خود را به محفظه خشک‌کن تحویل داد و تا حدودی از افت دمای محفظه جلوگیری نمود. همچنین مشاهده شد که بین حالت استفاده از مواد تغییر فاز دهنده و حالت بدون استفاده از آن، اختلاف معنی‌داری وجود دارد [24].

استفاده از محفظه دوار برای محصول در خشک‌کن خورشیدی فعال غیرمستقیم (شکل 7) باعث کاهش چشمگیر ترک‌های ایجاد شده در برنج قهوه‌ای در مقایسه با خشک‌کن بستر ثابت می‌شود [25]. همچنین مشخص شده که افزایش سرعت هوای عبوری و کاهش ضخامت محصول، نسبت مصرف

¹ Phase change material

شکل 9 شماتیک خشک‌کن خورشیدی مجهز به مکانیزم بازیافت حرارتی غیرمستقیم با مبدل هوا به آب [28]

2-8- خشک‌کن خورشیدی فعال غیرمستقیم با سیال واسط

در این نوع خشک‌کن‌ها از یک سیال واسط (مانند آب یا نانوسیال) برای جذب انرژی خورشیدی در کلکتور و انتقال آن به درون محفظه خشک‌کن استفاده می‌شود (شکل 10). ابتدا سیال واسط توسط پمپ از مخزن خارج و در لوله‌های مسی جریان یافته و با عبور از داخل کلکتور در معرض تابش شدید اشعه‌های خورشید قرار گرفته و گرم می‌شود. آب گرم به داخل محفظه خشک‌کن هدایت شده و ضمن عبور از درون مبدل‌های حرارتی (رادیاتور) موجود در داخل محفظه خشک‌کن، گرمای خود را به هوای اطراف می‌دهد و در مخزن جمع-آوری می‌شود. هوای گرم شده از طریق فن‌هایی در سرتاسر محفظه خشک‌کن و بین سینی‌های حاوی محصول پخش شده و موجب خشک شدن محصول می‌گردد [15]. در پژوهشی از یک خشک‌کن جریان پیوسته مجهز به سامانه خورشیدی پیش گرمایش سیال آب برای خشک کردن برگ‌های به‌لیمو استفاده شد. استفاده از این سامانه خشک‌کن توانست باعث افزایش کیفیت محصول و کمیت اسانس و نیز کاهش زمان خشک شدن در مقایسه با روش‌های سنتی خشک کردن شود [30].

در پژوهشی یک خشک‌کن خورشیدی جریان غیرمستقیم سبزیجات با گرمادهی غیرمستقیم توسط نانوسیال به‌صورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفت. سیستم شامل کلکتور خورشیدی صفحه تخت با سیال واسط نانوسیال آب-آهن بود و ماده خشک‌شونده سبزی نعناع بود (شکل 11). مطابق آزمایشات متوسط بازدهی کلکتور مورد استفاده 44/3 درصد و متوسط بازده گرمایی خشک‌کن 26/1 درصد بدست آمد. همچنین در مقایسه با تحقیقات قبلی، بازدهی قابل قبولی را برای خشک‌کن با گرمادهی غیرمستقیم ارائه داد. شرایط آب و هوایی شامل دما، رطوبت و تابش خورشید توسط حسگرهای نصب شده در خشک‌کن مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به داده‌ها مشخص شد که تأثیر رطوبت و سرعت باد به دلیل عدم تغییرات زیاد و ضریب همبستگی پیرسون نزدیک به 0/3، اندک بود، ولی در خصوص دمای هوا و تابش خورشیدی با افزایش دما و تابش مراحل خشک شدن در زمان کمتری اتفاق افتاد، بگونه‌ای که رطوبت تعادلی در حدود 5 ساعت به کمتر از 10 درصد رسید و باعث شد کارایی خشک‌کن به حدود 29 درصد برسد [31].



شکل 10 خشک‌کن خورشیدی فعال غیرمستقیم با سیال واسط آب [15]

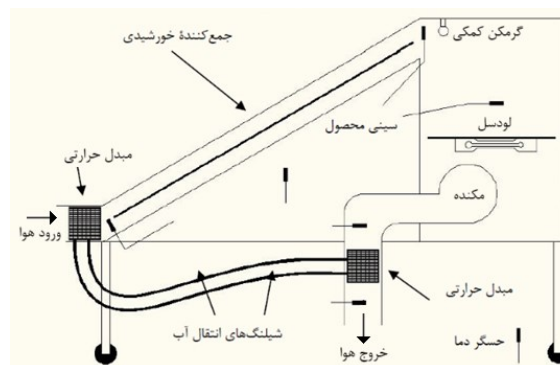
محصول شد. با افزایش دمای هوای خشک‌کننده در مکانیزم گردش هوای بسته، مصرف انرژی 14٪ کاهش و در نتیجه بازده خشک‌کن افزایش یافت. در سامانه‌ی هوای باز، افزایش دمای هوای خشک‌کننده سبب افزایش 24 درصدی در مصرف انرژی و کاهش بازده خشک‌کن گردید [29].



شکل 8 خشک‌کن خورشیدی مجهز به مکانیزم بازیافت حرارتی مستقیم [17]

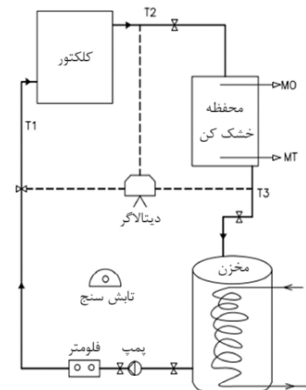
در حالت غیرمستقیم هوای گرم خروجی بدون اختلاط با هوای ورودی و از طریق مبدل‌های حرارتی نصب شده در دریچه‌های ورودی و خروجی، آن را گرم می‌کند. دو نوع مبدل حرارتی هوا به هوا و هوا به آب ارائه شده است. در مبدل هوا به آب، هوای گرم خروجی باعث گرم شدن سیال واسط آب در درون مبدل نصب شده در مسیر هوای خروجی می‌شود و آب گرم به مبدل نصب شده در دریچه ورودی هوا به خشک‌کن منتقل شده و باعث گرم شدن هوای ورودی می‌گردد (شکل 9). در پژوهشی افزایش دمای هوای خشک‌کننده با استفاده از مکانیزم بازیافت حرارتی غیرمستقیم، باعث کاهش زمان خشک شدن، صرفه‌جویی در انرژی مصرفی، افت 24 درصدی سهم خورشیدی و 20 درصد افزایش در بازیافت انرژی شد [28].

در پژوهشی، عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی فعال غیرمستقیم مجهز به سامانه مبدل حرارتی با جریان بازگشتی و صفحه جاذب تخت متخلخل ارزیابی شد. استفاده از مبدل حرارتی باعث افزایش میزان بازده خشک‌کن نسبت به حالت عدم استفاده از مبدل گردید. همچنین استفاده از مبدل حرارتی هیچگونه اثر منفی بر کیفیت رنگ و ورقه‌های گوجه‌فرنگی خشک شده نداشت [13]. در پژوهشی دیگر سامانه‌ی بازیافت انرژی غیرمستقیم دارای مبدل حرارتی هوا به هوا، به طور متوسط 28/58 درصد از انرژی لازم در طی فرایند خشک کردن را تأمین کرد. همچنین افزایش دما موجب افزایش مقدار خندان شدن پسته و استحکام مکانیکی مغز آن گردید [18].



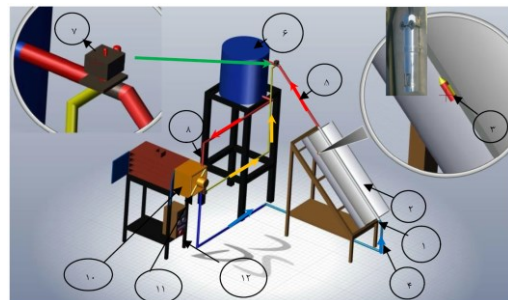
در این نوع از خشک‌کن، جذب انرژی خورشیدی هم در کلکتور و هم مستقیماً توسط محفظه خشک‌کن صورت می‌گیرد. محصول به صورت لایه نازک در داخل محفظه خشک‌کن پهن می‌شود. مطابق شکل 13-الف برای ظرفیت‌های پایین (حدود 50 تا 300 کیلوگرم) معمولاً محفظه خشک‌کن و کلکتور پشت سر هم و به صورت سری قرار می‌گیرند، ولی در ظرفیت‌های بالا (تا 1000 کیلوگرم) این دو قسمت کنار هم و به صورت موازی قرار می‌گیرند [33]. کلکتور و محفظه خشک‌کن هر دو روی زمین بسته می‌شوند و یک پوشش شفاف روی آنها قرار می‌گیرد و دیواره‌های اطراف نیز عایق‌بندی می‌شود. در این نوع خشک‌کن‌ها جابجایی هوا به صورت اجباری و توسط یک فن DC یا مکنده گریز از مرکز صورت می‌گیرد. اجزاء تشکیل دهنده اصلی این نوع خشک‌کن در شکل 13-ب آمده است [34]. در پژوهشی یک خشک‌کن خورشیدی فعال تونلی برای خشک‌کردن کاکائو طراحی و ساخته شد. مطابق نتایج ارزیابی‌ها در مقایسه با خشک کردن در هوای آزاد محصولات سریع‌تر خشک شده و دارای کیفیت بالاتری بودند [35]. در پژوهشی دیگر در ایران، یک خشک‌کن خورشیدی از نوع فعال مختلط تونلی و مجهز به فن مکنده در خروجی برای خشک کردن ورقه‌های نازک سیب درختی ساخته شد. دستگاه مذکور شامل کلکتور، محفظه خشک‌کن، پوشش شیشه‌ای، فن دور متغیر و پنل خورشیدی (جهت تامین برق فن) بود. کلکتور از نوع تخت با صفحه جاذب آلومینیومی و پوشش شیشه‌ای ساخته شد. آزمایش‌های ارزیابی عملکرد خشک‌کن نشان داد که خشک‌کن خورشیدی نسبت به روش سنتی (پهن کردن زیر تابش مستقیم خورشید) زمان خشک کردن را به میزان زیادی کاهش می‌دهد (3 ساعت در برابر 8 ساعت) [36].

در پژوهشی دیگر یک خشک‌کن خورشیدی فعال مختلط با صفحه کلکتور پره‌دار سوراخدار برای خشک کردن سبزی شوید ساخته و در دو حالت مختلف خشک کردن (مختلط و غیرمستقیم) ارزیابی شد (شکل 13-ج). طبق نتایج استفاده از کلکتور پره‌دار سوراخدار نسبت به صفحه تخت، 11 درصد افزایش بازده حرارتی را در برداشت و بیشترین بازده حرارتی در بالاترین دبی هوای عبوری به دست آمد. با افزایش دما و کاهش اندازه قطعات محصول، کاهش قابل توجهی در مصرف انرژی ایجاد شد. با افزایش دما سهم انرژی خورشیدی نیز کاهش یافت. در نهایت بیشترین بازده خشک‌کن در حالت مختلط با کوچکترین اندازه محصول (3 سانتی‌متر) و در بالاترین دمای هوای خشک کننده (65 درجه سلسیوس) برابر با 70٪ مشاهده گردید [37].



شکل 11 خشک‌کن خورشیدی فعال غیرمستقیم با سیال واسط نانو سیال [31]

در پژوهشی یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به کلکتور سهموی ساخته شد (شکل 12). سیال واسط در کلکتور سهموی، آب بود که پس از جذب حرارت ایجاد شده در کلکتور در داخل یک مخزن ذخیره شد. همزمان، سیال واسط در مبدل حرارتی که به خشک‌کن متصل بود، هوای ورودی به محفظه خشک‌کن را گرم نمود. با افزایش شدت تابش خورشید، میزان حرارت ایجاد شده در سامانه افزایش یافته و در PCM موجود در مخزن آب ذخیره شد. مطابق آزمایشات با افزایش میزان PCM بازده حرارتی کلکتور و مخزن ذخیره کننده افزایش یافت، اما با تغییر جریان سیال از 1 تا 2/5 لیتر بر دقیقه موارد اشاره شده افزایش و با رسیدن به 5 لیتر بر دقیقه کاهش یافت [32].

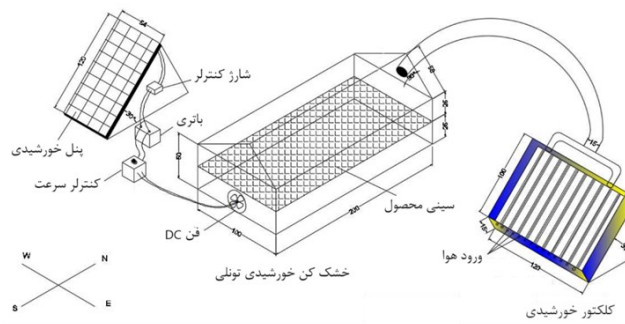


شکل 12 خشک‌کن خورشیدی فعال با سیال واسط آب و مواد تغییر فاز دهنده [32]

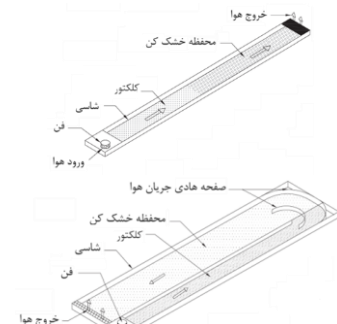
2-9- خشک‌کن‌های خورشیدی فعال مختلط



(ج)



(ب)



(الف)

شکل 13 خشک‌کن خورشیدی فعال مختلط، (الف) انواع سری و موازی [33] (ب) نوع تونلی [34] (ج) نوع کابینتی [37]

3- جمع‌بندی و پیشنهادات

استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی خصوصاً نوع مختلط روشی بسیار مناسب در نواحی گرمسیری کشور مانند استان خوزستان است. برای ساعاتی از شبانه روز که تابش آفتاب افت می‌کند، می‌توان با ذخیره انرژی خورشیدی در باتری به کمک پنل‌های خورشیدی از آن برای تامین انرژی خشک‌کن استفاده نمود. تحقیقات زیادی درباره طراحی و ساخت و بهینه سازی خشک‌کن‌های خورشیدی همه کاره محصولات کشاورزی توسط محققین در حال انجام است و باید ادامه یابد. با توجه به پژوهش‌های گسترده در زمینه خشک‌کن‌های خورشیدی، توسعه انواع جدید و بهینه‌سازی انواع موجود با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته مهندسی همچون شبکه‌های عصبی مصنوعی¹ [36] و دینامیک سیالات محاسباتی² [38]، با سرعت در حال انجام است و در آینده شاهد ارائه انواع هوشمند خشک‌کن‌های خورشیدی خواهیم بود. فناوری‌های مربوط به انرژی خورشید اندکی گران قیمت هستند و هزینه اولیه راه اندازی تجهیزات انرژی خورشیدی تا اندازه‌ای بالاست. لذا لازم است که استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی توسط دولت و نهادهای مختلف حمایت شود.

تقدیر و تشکر

از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز بابت حمایت مالی از این پژوهش در قالب پژوهانه به شماره SCU.AA1400.225 تقدیر و تشکر می‌شود.

مراجع

- [9] M. Eslami, S. Rostami, B. Hosseinzadeh Samani, R. Ebrahimi and M. Kiani Deh Kiani, Design, manufacture and evaluation of green dryer combined solar-heat recovery of barberry product, *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, Vol. 11, No. 4, pp. 43-54, 2022. (in Persian)
- [10] R. Ebrahimi and A. Norouzi, Analysis of energy - exergy and indirect solar dryer designed for mint under the influence of various air mass flows, *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, Vol. 7, No. 2, pp. 1-10, 2018. (in Persian)
- [11] M. B. Heydari Varnamkhasti and H. Ghafouri Varzaneh, Simulation of airflow inside greenhouse solar dryers for Isfahan climate, *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, Vol. 11, No. 4, pp. 11-20, 2022. (in Persian)
- [12] A. Heydari Varnamkhasti and H. Ghafouri, Simulation of air flow in a greenhouse dryer equipped with a solar parabolic collector by computational fluid dynamics method, *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, Vol. 11, No. 2, pp. 95-107, 2022. (in Persian)
- [13] M. Motahayer Razdari, A. Arabhosseini and H. Samimi-Akhijahani, Evaluation of solar cabinet dryer equipped with heat exchanger and porous plate, *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 50, No. 2, pp. 305-318, 2019. (in Persian)
- [14] E. Askari Asli-Ardeh and N. Qeble, Investigating the performance of rice paddy solar dryer, *Proceedings of the 3rd International Conference on New Ideas in Agriculture, Environment, and Tourism*, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, 2016. (in Persian)
- [15] A. Dalvand, *Solar dryers for agricultural products*, B.Sc. project, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, 2013. (in Persian)
- [16] J. Habibi Asl and H. Kavooosi Balootaki, Technical evaluation and efficiency of two solar collector types for paddy drying in Khuzestan province, *Agricultural Mechanization and Systems Research*, Vol. 20, No. 72, pp. 91-108, 2019. (in Persian)
- [17] O. R. Roustapour, A. Afsari and Y. Jahangir, Influence of air flow recirculation on energy consumption and efficiency in a solar dryer, *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 46, No. 1, pp. 31-38, 2015. (in Persian)
- [18] M. Pourqasmi Ranjbar, H. Morteza pour, H. Maghsoudi and S. N. Alavi Naini, An investigation on pistachio drying in a solar dryer equipped with an air-to-air waste heat recovery system, *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 48, No. 1, pp. 19-28, 2017. (in Persian)
- [19] H. Bahmanpour, S. M. Sajadiye, M. J. Sheikhdavoodi and M. Zolfaghari, The effect of temperature and drying method on drying time and color quality of mint, *Journal of Agricultural Machinery*, Vol. 7, No. 2, pp. 415-426, 2017. (in Persian)
- [20] M. Moradi, J. Ghasemi and H. Azimi-Nejadian, Energy and exergy analysis of drying process of Lemon Verbena leaves in a solar dryer, *Journal of Agricultural Machinery*, Vol. 11, No. 2, pp. 423-433, 2021. (in Persian)
- [21] S. F. Mousavi, M. H. Abbaspour-Fard and M. Khojastehpour, The effect of fan speed control system on the inlet air temperature uniformity in a solar dryer, *Journal of Agricultural Machinery*, Vol. 5, No. 2, pp. 491-501, 2015. (in Persian)
- [22] M. Rekabi, M. H. Abbaspour Fard and H. Morteza pour, Energy consumption and pistachio drying time in a hybrid solar-infrared drier, *Agricultural Engineering*, Vol. 39, No. 2, pp. 17-32, 2017. (in Persian)
- [23] Z. Saeed, A. Heydari and A. Babapoor, A new look at energy management in dryers using phase change material nanocomposites, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 12, No. 1, pp. 157-165, 2025. (in Persian)
- [24] J. Jannatkah, H. Ghaebi and B. Najafi, Development and evaluation of a solar dryer augmented with Phase Change Materials (PCM), *Agricultural Mechanization and Systems Research*, Vol. 18, No. 68, pp. 89-106, 2017. (in Persian)
- [1] K. M. Sahay and K. K. Singh, *Unit operations of agricultural processing*, First Edition, Translated by H. Pourazrang and H. R. Ziaulhaq, pp. 30-32, Mashhad: Ferdowsi University of Mashhad press, 2008. (in Persian)
- [2] A. Chakraverty, A. S. Mujumdar and H. S. Ramaswamy, *Handbook of Postharvest Technology: Cereals, Fruits, Vegetables, Tea, and Spices*, First Edition, pp. 100-110, Boca Raton: CRC Press, 2003.
- [3] H. Abbasi and H. Shafiee Ghanavati, A comprehensive review on different kinds of solar dryers and their performance, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 6, No. 1, pp. 47-55, 2019. (in Persian)
- [4] J. Habibi Asl, L. Behbahani and A. Azizi, Evaluation and comparing of natural and forced solar dryer for mint drying in Khuzestan province, *Journal of Agricultural Machinery*, Vol. 7, No. 1, pp. 114-125, 2017. (in Persian)
- [5] J. R. Tasić, M. Gojak, N. Lj. Cupric and M. R. Božović, Active solar dryer for biological materials, *FME Transactions*, Vol. 46, No. 4, pp. 537-543, 2018.
- [6] C. Strumillo. and T. Kudra, *Drying, principals, applications, and design*, First Edition, Translated by H. Pahlavanzadeh, pp. 40-45, Tehran: Tarbiat Modares University press, 2019. (in Persian)
- [7] B. Krishna, A. K. Banik and A. Mani, *Solar drying of fruits and vegetables*, in: I. Chakraborty, P. K. Paul, A. Mani, A. K. Tiwary, K. Prasad (Eds.), *Trends & Prospects in Processing of Horticultural Crops*, pp. 13.1-13.50, New Delhi: Today and Tomorrow's Printers and Publishers, 2019.
- [8] M. Islam, Md I. Islam, M. Tusar and A. H. Limon, Effect of cover design on moisture removal rate of a cabinet type solar dryer for food drying application, *Energy Procedia*, Vol. 160, pp. 769-776, 2019.

² Computational fluid dynamics (CFD)

¹ Artificial neural network (ANN)

- [25] M. Leilayi, A. Arabhosseini, M. H. Kianmehr and H. Amiri, Investigating the crack level of paddy dried by rotary solar dryer, *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, Vol. 10, No. 1, pp. 37-45, 2021. (in Persian)
- [26] H. Bagheri, A. Arabhosseini and M. H. Kianmehr, Selection of a relevant mathematical model for drying of tomato slices using solar dryer, *Journal of Agricultural Machinery*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-10, 2012. (in Persian)
- [27] H. Bagheri, A. Arabhosseini and M. H. Kianmehr, Energy and exergy analyses of thin layer drying of tomato in a forced solar dryer, *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 46, No. 1, pp. 39-45, 2015. (in Persian)
- [28] M. Hedayat, H. Mortezapour, H. Maghsoudi and M. Shamsi, Performance investigation of a heat recovery assisted solar dryer for mint drying, *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 46, No. 4, pp. 379-388, 2015. (in Persian)
- [29] M. H. Aghkhani, M. H. Abbaspour-Fard, M. R. Bayati, H. Mortezapour, S. I. Saedi and A. Moghimi, Performance analysis of a solar dryer equipped with a recycling air system and desiccant chamber, *Journal of Agricultural Machinery*, Vol. 3, No. 2, pp. 92-103, 2013. (in Persian)
- [30] Sh. Soodmand Moghaddam, M. Sharifi, H. Zareiforoush and H. Mobli, Comparing the drying of lemon verbena in a continuous flow dryer equipped with a solar pre-heating system to the traditional drying, *Agricultural Engineering*, Vol. 42, No. 2, pp. 67-82, 2019. (in Persian)
- [31] M. Moravej, F. Ebrahimpour and Z. Ebrahimi, Experimental study of solar drying performance of vegetables with indirect nanofluid heating, *Tabriz University Mechanical Engineering*, Vol. 52, No. 4, pp. 255-262, 2022. (in Persian)
- [32] Z. Alimohammadi, H. Samimi-Akhijahani and P. Salami, Predicting the thermal changes of a fluid storage tank of a solar dryer using artificial neural network and computational fluid dynamics method, *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 51, No. 3, pp. 501-514, 2020. (in Persian)
- [33] R. Patil and R. Gawande, A review on solar tunnel greenhouse drying system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56, pp. 196-214, 2016.
- [34] M. A. Eltawil, M. M. Azam and A. O. Alghannam, Energy analysis of hybrid solar tunnel dryer with PV system and solar collector for drying mint (*Mentha Viridis*), *Journal of Cleaner Production*, Vol. 181, pp. 352-364, 2018.
- [35] A. O. Fagunwa, O. A. Koya and M. O. Faborode, Development of an intermittent solar dryer for cocoa beans, *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, Vol. XI, Manuscript number 1292, 2009.
- [36] M. Farhadi Afshar and N. Aminizade, Design and construction of tunnel-type mixed active solar dryer and its calculations and comparison with the traditional drying method, *Proceedings of the 7th specialized scientific conference on renewable, clean and efficient energies*, Iranian Broadcasting Conference Center, Tehran, Iran, 2014. (in Persian)
- [37] M. Razmipour, N. Alavi Naeini, H. Mortezapour and A. Ghazanfari Moghaddam, Performance evaluation of a solar dryer with finny, perforated absorber plate collector equipped with an air temperature control system for dill drying, *Journal of Agricultural Machinery*, Vol. 5, No. 1, pp. 134-142, 2015. (in Persian)
- [38] M. Motahayyer Razdari, A. Arabhosseini, H. Samimi Akhijahani and M. Khashehchi, Application of CFD in optimization of solar dryer absorber plate, *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 49, No 2, pp. 285-294, 2018. (in Persian)