



## نگاهی نو به مدیریت انرژی در خشک کن ها با استفاده از نانوکامپوزیت مواد تغییر فاز دهنده

زهرا سعید<sup>۱</sup>، امیر حیدری<sup>۲</sup>، عزیز باباپور<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشیار، مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- استاد، مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

\* اردبیل، ۱۷۹، [babapoor@uma.ac.ir](mailto:babapoor@uma.ac.ir)

### چکیده

در خشک کن های خورشیدی، انرژی حرارتی توسط تابش نامحدود خورشید تامین می شود. به همین دلیل فرآیند خشک کردن تا حد زیادی به شرایط مختلف آب و هوایی محلی بستگی دارد. انواع مختلفی از خشک کن های خورشیدی در نقاط مختلف جهان طراحی و توسعه یافته اند. در میان انواع خشک کن های خورشیدی، خشک کن خورشیدی غیرمستقیم مزیت بیشتری دارد. استراتژی تحقیق این پژوهش، به صورت مروری روایتی با جستجوی مقالات مرتبط در موتور جستجوگر گوگل اسکولار با استفاده از کلید واژه های انتقال حرارت، انرژی ذخیره گرمایی، مواد تغییر فاز دهنده، انرژی خورشیدی، خشک کن خورشیدی انجام شد. با توجه به نتایج مطالعه استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در خشک کن های خورشیدی غیرمستقیم کیفیت محصول خشک شده را در مدت زمان کوتاه تری فراهم می کند، به طوری که دمای هوای داخل محفظه حتی بعد از غروب آفتاب ۴ تا ۲۰ درجه سانتیگراد بالاتر از دمای محیط است. همچنین تلفات پس از برداشت محصولات کشاورزی در مناطق روستایی کشورهای در حال توسعه را می تواند کاهش دهد. این کار به درک فرآیند خشک کردن، انواع مختلف خشک کن ها و عملکرد آن ها و مدیریت انرژی در خشک کن ها با استفاده از نانوکامپوزیت مواد تغییر فاز دهنده کمک می کند. بنابراین نتایج به دست آمده نشان دهنده تاثیر مثبت این مواد بر جلوگیری از اتلاف انرژی، کاهش هزینه و حفظ مواد مغذی در محصول خشک شده است.

کلیدواژه ها: انتقال حرارت، انرژی ذخیره گرمایی، مواد تغییر فاز دهنده، انرژی خورشیدی، خشک کن خورشیدی

## A new look at energy management in dryers using phase change material nanocomposites

Zahra Saeed<sup>1</sup>, Amir Heydari<sup>2</sup>, Aziz Babapoor<sup>3\*</sup>

1-Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Associate Professor, Department of Chemical Engineering, University of Mohagege Ardabili, Ardabil, Iran

3- Professor, Department of Chemical Engineering, University of Mohagege Ardabili, Ardabil, Iran

\* P.O.B. 179 Ardabil, Iran, [babapoor@uma.ac.ir](mailto:babapoor@uma.ac.ir)

Received: 06 November 2023 Accepted: 09 July 2024

### Abstract

In solar dryers, thermal energy is supplied by the unlimited radiation of the sun. For this reason, the drying process is highly dependent on different local weather conditions. Different types of solar dryers have been designed and developed in different parts of the world. Among the types of solar dryers, the indirect solar dryer has more advantages. The research strategy of this study was conducted in the form of narrative review by searching for related articles in Google Scholar search engine using the keywords heat transfer, heat storage energy, phase change materials, solar energy, solar dryer. According to the results of the study, the use of phase change materials in indirect solar dryers provides the quality of dried product in a shorter period of time, so that the air temperature inside the chamber is 4 to 20 degrees Celsius higher than the ambient temperature even after sunset. It can also reduce post-harvest losses of agricultural products in rural areas of developing countries. This work helps to understand the drying process, different types of dryers and their performance, and energy management in dryers using nanocomposites of phase change materials. Therefore, the results

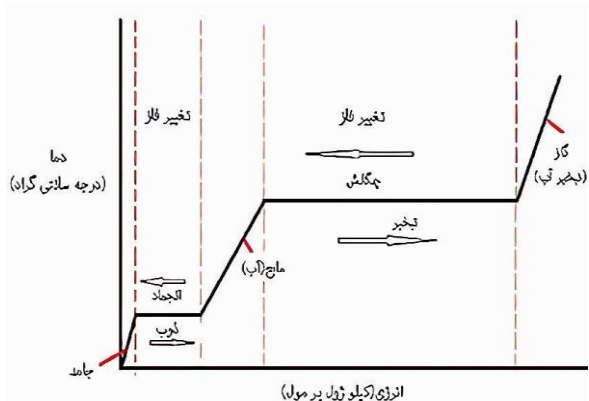


obtained show the positive effect of these materials in preventing energy losses, reducing costs and preserving nutrients in the dried product.

**Keywords:** Heat Transfer, Thermal Energy Storage, Phase Change Material, Solar Energy, Solar Dryer

#### ۱- مقدمه

وابستگی جامعه به انرژی در چند دهه اخیر به طور قابل توجهی افزایش یافته است. مشکلات زیست محیطی و بحران انرژی دو موضوع مهم جهانی است. افزایش مداوم سطح مصرف انرژی، افزایش قیمت سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای، باعث گرم شدن کره زمین شده است [۱]. انرژی خورشیدی از آنجایی که بیشترین پتانسیل انرژی را در میان منابع تجدیدپذیر دارد و به دلیل فراوان بودن، پایان‌ناپذیری و غیرآلاینده بودن به سایر منابع انرژی ترجیح داده می‌شود [۲]. خشک کردن در معرض نور خورشید منجر به حمله پرنده‌گان و حشرات می‌شود. علاوه بر آن قرار گرفتن مستقیم در معرض نور خورشید و اشعه ماوراء بنفش منجر به کاهش شدید سطح مغذی در محصول خشک می‌شود [۳]. بر اساس آمارهای موجود در ایران به طور متوسط ۳۵ درصد از محصولات کشاورزی تبدیل به زباله در فرآیند تولید تا مصرف که می‌تواند تغذیه ۱۵ تا ۲۰ میلیون جمعیت را فراهم کنند. علی‌رغم این کاستی‌ها، مزایای اصلی خشک کردن به روش سنتی هزینه‌های سرمایه و عملیات پایین و این واقعیت که تخصص کمی مورد نیاز است. استفاده از فن‌آوری و روش‌های نوین تولید در فرآیندهای خشک کردن به منظور دستیابی به محصولات خشک بهداشتی و با کیفیت الزامی است، از این رو خشک‌کن خورشیدی مختلف توسعه یافته‌اند که در آن محصولات در محفظه خشک‌کن نگهداری می‌شوند [۴]. یکی از بزرگترین مشکلات در خشک‌کن خورشیدی این است که در دسترس بودن انرژی خورشیدی اغلب متناوب، متغیر و غیرقابل پیش‌بینی است از این رو فرآیند آب‌گیری در شب یا تحت تابش کم قطع می‌شود و در نتیجه محصول خشک شده کیفیت پایینی دارد [۵، ۶]. اینجا هست که ذخیره انرژی حرارتی از اهمیت بالایی برخوردار است، که می‌توان انرژی حرارتی مازاد تولید شده در ساعات آفتابی را با استفاده از یک رسانه ذخیره انرژی ذخیره کرد. برای ذخیره انرژی می‌توان از سیستم‌هایی مانند باتری یا مواد تغییرفازدهنده<sup>۱</sup> استفاده کرد [۷، ۸]. از آنجایی که ظرفیت ذخیره انرژی باتری‌ها بسیار محدود است، محققان مواد تغییرفازدهنده‌ها را به عنوان جایگزین انتخاب می‌کنند. ذخیره انرژی گرمایی در این مواد، در طول فرآیند تغییر فاز اتفاق می‌افتد که در شکل ۱ به آن اشاره شده است [۹].

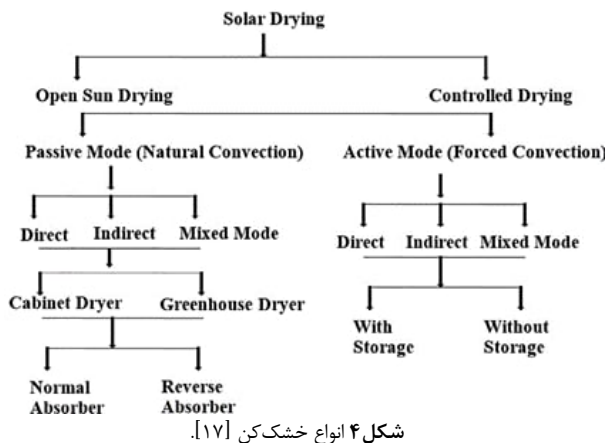


شکل ۱ نمودار فرآیند تغییر دما [۹].

بر اساس تغییر فاز، مواد تغییرفازدهنده را می‌توان به سه نوع مختلف طبقه‌بندی کرد: جامد-جامد، جامد-مایع و مایع-گاز، که در شکل ۲ نشان داده شده است. از بین این سه نوع، مواد تغییرفازدهنده‌های جامد-مایع برای ذخیره انرژی حرارتی مناسب هستند [۱۰].  
 ذخیره انرژی حرارتی<sup>۲</sup> را می‌توان به سه گروه طبقه‌بندی کرد: محسوس<sup>۳</sup>، نهان<sup>۴</sup> و ذخیره حرارت شیمیایی. که در شکل ۲ نشان داده شده است. ذخیره انرژی گرمایی به صورت محسوس به این صورت که انرژی گرمایی با افزایش دمای جسم جامد یا مایع در آن ذخیره می‌شود ولی در ذخیره انرژی گرمایی در حالت نهان انرژی گرمایی توسط جسم به هنگام تغییر فاز صورت می‌گیرد. تبدیل انرژی حرارتی در سه مرحله شارژ، ذخیره و تخلیه انجام می‌شود [۱۱].  
 خشک‌کن خورشیدی با سیستم ذخیره انرژی حرارتی به افزایش عملکرد خشک‌کن‌ها، کاهش زمان خشک کردن، به حداقل رساندن نیروی انسانی مورد نیاز و افزایش راندمان کلی خشک‌کن سیستم کمک می‌کند [۱۳]. انواع مواد تغییرفازدهنده در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۴].

3. Sensible Heat Storage  
4. Latent Heat Storage

1. Phase Change Material  
2. Thermal Energy Storage

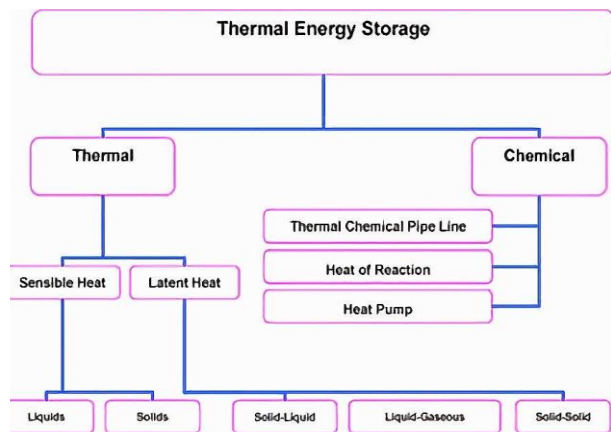


شکل ۴ انواع خشک کن [۱۷].

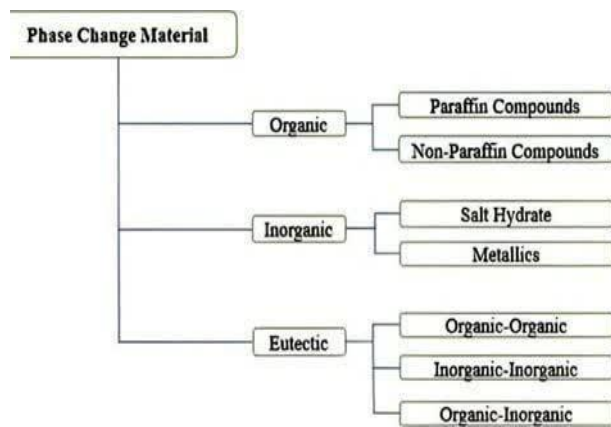
سیستم خشک کن‌های خورشیدی نیز ممکن است با توجه به حالت جریان هوا (طبیعی یا اجباری) به خشک کن‌های غیرفعال و فعال تقسیم شوند. در خشک کن‌های خورشیدی غیرفعال یا جابجایی طبیعی، جریان هوا از طریق خشک کن معمولاً توسط همرفت طبیعی یا نیروی شناوری به جای یک فن یا یک دمنده القا می‌شود که آن‌ها، را در مناطق دور افتاده با کمبود برق قابل استفاده می‌کند. با این حال، مسائلی مانند طولانی شدن زمان خشک شدن و دسترس نبودن دائمی انرژی خورشیدی کاربرد عملی آن‌ها را محدود می‌کند و راندمان خشک کردن آن‌ها بین ۲۰ تا ۴۰ درصد متفاوت است. هنگامی که گردش هوای گرم به طور مصنوعی با استفاده از فن یا پمپ انجام شود، خشک کن خورشیدی فعال شناخته می‌شوند. خشک کن‌های خورشیدی حالت غیرمستقیم توسط جابجایی اجباری هدایت می‌شوند [۲۰، ۱۶]. زمان خشک کردن مورد نیاز برای محصولات کشاورزی با جابجایی اجباری کمتر است اما مصرف انرژی و هزینه عملیاتی بیشتر می‌باشد [۲۱].

### ۲-۱- خشک کن‌های خورشیدی مستقیم

در خشک کن‌های خورشیدی مستقیم (کابینتی)، مواد خشک کن مستقیماً توسط تابش خورشید گرم می‌شوند و در این فرآیند دمای داخل محفظه بالاتر می‌رود [۱۵]. اندازه خشک کن‌های کابینتی کوچک است و کاربرد محدودی دارند [۲۲]. در نتیجه قرار گرفتن مستقیم محصولات غذایی در معرض تابش خورشید، رنگ محصولات خشک کمرنگ شده و خواص اصلی محصولات خشک از بین می‌رود. شکل ۵ عملکرد خشک کن‌های خورشیدی مستقیم را نشان می‌دهد [۱۷].



شکل ۲ طبقه‌بندی ذخیره انرژی حرارتی [۱۱].



شکل ۳ طبقه‌بندی مواد تغییر فاز دهنده [۱۴].

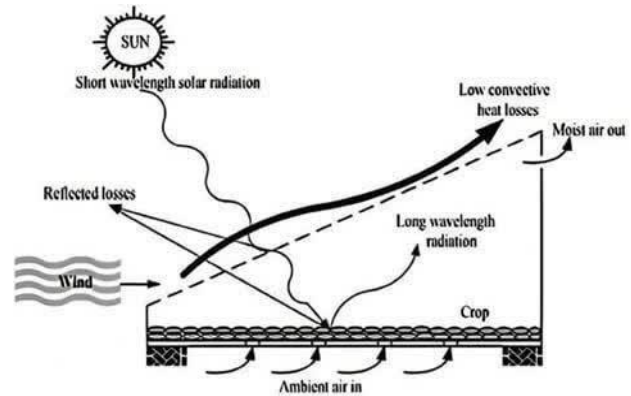
### ۲-۲- انواع خشک کن خورشیدی

خشک کن‌های خورشیدی جایگزین روش‌های سنتی خشک کردن است. خشک کن‌های خورشیدی بسته به نوع گرمایش یا نحوه کارکرد به چند دسته تقسیم بندی می‌شوند: خشک کن‌های خورشیدی مستقیم<sup>۱</sup>، خشک کن‌های خورشیدی غیرمستقیم<sup>۲</sup>، خشک کن‌های خورشیدی ترکیبی یا مختلط<sup>۳</sup> [۱۵، ۱۶] که شکل ۳ طبقه‌بندی خشک کن‌ها را نشان می‌دهد [۱۷]. مزایای خشک کن‌های خورشیدی نسبت به کوره‌ها و خشک کن‌های سنتی بسیار فراتر از اثرات زیست محیطی است. استفاده از خشک کن‌های خورشیدی می‌تواند هزینه‌های خشک کردن کلی را تا ۲۷-۸۰٪ کاهش دهد، این خشک کن‌ها روش‌های علمی و بهتری هستند که تضمین می‌کنند کیفیت محصولات خشک با استانداردهای بین‌المللی خشک کردن مطابقت دارند [۱۸، ۱۹].

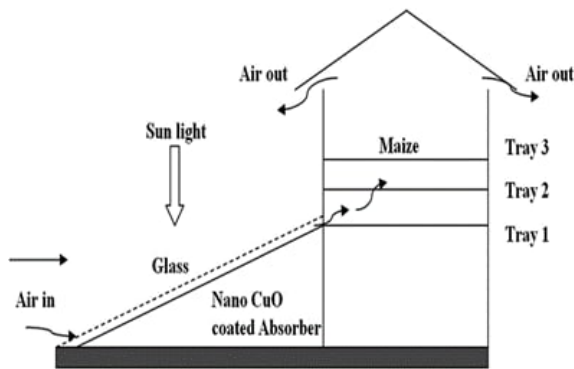
3. Mixed-Mode Solar Dryer

1. Direct Solar Dryer  
2. Indirect Solar Dryer

این نوع خشک‌کن خورشیدی ادغام خشک‌کن‌های خورشیدی غیرمستقیم و مستقیم است موادی که قرار است خشک شوند هم توسط تابش خورشیدی و هم هوای گرمی که از بخاری هوای خورشیدی می‌آید، گرم می‌شوند. دارای مزایای هر دو نوع خشک‌کن مستقیم و غیرمستقیم است. سرعت خشک کردن مواد غذایی بیشتر از سایر خشک‌کن‌ها است، اما کیفیت محصول به خوبی خشک‌کن‌های خورشیدی غیرمستقیم نیست [۲۴]. شماتیک سیستم حالت مختلط توسعه یافته در شکل ۷ نشان داده شده است. سیستمی که ساخته شده است دارای یک کلکتور خورشیدی نوع صفحه مسطح، محفظه خشک‌کن و یک صفحه جاذب است. یک موتور تک فاز ۶/۱ اسب بخار به یک دمنده گریز از مرکز برای تامین هوا به داخل خشک‌کن خورشیدی متصل شده است [۲۵].



شکل ۵. عملکرد خشک‌کن خورشیدی [۱۷].



شکل ۷. عملکرد خشک‌کن مختلط [۲۵].

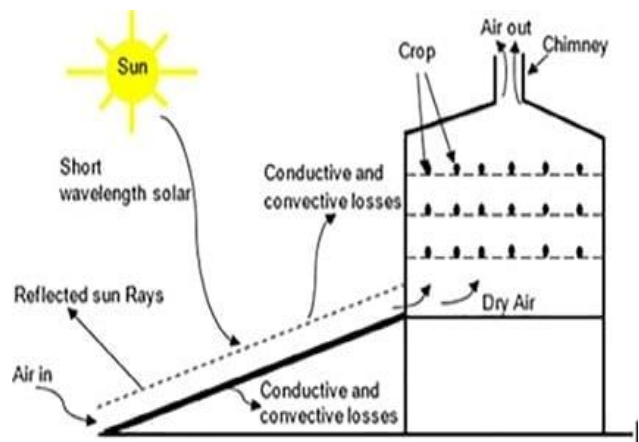
### ۲- خشک‌کن‌های خورشیدی

استفاده از مواد تغییرفازدهنده در خشک‌کن‌های خورشیدی، بازده حرارتی خشک‌کن را افزایش می‌دهد. از آنجایی که نوع مستقیم خشک‌کن خورشیدی فقط می‌تواند با تابش مستقیم خورشید کار کند. بنابراین، مواد تغییرفازدهنده را نمی‌توان با این نوع خشک‌کن خورشیدی تعبیه کرد. از این رو، نوع غیر-مستقیم خشک‌کن‌های خورشیدی را می‌توان برای تحقق اهداف ترجیح داد [۱۷]. مهاجر و همکارانش یک کلکتور خورشیدی دو منظوره را بررسی کردند که از آب به عنوان ذخیره حرارت معقول برای اهداف خشک کردن استفاده کرده بودند. آزمایش‌ها نشان داد که این کلکتور را می‌تواند همزمان به عنوان یک سیستم خشک‌کن و هم برای تامین آب گرم مصرفی استفاده شود [۲۶].

چاکماک و همکارش برای ارزیابی تجربی سینتیک خشک کردن انگورهای دانه‌دار، نوع جدیدی از خشک‌کن را ارائه کردند. این سیستم خشک‌کن توسعه یافته، شامل یک کلکتور هوای خورشیدی با سطح منبسط، یک کلکتور هوای خورشیدی با مواد تغییرفازدهنده و اتاق خشک‌کن با عنصر چرخشی است. از کلکتور هوای خورشیدی با سطح منبسط شده برای دستیابی به انتقال حرارت بالا و اثر تلاطم استفاده شد، در حالی که از کلکتور هوای خورشیدی با مواد تغییرفازدهنده برای انجام فرآیند خشک کردن حتی پس از غروب خورشید استفاده شده است. از سوی دیگر، عناصر چرخشی قرار گرفته‌اند تا اثر چرخشی را به جریان هوا در اتاق خشک‌کن بدهند. این مزایا سیستم جدید را به یک خشک‌کن امیدوارکننده که در آن مقدار رطوبت و زمان خشک شدن کمتر است تبدیل می‌کند. آزمایش‌های خشک کردن به طور همزمان هم در شرایط طبیعی و هم توسط خشک‌کن با جریان چرخشی و بدون جریان چرخشی در سه سرعت مختلف هوا ۰/۵، ۱، ۱/۵ متر بر ثانیه انجام شده است، که کمترین

### ۲-۲- خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم

خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم که از دو جزء اصلی تشکیل شده است. کابینت خشک‌کن که در آن مواد روی سینی‌ها نگهداری می‌شوند و مجموعه کلکتور خورشیدی که از یک صفحه شیشه‌ای و صفحه جاذب تشکیل شده است. سپس هوای گرم به جریان می‌افتد تا روی مواد غذایی که قرار است خشک شود، جریان یابد. بنابراین غذا گرم می‌شود و رطوبت آن از بین می‌رود. عملکرد این نوع خشک‌کن در شکل ۶ نشان داده شده است [۲۳].



شکل ۶. عملکرد خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم [۲۳].

### ۲-۲-۱- مزایا و معایب خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم

از مزایای خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم این است که:

- فرآیند خشک کردن قابل کنترل است و محصول خشک شده کیفیت بهتری دارد.
- رنگ محصول حفظ می‌شود، زیرا در معرض اشعه ماوراء بنفش قرار نمی‌گیرد.
- راندمان بیشتر نسبت به خشک‌کن خورشیدی مستقیم
- عملکرد بهتر نسبت به انواع خشک‌کن‌های معمولی

هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و انرژی بالا را می‌توان از معایب این خشک‌کن‌ها نام برد [۲۱، ۱۷].

### ۲-۳- خشک‌کن خورشیدی حالت مختلط

بر اساس موقعیت مواد تغییرفازدهنده، راندمان حرارتی کلکتور صفحه تخت حدود  $0.2/5 - 0.13/1$ ٪ افزایش یافت. ملاحظات کیفی و اقتصادی حاکی از آن است که استفاده از مواد تغییرفازدهنده در بخش انتهایی کلکتور می‌تواند یک روش خشک کردن مناسب باشد [۳۲].

سوامی<sup>۳</sup> و همکارانش به بررسی یک خشک‌کن هوای خورشیدی برای خشک کردن ماهی با کمک ماده تغییرفازدهنده پرداختند. در این بررسی عامل دیگر استفاده از مواد تغییرفازدهنده کنترل دمای داخل خشک‌کن است زیرا ماهی نمی‌تواند دمای بیش از ۶۲ درجه سانتی‌گراد را تحمل کند. از این رو، بررسی تجربی برای ارزیابی اثر دو ماده تغییرفازدهنده با نقاط ذوب متفاوت انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری و تجربی نشان داد که سرعت خشک شدن ماهی، افزایش می‌یابد که در نهایت منجر به کاهش دوره خشک شدن ماهی می‌شود. در واقع دوره خشک شدن ماهی تقریباً ۷۰ درصد کاهش می‌یابد. تقریباً ۴۰ درصد گرما از کل گرمای موجود استفاده می‌شود و ۶۰ درصد گرما بدون استفاده تمام می‌شود. مواد تغییرفازدهنده اول (موم پارافین C-۲۳) در مقایسه با مواد تغییرفازدهنده دوم (موم پارافین C-۳۱) به دلیل دمای نقطه ذوب مؤثرتر و مفیدتر بود، از این رو برای محدوده دمای عملیاتی خشک کردن ماهی مناسب است [۳۳].

اشرابی اناننو<sup>۴</sup> و همکارانش یک خشک‌کن خورشیدی صفحه تخت زمین گرمایی هیبریدی با مواد تغییرفازدهنده را بررسی کردند. نتیجه گرفتند که سیستم هیبریدی کارایی بسیار بالاتری نسبت به سیستم‌های مستقل دارد. سیستم هیبریدی می‌تواند را تا ۲۰ ساعت در روز با ۲۰/۵ درصد راندمان بیشتر نسبت به کلکتور صفحه تخت خورشیدی معمولی و ۶ درصد راندمان بالاتر نسبت به هیتر<sup>۵</sup> خورشیدی موجدار V شکل، کار کند و غذا را خشک کند. با وجود راندمان و بهره‌وری برتر، اجرای چنین سیستمی به دلیل هزینه‌های اولیه بالا و دوره نسبتاً طولانی بازپرداخت بیش از هفت سال با مانع مواجه خواهد شد [۳۴].

بهاری و همکارانش از سه نوع نانوکامپوزیت  $Al_2O_3$ -PW برای ذخیره انرژی حرارتی خورشید در خشک‌کن‌های خورشیدی استفاده کردند. نانوذرات  $Al_2O_3$  در سه سطح ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی را با موم پارافین ترکیب کردند و در لوله‌های فولادی تزریق و در واحد ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که نانوذرات  $Al_2O_3$  به‌طور کامل در پارافین مایع پراکنده شدند. با افزایش مقدار نانوذرات  $Al_2O_3$  در نانوکامپوزیت‌ها، دمای ذوب کاهش و دمای تخریب افزایش یافت. همچنین با افزودن نانوذرات به پارافین، خواص حرارتی پارافین بهبود یافته و پتانسیل ذخیره انرژی حرارتی آن افزایش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش مقدار  $Al_2O_3$  در نانوکامپوزیت، زمان لازم برای رسیدن به رطوبت متعادل در محصولات کشاورزی کاهش می‌یابد. که از نظر اقتصادی، استفاده از نانوکامپوزیت‌های با ۱ درصد وزنی نانوذرات  $Al_2O_3$  توصیه می‌شود. شکل ۸ شماتیک یک خشک‌کن خورشیدی را به همراه یک سیستم ذخیره گرما نشان می‌دهد که در این آزمایش از یک کلکتور صفحه تخت در خشک‌کن خورشیدی استفاده شده است. جنس محفظه خشک‌کن از چوب است. سینی خشک‌کن در بالای مخزن ذخیره به همراه یک ترازو دقیق قرار دارد. برای حرکت هوا از یک فن دمنده و برای اندازه‌گیری دبی هوای خروجی از خشک‌کن، از دبی‌سنج تیغه‌ای استفاده شده است. در داخل محفظه خشک‌کن، ۳۵ لوله

زمان خشک‌شدن با سرعت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه (با چرخش) به دست آمد. مشخص شده است که با افزایش سرعت هوای خشک کردن، زمان خشک کردن کوتاه می‌شود. مطالعه آن‌ها رابطه معکوس بین سرعت هوا و دوره زمانی خشک شدن را نشان داد [۲۷].

شالابی و همکارانش طراحی جدید از خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم با استفاده از مواد تغییرفازدهنده به عنوان محیط ذخیره انرژی به طور تجربی مورد بررسی قرار دادند. این سیستم از دو بخاری خورشیدی یکسان، محفظه خشک‌کن، واحدهای ذخیره‌سازی مواد تغییرفازدهنده و یک دمنده تشکیل شده است. عملکرد خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم در دو حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت. خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم با مواد تغییرفازدهنده و بدون مواد تغییرفازدهنده در طیف وسیعی از نرخ جریان جرمی (۰/۰۶۶۴-۰/۲۱۸۲ کیلوگرم بر ثانیه) آزمایش شد. مشخص شد که پس از استفاده از مواد تغییرفازدهنده، دمای هوای خشک‌کن پس از ساعت ۲:۰۰ بعد از ظهر، ۳/۵-۶/۵ درجه سانتیگراد بیشتر از حالت دوم که فاقد مواد تغییرفازدهنده بود، است و دمای خشک‌کن را در مقدار تقریباً ثابت برای ۷ ساعت متوالی در روز حفظ می‌کند [۲۸]. جین و همکارش برای مطالعه اثر مواد تغییرفازدهنده بر عملکرد خشک کردن از یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم استفاده کردند. آزمایشات در طول شب، عملکرد خوب سیستم را تایید کرد و راندمان حرارتی خشک‌کن ۲۸/۲ درصد بود و در ماه ژوئن دمای هوای اتاق خشک‌کن بعد از ساعات آفتابی تا نیمه شب ۶ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دمای محیط مشاهده شد. عملکرد اقتصادی خشک‌کن با بازده سرمایه و دوره بازپرداخت ساده به ترتیب ۰/۶۵ و ۱/۵ سال بر روی هزینه بهینه مواد اولیه و قیمت فروش محصول تحلیل شد [۲۹].

ریس و همکارانش در یک خشک‌کن خورشیدی هیبریدی با استفاده از موم پارافین به عنوان ماده تغییرفازدهنده، قارچ‌ها را آب‌گیری کردند. قارچ‌ها را در برش‌های ۸ تا ۱۲ میلی‌متری برش دادند، ضخامت برش و سطح بازیافت هوا از نظر آماری تأثیر معنی‌داری بر رطوبت نهایی داشتند. بر این اساس، استفاده از سطح پایین بازیافت هوا و برش‌های نازک توصیه می‌شود. و همچنین ترکیب مواد تغییرفازدهنده کمک قابل توجهی به بهبود بازده حرارتی سیستم کرد. بازده حرارتی را می‌توان با افزایش جرم موم پارافین در انباشته‌کننده افزایش داد [۳۰]. ارون و همکارانش از خشک‌کن خورشیدی مختلط<sup>۱</sup> و موم پارافین ماکروکپسوله شده به عنوان ماده ذخیره انرژی برای خشک کردن تکه‌های موز استفاده کردند. نتایج نشان داد که پوسته‌های موز خشک شده رنگ، بافت و عطر طبیعی خوبی در مقایسه با پوسته‌های خشک شده در آفتاب باز دارند. علاوه بر این، از ارزیابی اقتصادی به این نتیجه رسیدند که هزینه خشک کردن نیز کاهش یافته است و به ازای هر کیلوگرم محصول خشک ۰/۳۵ دلار است [۳۱].

ابراهیمی و همکارانش بهبود راندمان حرارتی یک خشک‌کن خورشیدی ادغام شده با کلکتور صفحه تخت<sup>۲</sup> و مواد تغییرفازدهنده برای چهار موقعیت مختلف را بررسی کردند. نتیجه گرفتند که استفاده از مواد تغییرفازدهنده منجر به افزایش سرعت خشک شدن و کاهش زمان خشک شدن برش‌های گوجه-فرنگی در حدود ۶/۲۵ تا ۲۱/۸۷ درصد می‌شود. همچنین افزودن مواد تغییرفازدهنده در کلکتور اثرات نامطلوبی بر کیفیت گوجه‌فرنگی خشک ندارد.

4. Ashrabi Ananno  
2. Heater

1. Mixed Mode Solar Cabinet Dryer  
2. Flat Plate Collector  
3. Virbhadr M. Swami

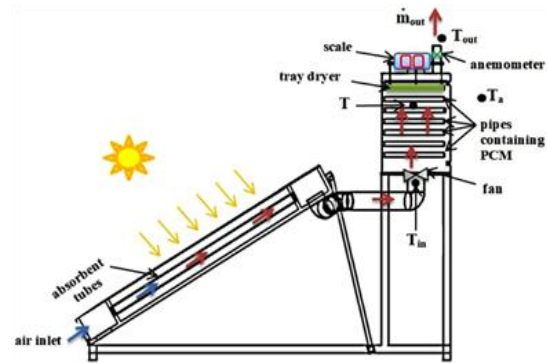
خورشیدی همرفت اجباری غیرمستقیم را با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده طراحی، و به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. این خشک کن از یک پنل هوای خورشیدی برای گرم کردن مستقیم عامل خشک کننده، ذخیره کننده هوای خورشیدی با مواد تغییر فاز دهنده و از یک محفظه خشک کن تشکیل شده است. در مورد خشک کن خورشیدی غیرمستقیم بدون مواد تغییر فاز دهنده نتایج نشان می دهد که در طول شب، شرایط اقلیمی (رطوبت و دما نسبی) در محفظه خشک کن به شرایط محیط می رسد، در حالی که پس از استفاده از مواد تغییر فاز دهنده دمای محفظه خشک کن در تمام طول شب به میزان ۱۶-۴ درجه سانتی گراد بالاتر از دمای محیط است. می توان نتیجه گرفت که خشک کن خورشیدی غیرمستقیم با موم پارافین به عنوان ماده ذخیره انرژی یک طرح موثر برای ایجاد شرایط مطلوب تر در مقایسه با خشک کن خورشیدی غیرمستقیم بدون ذخیره انرژی است. شکل ۹ یک نوع خشک کن توسعه یافته در این مطالعه را نشان می دهد [۳۹].



شکل ۹ خشک کن غیرمستقیم خورشیدی: (۱) ذخیره کننده انرژی خورشیدی، (۲) پنل هوای خورشیدی، (۳) اتاق خشک کن [۳۹].

اتالای و همکارش یک خشک کن خورشیدی در مقیاس بزرگ با محیط ذخیره انرژی مواد تغییر فاز دهنده را از نظر عملکرد، پایداری اقتصادی و زیست محیطی مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که سیستم خشک کن توسعه یافته از نظر بازده انرژی و انرژی تأثیر بالایی دارد. و خشک کردن محصول در مقادیر مختلف تأثیری بر بازده انرژی و انرژی ندارد. هم چنین اجزای سیستم به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان داد که فن هایی که منجر به بیشترین مصرف انرژی در خشک کن خورشیدی می شوند، بیشترین هزینه تخریب انرژی را با ۰/۲۲۸۶ دلار در ساعت و حداقل راندمان انرژی را با ۵۵/۲۸ درصد دارند. بنابراین فن ها مهمترین مؤلفه های هستند که باید توسعه داده شوند. ارزیابی های انجام شده نشان داد که سیستم خشک کن در مقیاس بزرگ توسعه یافته با توجه به عملکرد، تجزیه و تحلیل اثرات اقتصادی و محیطی دارای راندمان بالایی است [۴۰]. در مطالعه ای دیگر اتالای به ارزیابی انرژی و تجزیه و تحلیل اقتصادی دو سیستم ذخیره انرژی مختلف برای فرآیند خشک کردن به کمک انرژی خورشیدی پرداخت. این سیستم ها به ترتیب سیستم های ذخیره سازی انرژی حرارتی بستر بسته بندی شده<sup>۲</sup> و مواد تغییر فاز دهنده بودند. سنگ ریزه به عنوان ماده ذخیره انرژی در سیستم ذخیره سازی انرژی حرارتی بستر بسته بندی شده مورد استفاده قرار گرفت، در حالی که موم پارافین با دمای ذوب ۵۵-۶۰ درجه سانتی گراد استفاده شد. با انرژی ذخیره شده در طول دوره تخلیه، برش های

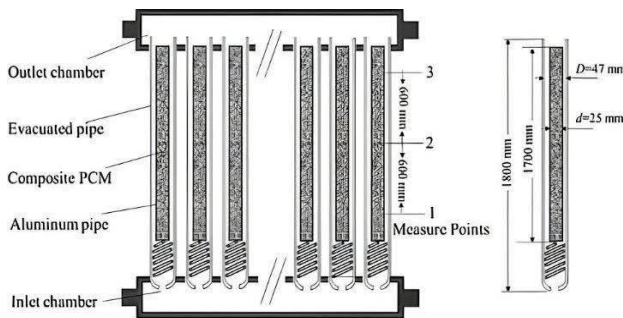
فولادی ضد زنگ برای ذخیره گرما قرار داده شده است. لوله های ذخیره سازی مواد تغییر فاز دهنده به صورت مثلی در محفظه خشک کن نصب شده اند [۳۵].



شکل ۸ شماتیک یک خشک کن خورشیدی به همراه یک سیستم ذخیره گرما [۳۵].

رامیرز و همکارانش به تجزیه و تحلیل عملکرد یک خشک کن خورشیدی غیرمستقیم با ذخیره گرمای نهان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. مشخص شد که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در خشک کن خورشیدی غیرمستقیم باعث افزایش عملکرد حرارتی شبانه و افزایش سرعت عملیات خشک کردن می شود. از سوی دیگر، مقایسه ای بین دو کلکتور متناوب با و بدون مواد تغییر فاز دهنده، خشک کن خورشیدی غیرمستقیم با مواد تغییر فاز دهنده به طور مداوم، و خشک کن خورشیدی غیرمستقیم بدون مواد تغییر فاز دهنده که به طور مداوم کار می کنند، انجام دادند. نتایج نشان داد که استفاده از دو کلکتور متناوب در مقایسه استفاده از یک کلکتور با مواد تغییر فاز دهنده که به طور مداوم کار می کند، رفتار تخلیه مشابهی دارد. با این وجود، استفاده از دو کلکتور متناوب باعث افزایش سطح انتقال حرارت می شود از این رو تلفات حرارتی بیشتر و راندمان حرارتی کمتر می شود [۳۶]. چاتووف و همکارانش یک خشک کن خورشیدی غیرمستقیم ادغام شده با یک سیستم ذخیره حرارت (به شکل لوله های مسی پر شده با مواد تغییر فاز دهنده) که در محفظه جانبی قرار داده شده است، در مراکش مورد بررسی قرار دادند. اثر تعداد لایه های لوله مواد تغییر فاز دهنده بررسی شد و دو لایه لوله مواد تغییر فاز دهنده از نظر مقدار انرژی ذخیره شده عملکرد خوبی از خود نشان دادند. همچنین بررسی ها نشان داد که خشک کن خورشیدی با سیستم ذخیره گرما در شب نسبت به حالت بدون ذخیره سازی، راندمان را حدود ۳/۱۲ درصد افزایش می دهد. لوله های مواد تغییر فاز دهنده نه تنها از نظر توزیع دمای هوا کمک می کنند، بلکه از نظر توزیع سرعت هوا در داخل محفظه خشک کن با توزیع هوا یکنواخت هم کمک می کنند [۳۷].

الخدراوی<sup>۱</sup> و همکارانش به تحلیل تجربی عملکرد یک خشک کن خورشیدی همرفت اجباری گلخانه ای پرداختند. نتایج نشان داد که سرعت خشک شدن در خشک کن خورشیدی همرفت اجباری گلخانه ای می تواند بسیار بیشتر از خشک کردن خورشید در هوای آزاد باشد. سیستم خشک کن فعلی تقریباً زمان خشک شدن فلفل قرمز و انگور را به ترتیب ۷ و ۱۷ ساعت کوتاه می کند [۳۸]. الخدراوی و همکارانش در مطالعه ای دیگر یک خشک کن



شکل ۱۰ شماتیک تغییرفاز کلکتور/واحد ذخیره هوای خورشیدی ترکیب شده با مواد تغییرفازدهنده [۴۲].

اساککیموتو<sup>۱</sup> برای حذف نوسانات دمای هوای گرم، کلکتورهای خورشیدی با واحد ذخیره حرارتی مبتنی بر ماده تغییرفازدهنده ادغام کرد. هدف از این مطالعه بررسی امکان سنجی استفاده از یک واحد ذخیره‌سازی گرمای نهان با HS 58، یک ماده تغییرفازدهنده مبتنی بر نمک معدنی، برای ذخیره انرژی اضافی خورشیدی است. ساعات تابش خورشید به صورت تجربی برای نرخ‌های جریان جرمی مختلف هوا مورد مطالعه قرار گرفته است. در دبی جرمی بالا، راندمان کلکتور بیشتر است. با سرعت جریان جرمی بالاتر انتخاب ماده تغییرفازدهنده با دمای تغییر فاز مناسب، از گرم شدن بیش از حد هوا در ساعات اوج تابش خورشید به دلیل جذب گرما توسط مواد تغییرفازدهنده جلوگیری می‌کند. این برای جلوگیری از فساد محصولات غذایی به دلیل گرم شدن بیش از حد مفید خواهد بود. با این حال مصرف انرژی توسط فن در نرخ جریان جرمی بالاتر به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. تامین جریان جرمی کمتر هوا در طول فرآیند تخلیه می‌تواند از حداکثر ظرفیت سیستم ذخیره‌سازی استفاده کند و پس از ساعات تابش خورشید به تامین گرمای یکنواخت برای مدت طولانی‌تری دست یابد [۴۳].

بهاردواج<sup>۳</sup> و همکارانش به بررسی تجربی یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم ادغام شده با مواد تغییرفازدهنده برای خشک کردن والریانا جاتامانسی<sup>۴</sup> (گیاه دارویی) پرداختند. از پارافین RT-42 به عنوان یک ماده تغییرفازدهنده در خشک‌کن استفاده شده است. تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که با استفاده از مواد تغییرفازدهنده، زمان خشک کردن در این مجموعه نسبت به خشک کردن با پمپ حرارتی و خشک کردن به روش سایه سنتی به ترتیب ۳۷/۵۰ و ۶۴/۲۹ درصد کاهش یافته است. استفاده از مواد تغییرفازدهنده با دمای کنترل شده و حرارت مداوم منجر به ساقه و ریشه خشک با کیفیت برتر از نظر رنگ، بافت، عطر و ترکیبات زیست‌پزشکی شد [۴۴]. در مطالعه‌ای دیگر بهار دواج و همکارانش به تحلیل تجربی از یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم برای خشک کردن فلفل‌ها پرداختند. ضایعات آهن به همراه شن روی صفحه جاذب نگهداری شد و روغن موتور که از طریق لوله مسی منتقل می‌شد، به عنوان محیط ذخیره گرمای محسوس در کلکتور هوای خورشیدی<sup>۵</sup> اعمال شد. موم پارافین به عنوان ماده تغییرفازدهنده در محفظه خشک‌کن استفاده شد. خشک‌کن خورشیدی همرفت اجباری<sup>۶</sup> ادغام شده با ذخیره گرمای محسوس و مواد تغییرفازدهنده (هردو) مورد بررسی قرار گرفت و با عملکرد خشک‌کن خورشیدی بدون استفاده از ذخیره انرژی حرارتی و خشک کردن طبیعی

لیمو به ضخامت متوسط ۵ میلی متر خشک شدند و فرآیند خشک کردن به طور متوسط ۶/۲۷ ساعت در سیستم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بستر بسته بندی شده و ۶/۲۳ ساعت در مواد تغییرفازدهنده به طول انجامید، و میزان رطوبت برش‌های لیمو از ۹۴/۸ درصد به ۱۰ درصد کاهش یافت. در نتیجه مطالعات تجربی، میانگین بازده انرژی برای سیستم ذخیره سازی انرژی حرارتی بستر بسته‌بندی شده و مواد تغییرفازدهنده به ترتیب ۶۸/۲٪ و ۶۸/۵۵٪ تشخیص داده شد. هنگامی که سیستم‌ها از نظر اقتصادی بررسی شدند، مشاهده شد که سیستم ذخیره سازی انرژی حرارتی بستر بسته‌بندی شده ۱۰/۴۷٪ هزینه سرمایه‌گذاری اولیه کمتری نسبت به مواد تغییرفازدهنده دارد. از این رو استفاده از سنگ‌ریزه به جای موم پارافین به عنوان ماده ذخیره‌ساز انرژی برای فرآیند خشک کردن ممکن است با توجه به عملکرد و هزینه مفیدتر باشد [۴۱].

ژانگ و همکاران یک کلکتور/واحد ذخیره هوای خورشیدی یکپارچه با مواد تغییرفازدهنده<sup>۱</sup> (کلکتور هوای خورشیدی یکپارچه شده با مواد تغییرفازدهنده) برای کاربرد دمای متوسط بررسی کردند. ماده تغییرفازدهنده مرکب از گرافیت منبسط شده در کسر جرمی ۳ درصد و اریتریتول به منظور بهبود هدایت حرارتی ماده تغییرفازدهنده تهیه شد. نتایج نشان داد که کلکتور/واحد ذخیره هوای خورشیدی یکپارچه با مواد تغییرفازدهنده می‌تواند استفاده از انرژی خورشیدی را برای نزدیک به دو ساعت در مقایسه با لوله‌های خورشیدی تخلیه‌شده سنتی طولانی‌تر کند. علاوه بر این، بهینه سازی نشان داد که دمای هوا با قطر لوله آلومینیومی کوچکتر به طور چشمگیری کاهش می‌یابد، و برای لوله آلومینیومی با قطر ۲۵، ۳۰، ۲۰ میلی‌متر در پایان شبیه‌سازی به ترتیب به ۸۵/۳، ۶۸/۱ و ۵۳/۲ درجه سانتی‌گراد است. پس مدت زمان فرآیند تخلیه را می‌توان با افزایش قطر لوله آلومینیومی افزایش داد و عملکرد بهینه را می‌توان با پر کردن ماده تغییرفازدهنده تا طول ۱۴۰۰ میلی‌متر در این بررسی به دست آورد [۴۲]. شماتیک کلکتور/واحد ذخیره هوای خورشیدی یکپارچه شده با ماده تغییرفازدهنده در شکل ۱۰ که از سه قسمت تشکیل شده است: یک محفظه ورودی، لوله خالی و یک محفظه خروجی. لوله‌های خالی شامل لوله‌های داخلی و خارجی هست که به صورت موازی چیده شده‌اند. لوله داخلی با یک ماده انتخابی برای جذب نور خورشید پوشیده شده است در حالی که لوله‌ی خارجی شفاف است. فضای بین لوله‌های داخلی و خارجی خلاء است که به جلوگیری از اتلاف گرما توسط همرفت و هدایت کمک می‌کند و در نتیجه راندمان تبدیل انرژی بالاتری را به دست می‌آورد. لوله آلومینیومی با قطر ۲۵ میلی‌متر با مواد تغییرفازدهنده کامپوزیت ۱/۵ کیلوگرمی پر شده و به صورت هم محور با لوله خارجی قرار گرفته است. در یک فرآیند شارژ حرارتی واقعی، هوا از طریق محفظه ورودی به داخل هر لوله جریان می‌یابد و گرما را از لوله‌های خالی جذب می‌کند و سپس از طریق محفظه خروجی به بیرون جریان می‌یابد. در حالی که در یک فرآیند تخلیه گرما، هوا گرما را از ماده تغییرفازدهنده کامپوزیت محصور شده در لوله‌های آلومینیومی جذب می‌کند [۴۲].

5. Valeriana Jatamansi  
5. Solar Heat Collector  
6. Force Convection Solar Dryer

1. Solar Air Collector/Storage Unit  
2. Esakkimuthu  
3. Bhardwaj

کردن با ذخیره گرمای محسوس و مواد تغییرفازدهنده (هر دو) در سیستم حفظ می‌شوند. خشک شدن در دمای بالاتر از مقدار مجاز و دوره خشک شدن طولانی‌تر به اجزای داخلی فلفل خشک آسیب رسانده و سطح کیفی را بدتر می‌کند. این با نتایج پژوهشگران مختلف مطابقت دارد که ادعا می‌کردند ساعت‌های خشک کردن طولانی‌تر، درجه حرارت بالا و رطوبت بیشتر باعث کاهش کیفیت محصول می‌شود [۴۵].

مقایسه شد. نتایج نشان داد که خشک‌کن خورشیدی همرفت اجباری با ذخیره گرمای محسوس و مواد تغییرفازدهنده (هر دو)، فلفل‌ها را در کوتاه‌ترین زمان خشک کرد و نرخ کم آبی بالاترین میزان را نشان می‌دهد. همچنین با استفاده از این سیستم رنگ، بافت و تندی فلفل‌های خشک شده از کیفیت بهتری برخوردار هستند [۴۵]. جدول ۱ نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل‌های کیفی را نشان می‌دهد که محتویات اجزای حیاتی به طور قابل توجهی در هنگام خشک

جدول ۱ تجزیه و تحلیل کیفی فلفل‌های خشک شده با استفاده از روش‌های مختلف خشک کردن [۴۵].

خشک کن خورشیدی همرفت اجباری		
با ذخیره حرارت محسوس و مواد تغییرفازدهنده (هر دو)	با ذخیره حرارت محسوس	بذخیره حرارت محسوس و
۰/۵۲	۰/۴۸	۰/۳۷
۲۱/۲۵	۱۸/۷۵	۱۴/۵۰
۴۹/۲۵	۴۷/۷۵	۴۲/۵۰
۰/۹۱۲	۰/۸۳۴	۰/۷۲۸
۳۴۱/۵	۳۲۸/۷	۲۹۸/۴
۱۲/۵۹	۱۱/۰۹	۸/۸۹
		

## ۵- مراجع

- [1] M. Mofijur, T. M. I. Mahlia, A. S. Silitonga, H. C. Ong, M. Silakhori, M. H. Hasan, N. Putra, S. M. Ashrafur Rahman Phase Change Materials (PCM) for Solar Energy Usages and Storage: An Overview, *Energies*, Vol. 12, No. 3167, 2019.
- [2] E. G. Barbosa, M. E. V. de Araujo, A. C. L. de Oliveira, M. A. Martins, Thermal energy storage systems applied to solar dryers: Classification, performance, and numerical modeling: An updated review, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol 45, pp. 102-986, 2023.
- [3] A. A. Mathew and V. Thangavel, A novel thermal energy storage integrated evacuated tube heat pipe solar dryer for agricultural products: Performance and economic evaluation, *Renewable Energy*, Vol. 179, pp. 1674-1693, 2021.
- [4] Sh. Shamekhi-Amiri, T. B. Gorji, M. Gorji-Bandpy, M. Jahanshahi, Drying behaviour of lemon balm leaves in an indirect double-pass packed bed forced convection solar dryer system. *Case Studies in Thermal Engineering*, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 12, pp. 677-686, 2018.
- [5] M. N. A. Hawlader, M. S. Uddin, M. M. Khin, Microencapsulated PCM thermal-energy storage system, *Applied Energy*, Vol. 74, No. 1-2, pp. 195-202, 2003.
- [6] D. K. Rabha and P. Muthukumar Performance studies on a forced convection solar dryer integrated with a paraffin wax-based latent heat storage system, *Solar Energy*, Vol. 149, pp. 214-226, 2017.
- [7] S. Devahastin and S. Pitaksuriyarat, Use of latent heat storage to conserve energy during drying and its effect on drying kinetics of a food product, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, No. 14-15, pp. 1705-1713, 2006.
- [8] L. Gabriela SOCACIU, Thermal Energy Storage with Phase Change Material, *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, No. 20, pp. 75-98, 2012.
- [9] S. h. neshat-safavi, S. R. Eghbali, Investigating the selection of phase change materials in passive cooling to improve natural ventilation and thermal comfort in hot and dry climates, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 8, No. 2 - Serial Number 16, pp. 1-10, 2020 (in persian).
- [10] J. Jaguemont, N. Omar, P. V. d. Bossche, J. V. Mierlo, Phase-change materials (PCM) for automotive applications: a review, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 132, pp. 308-320, 2017.
- [11] A. Sharma, V. V. Taygi, C. R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, No. 2, pp. 318-345, 2009.
- [12] N. Divyangkumar, S. Jain, N. L. Panwar, Influences of latent heat storage heat sink integrated with solar dryer to enhance drying period, *Energy Nexus*, Vol. 8, No. 29, No. 100160, 2022.
- [13] V. R. Mugi, P. Das, R. Balijepalli, C. VP, A review of natural energy storage materials used in solar dryers for food drying applications, *Journal of Energy Storage*, Vol. 49, No. 104198, 2022.
- [14] S. L. Tariq, H. M. Ali, M. A. Akram, M. M. Janjua, M. Ahmadlouydarab, Nanoparticles enhanced phase change materials (NePCMs)-A recent review, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 176, No. 115305, 2020.

## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از مواد تغییرفازدهنده به ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در خشک‌کن‌های خورشیدی پرداخته شد، با توجه به پژوهش‌های گذشته می‌توان نتیجه گرفت نوع غیرمستقیم خشک‌کن‌های خورشیدی برای تحقق اهداف بهتر است. دمای خشک‌کن‌های خورشیدی غیرمستقیم بدون مواد تغییرفازدهنده پس از غروب آفتاب یا در شرایط بد آب و هوایی به شرایط محیط می‌رسد در حالی که با استفاده از مواد تغییرفازدهنده دمای محفظه خشک‌کن چندین درجه بالاتر از دمای محیط در حدود ۴-۲۰ درجه سانتی-گراد است. از این رو باعث افزایش عملکرد حرارتی خشک‌کن می‌شود، یعنی منجر به کاهش تلفات حرارتی و افزایش سرعت خشک شدن و کاهش زمان خشک شدن می‌شود. زمان خشک شدن و مقدار مصرف انرژی نسبت به آفتاب باز بسته به رطوبت ماده، ضخامت برش، شرایط هوا و نوع مواد تغییرفازدهنده متغیر بوده و به ترتیب در حدود ۶۰-۱۰٪ و ۲۰-۷٪ کاهش می‌یابد. افزودن مواد تغییرفازدهنده نه تنها اثرات نامطلوبی بر کیفیت محصول ندارد بلکه کیفیت محصول را نیز حفظ می‌کند و از لحاظ اقتصادی هزینه را کاهش می‌دهد. استفاده از نانو کامپوزیت‌ها در درصد وزنی و سرعت جریان مختلف در مطالعات آینده توصیه می‌شود.

- solar dryer, *Journal of Energy Storage*, Vol. 28, No. 101181, 2020.
- [36] C. Ramirez, M. Palacio, M. Carmona, Reduced Model and Comparative Analysis of the Thermal Performance of Indirect Solar Dryer with and without PCM, *Energies*, Vol. 13, No. 20, 2020.
- [37] D. Chaatouf, M. Salhi, B. Raillani, S. Amraoui, A. Mezrhab, Assessment of a heat storage system within an indirect solar dryer to improve the efficiency and the dynamic behavior, *Journal of Energy Storage*, Vol. 41, No. 102874, 2021.
- [38] A. Elkhadraoui, S. Kooli, I. Hamdi, A. Farhat, Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed-mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape, *Renewable Energy*, Vol. 77, pp. 1-8, 2015.
- [39] A. El Khadraoui, S. Bouadila, S. Kooli, A. Farhat, A. Guizani, Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air collector with PCM, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 148, pp. 37-48, 2017.
- [40] H. Atalay and E. Cankurtaran, Energy, exergy, exergoeconomic and exergo-environmental analyses of a large scale solar dryer with PCM energy storage medium, *Energy*, Vol. 216, No. 119221, 2021.
- [41] H. Atalay, Assessment of energy and cost analysis of packed bed and phase change material thermal energy storage systems for the solar energy-assisted drying process, *Solar Energy*, Vol. 198, pp. 124-138, 2020.
- [42] T. Zhang, G. Lu, X. Zhai, B. Li, Structure optimization of a phase change material integrated solar air collector/storage unit based upon phase change analysis, *Energy Reports*, Vol. 7, pp. 1828-1836, 2021.
- [43] S. Esakkimuthu, A. H. Hassabou, C. Palaniappan, M. Spinnler, J. Blumenberg, R. Velraj, Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications, *Solar Energy*, Vol. 88, pp. 144-153, 2013.
- [44] A. K. Bhardwaj, R. Chauhan, R. Kumar, M. Sethi, A. Rana, Experimental investigation of an indirect solar dryer integrated with phase change material for drying valeriana jatamansi (medicinal herb), *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 10, pp. 302-314, 2017.
- [45] A.K. Bhardwaj, R. Kumar, R. Chauhan, S. Kumar, Experimental investigation and performance evaluation of a novel solar dryer integrated with a combination of SHS and PCM for drying chilli in the Himalayan region, *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 20, No. 100713, 2020.
- [15] S. M. Shalaby, M. A. Bek, A. A. El-Sebaei, Solar dryers with PCM as energy storage medium: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 33, pp. 110-116, 2014.
- [16] Y. Mohana, R. Mohanapriya, T. Anukiruthika, K. S. Yoha, J. A. Moses, C. Anandharamakrishnan, Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances, *Solar Energy*, Vol. 208, pp. 321-344, 2020.
- [17] M. Sharma, D. Atheaya, A. Kumar, Recent advancements of PCM based indirect type solar drying systems: A state of art, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 47, pp. 5852-5855, 2021.
- [18] R. Jain, A. S. Paul, D. Sharma, N. L. Panwar, Enhancement in thermal performance of solar dryer through conduction mode for drying of agricultural produces, *Energy Nexus*, Vol. 9, No. 100182, 2023.
- [19] K. R. Arun, G. Kunal, M. Srinivas, C. S. Sujith Kumar, M. Mohanraj, S. Jayaraj, Drying of Untreated Musa nendra and Momordica charantia in a Forced Convection Solar Cabinet Dryer with Thermal Storage, *Journal Pre-proof*, Vol. 192, No. 116697, 2020.
- [20] S. VijayaVenkataRaman, S. Iniyar, R. Goic, A review of solar drying technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 5, pp. 2652-2670, 2012.
- [21] S. Salve, A. M. Fulambarkar, A solar dryer for drying green chili in a forced convection for increasing the moisture removing rate, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 45, pp. 3170-3176, 2020.
- [22] p. p. Singh, S. Singh, S. S. Dhaliwal, Multi-shelf domestic solar dryer, *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, No. 13-14, pp. 1799-1815, 2006.
- [23] A. B. Lingayat, V. P. Chandramohan, V. R. K. Raju, V. Meda, A review on indirect type solar dryers for agricultural crops – Dryer setup, its performance, energy storage and important highlights, *Applied Energy*, Vol. 258, No. 114005, 2020.
- [24] O. Prakash, A. Kumar, V. Laguri, Performance of modified greenhouse dryer with thermal energy storage, *Energy Reports*, Vol. 2, pp.155-162, 2016.
- [25] S. Sivakumar, C. Velmurugan, D.S. Ebenezer Jacob Dhas, A. Brusly Solomon, K. Leo Dev Wins, Effect of nano cupric oxide coating on the forced convection performance of a mixed-mode flat plate solar dryer, *Renewable Energy*, Vol. 155, pp. 1165-1172, 2020.
- [26] A. Mohajer, O. Nematollahi, M. Mastani Joybari, S. A. Hashemi, M. R. Assari, Experimental investigation of a Hybrid Solar Drier and Water Heater System, *Energy Conversion and Management*, Vol. 76, pp. 935-944, 2013.
- [27] G. Çakmak, C. Yıldız, The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector, *Food and Bioproducts Processing*, Vol. 89, No. 2, pp. 103-108, 2011.
- [28] S. M. Shalaby, M. A. Bek, Experimental investigation of a novel indirect solar dryer implementing PCM as energy storage medium, *Energy Conversion and Management*, Vol. 83, pp. 1-8, 2014.
- [29] D. Jain and P. Tewari, Performance of indirect through pass natural convective solar crop dryer with phase change thermal energy storage, *Renewable Energy*, Vol. 80, pp. 244-250, 2015.
- [30] A. Reyes, A. Mahn, F. Vásquez, Mushrooms dehydration in a hybrid-solar dryer, using a phase change material, *Energy Conversion and Management*, Vol. 83, pp. 241-248, 2014.
- [31] K. R. Arun, M. Srinivas, C. A. Saleel, S. Jayaraj, Active drying of unripened bananas (Musa Nendra) in a multi-tray mixed-mode solar cabinet dryer with backup energy storage, *Solar Energy*, Vol. 188, pp. 1002-1012, 2019.
- [32] H. Ebrahimi, H. Samimi Akhijahani, P. Salami, Improving the thermal efficiency of a solar dryer using phase change materials at different position in the collector, *Solar Energy*, Vol. 220, pp. 535-551, 2021.
- [33] V. M. Swami, A. T. Autee, A. T. R, Experimental analysis of solar fish dryer using phase change material, *Journal of Energy Storage*, Vol. 20, pp. 310-315, 2018.
- [34] A. Ashrabi Ananno, M. H. Masud, P. Dabnichki, A. Ahmed, Design and numerical analysis of a hybrid geothermal PCM flat plate solar collector dryer for developing countries, *Solar Energy*, Vol. 196, pp. 270-286, 2020.
- [35] M. Bahari, B. Najafi, A. Babapoor, Evaluation of  $\alpha$ -AL2O3-PW nanocomposites for thermal energy storage in the agro-products