



تحول در صنایع کشاورزی و پس از برداشت با استفاده از کامپوزیت های مواد تغییر فاز دهنده

ساسان کرامت¹، عزیز باباپور^{2*}

1- دانشجوی دکتری فناوری های پس از برداشت، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

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

* اردبیل، 179، babapoor@uma.ac.ir

چکیده

مواد تغییر فاز دهنده (PCM) به عنوان ذخیره کننده های حرارتی در حوزه های مختلف کشاورزی به کار گرفته می شوند. در گلخانه ها، مواد تغییر فاز دهنده با جذب گرمای اضافی در روز و آزادسازی آن در شب به پایداری دمای محیط رشد گیاهان کمک می کند. به طور مشابه، در خشک کن های خورشیدی، این مواد با ذخیره انرژی در ساعات تابش و آزادسازی پس از غروب، زمان مؤثر خشک کردن محصولات را افزایش می دهند. به کارگیری مواد تغییر فاز دهنده در سامانه های تصفیه آب (مانند تقطیر خورشیدی) با ذخیره حرارت، فرایند تولید آب پاک را در نبود تابش مداوم می بخشد. همچنین در زنجیره ی سرد حمل و نقل محصولات غذایی، مواد تغییر فاز دهنده با حفظ دما در محدوده ی مناسب، از فساد زودرس جلوگیری کرده و کیفیت محصولات را طی توزیع حفظ می کند. این کاربردها مزیت های حرارتی مهمی نظیر کاهش نوسانات دمایی و بهبود بازده انرژی به همراه دارند. از منظر زیست محیطی نیز مواد تغییر فاز دهنده با بهره گیری از انرژی خورشیدی ذخیره شده، مصرف سوخت های فسیلی و انتشار آلاینده ها را کاهش داده و به پایداری کشاورزی کمک می کند. چشم انداز آینده ی مواد تغییر فاز دهنده در کشاورزی امیدوار کننده است و پژوهش های کنونی بر بهبود ویژگی های این مواد (افزایش ظرفیت گرمایی، کاهش پدیده ی ابرسرد شدن و ارتقای هدایت حرارتی) و کاهش هزینه ها متمرکز شده اند. انتظار می رود با رفع چالش های موجود، مواد تغییر فاز دهنده نقش بیشتری در بهینه سازی مصرف انرژی و توسعه ی پایدار بخش کشاورزی ایفا کند.

کلیدواژه ها: مواد تغییر فاز دهنده، توسعه پایدار، کشاورزی، آب پاک، حمل و نقل محصولات غذایی

Transformation in agricultural and post-harvest industries using phase change material composites

Sasan Keramat¹, Aziz Babapoor^{2*}

1- PhD student in Postharvest Technologies, Department of Biosystems Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

2- Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, P. O. Box: 179, Ardabil, Iran

* P.O.B. 179 Ardabil, Iran, babapoor@uma.ac.ir

Received: 07 June 2025 Accepted: 04 October 2025

Abstract

Phase change materials (PCM) are used as thermal energy storage in various agricultural sectors. In greenhouses, PCM help stabilize the growing environment by absorbing excess heat during the day and releasing it at night. Similarly, in solar dryers, these materials store energy during sunlight hours and release it after sunset, extending the effective drying time of agricultural products. PCM use in water purification systems, such as solar distillation, ensures a continuous supply of clean water by storing heat and maintaining the distillation process during non-sunlight hours. Additionally, in the cold chain for transporting food products, PCM maintain optimal temperatures, preventing premature spoilage and preserving product quality. These applications offer significant thermal benefits, such as reducing temperature fluctuations and enhancing energy efficiency. From an environmental perspective, PCM reduce the reliance on fossil fuels and lower emissions by harnessing stored solar energy, contributing to agricultural sustainability. The future prospects of PCM in agriculture are promising, with ongoing research focused on improving the thermal properties of these materials (enhancing heat storage capacity, reducing supercooling effects, and improving thermal conductivity) while lowering

costs. It is expected that with the resolution of current challenges, PCM will play an even greater role in optimizing energy use and supporting sustainable agricultural development.

Keywords: Phase change materials, Sustainable development, Agriculture, Clean water, Food products transportation

1- مقدمه

کشاورزی مدرن در قرن ۲۱ با چالش‌های بی‌سابقه‌ای روبرو شده است. با توجه به رشد جمعیت جهانی که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ به ۹/۷ میلیارد نفر برسد، سیستم‌های کشاورزی باید به‌طور قابل‌توجهی بهره‌وری خود را افزایش دهند و هم‌زمان اثرات زیست‌محیطی خود را کاهش دهند. این تقاضای متناقض در بحبوحه تغییرات اقلیمی رخ می‌دهد، تغییراتی که شامل افزایش شدید دما، الگوهای جوی غیرقابل پیش‌بینی و کمبود فزاینده منابع هستند. صنایع کشاورزی، به‌ویژه آن‌هایی که به محیط‌های کنترل‌شده مانند گلخانه‌ها و تأسیسات ذخیره‌سازی متکی هستند، انرژی زیادی مصرف می‌کنند. طبق آمار اخیر برنامه غذای سازمان ملل متحد، هزینه‌های انرژی بیش از ۳۰٪ از کل هزینه‌های عملیاتی در کشاورزی تأسیساتی را شامل می‌شود، در حالی که تنظیم دما به‌تنهایی ۶۵-۸۵٪ از کل انرژی مصرف‌شده را به خود اختصاص می‌دهد [1]. جستجو برای راه‌حل‌های پایدار که بتوانند این چالش‌های چندوجهی را برطرف کنند، محققان و نوآوران حوزه کشاورزی را به بررسی مواد و فناوری‌های جدید سوق داده است. در میان این گزینه‌ها، مواد تغییر فاز دهنده و ترکیبات کامپوزیتی آن‌ها به‌عنوان گزینه‌های امیدوارکننده‌ای برای تحول در شیوه‌های کشاورزی مطرح شده‌اند. مواد تغییر فاز دهنده دسته‌ای از مواد هستند که توانایی جذب، ذخیره‌سازی و آزادسازی مقادیر زیادی انرژی حرارتی را در فرآیند تغییر فاز (معمولاً از حالت جامد به مایع) دارند، در حالی که در طول این انتقال دمای تقریباً ثابتی را حفظ می‌کنند [2].

در کشاورزی، سه نوع اصلی از مواد تغییر فاز دهنده شامل مواد معدنی، آلی و ترکیبی وجود دارد که هر کدام ویژگی‌های خاص خود را دارند و تأثیرگذاری آن‌ها را در کاربردهای مختلف کشاورزی تعیین می‌کند. مواد معدنی تغییر فاز، به‌ویژه نمک‌های هیدراته مانند کلرید کلسیم و سولفات سدیم، به دلیل ویژگی‌هایی مانند ظرفیت بالای ذخیره انرژی حرارتی، رسانایی خوب و پایداری حجمی، در کشاورزی کاربرد گسترده‌ای دارند. این مواد به دلیل غیرقابل اشتعال بودن و هزینه کم، گزینه‌ای مناسب برای تنظیم دما در تأسیسات کشاورزی به شمار می‌آیند. با این حال، مشکلاتی همچون ابرسرد شدن، جدایش فازی و خوردگی در این مواد وجود دارد که برای حل آن‌ها، از مواد افزودنی مانند بوراکس، گرافیت و برخی غلظت‌دهنده‌ها استفاده می‌شود تا کارایی این مواد بهبود یابد [3].

مواد تغییر فاز دهنده آلی مانند موم‌های پارافینی و اسیدهای چرب به‌عنوان گزینه‌های مهم در کشاورزی شناخته می‌شوند. موم‌های پارافینی که از آلکان‌های زنجیره‌ای طولانی تشکیل شده‌اند، به دلیل پایداری شیمیایی، عدم خوردگی و عملکرد ثابت در چرخه‌های مکرر ذوب و انجماد، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین، اسیدهای چرب که دمای ذوب آن‌ها بین ۵- تا ۷۱ درجه سلسیوس است، به‌طور ایده‌آل با نیازهای دمایی تأسیسات کشاورزی سازگار هستند. از مزایای عمده مواد تغییر فاز دهنده آلی می‌توان به ذوب همگن، خودجوانه‌زنی و پایداری شیمیایی بالا اشاره کرد. با این حال،

مشکلاتی مانند رسانایی حرارتی پایین‌تر، خطر اشتعال و قیمت بالاتر نسبت به مواد معدنی، به‌ویژه در مورد موم‌های پارافینی صنعتی که ممکن است ۲ تا ۲/۵ برابر گران‌تر از مواد معدنی باشند، وجود دارد [1].

مواد تغییر فاز دهنده کامپوزیتی با ترکیب چندین ماده یا افزودن مواد پشتیبان، محدودیت‌های سیستم‌های تک‌جزئی را برطرف می‌کنند. نوآوری‌ها در این زمینه بر بهبود رسانایی حرارتی، جلوگیری از نشتی و افزایش پایداری و دوام تمرکز دارند. به‌عنوان مثال یک ماده تغییر فاز دهنده کامپوزیتی با کلسیم-کلرید هگزا هیدرات^۲ به‌عنوان ماده پایه و گرافیت اصلاح‌شده با دی‌اکسید تیتانیوم به‌عنوان تقویت‌کننده طراحی شد که این ترکیب با دمای تغییر فاز ۱۰/۶۷ درجه سلسیوس و رسانایی حرارتی ۰/۸۳۱ W/(m·K)، برای کنترل دمای ریشه در کشت‌های کم‌دما مناسب است [4].

2- مبانی علمی مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فاز دهنده دسته‌ای از مواد پیشرفته هستند که توانایی ذخیره‌سازی و آزادسازی مقادیر بالای انرژی گرمایی را از طریق تغییر حالت فیزیکی، عمدتاً میان فاز جامد و مایع، دارا می‌باشند. ویژگی کلیدی این مواد، تثبیت نسبی دما در طی فرآیند تغییر فاز است که آن‌ها را به گزینه‌ای کارآمد برای ذخیره‌سازی حرارتی در سامانه‌های انرژی و به‌ویژه در صنایع کشاورزی و فرآوری پس از برداشت تبدیل می‌کند. سازوکار عملکرد این مواد شامل دو مرحله اصلی است: در مرحله ذوب، با رسیدن دما به نقطه ذوب، انرژی گرمایی ورودی صرف گسستن پیوندهای مولکولی شده و به صورت گرمای نهان ذخیره می‌گردد؛ در حالی که در مرحله انجماد، با افت دما، پیوندها مجدداً شکل گرفته و انرژی ذخیره‌شده به تدریج آزاد می‌شود. بر اساس ترکیب شیمیایی، مواد تغییر فاز دهنده به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند: مواد آلی مانند پارافین‌ها و اسیدهای چرب که دارای چرخه‌پذیری و پایداری شیمیایی مناسب ولی رسانایی حرارتی محدود هستند؛ مواد معدنی نظیر هیدرات‌های نمکی که از ظرفیت گرمای نهان بالا و قیمت اقتصادی برخوردار هستند. اما مشکلاتی همچون سوپرکولینگ و خوردگی را نشان می‌دهند؛ و مواد یوتکتیک که با ترکیب دقیق مواد آلی و معدنی، امکان تنظیم دقیق دمای عملکردی را فراهم می‌آورند. موفقیت استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در سامانه‌های کشاورزی و پس از برداشت به انتخاب صحیح نوع ماده، ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی، محدوده دمایی مناسب و سازگاری با شرایط عملیاتی وابسته است [1,5,6].

3- مواد تغییر فاز دهنده در گلخانه‌های کشاورزی

مواد تغییر فاز دهنده به‌عنوان یک فناوری کلیدی در کشاورزی پایدار، به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش مصرف انرژی، کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و افزایش تولید غذا شناخته می‌شوند. با وجود چالش‌های موجود، تحقیقات در حال پیشرفت و نوآوری‌های فناورانه در حال هموار کردن مسیر برای پیاده‌سازی گسترده‌تر این فناوری هستند، به‌ویژه در عملیات گلخانه‌ای با مصرف انرژی بالا.

² CaCl₂·6H₂O

¹ PCM

شکل 1 کاربرد مواد تغییر فاز دهنده‌ها در (الف) گلخانه ونلو¹ و (ب) گلخانه خورشیدی.

پیشرفت‌های اخیر در فناوری مواد تغییر فاز دهنده شامل توسعه مواد کامپوزیتی با ویژگی‌هایی مانند هدایت حرارتی و پایداری بهبود یافته و همچنین طراحی سیستم‌های بهینه شده است [1]. موادی مانند کلرید کلسیم هگزا هیدرات و کامپوزیت‌های مبتنی بر پارافین به‌طور ویژه برای محدوده دمایی گلخانه‌ها بهینه‌سازی شده‌اند، و تکنیک‌های کپسوله‌سازی به‌کار گرفته شده برای جلوگیری از نشت مواد و افزایش دوام آن‌ها به‌طور چشمگیری موثر بوده است. علاوه بر این، نوآوری‌ها در این زمینه به کنترل رطوبت نیز گسترش یافته‌اند، به‌طوری که مواد تغییر فاز دهنده جاذب رطوبت کامپوزیتی قادرند همزمان دما و رطوبت را مدیریت کنند [2].

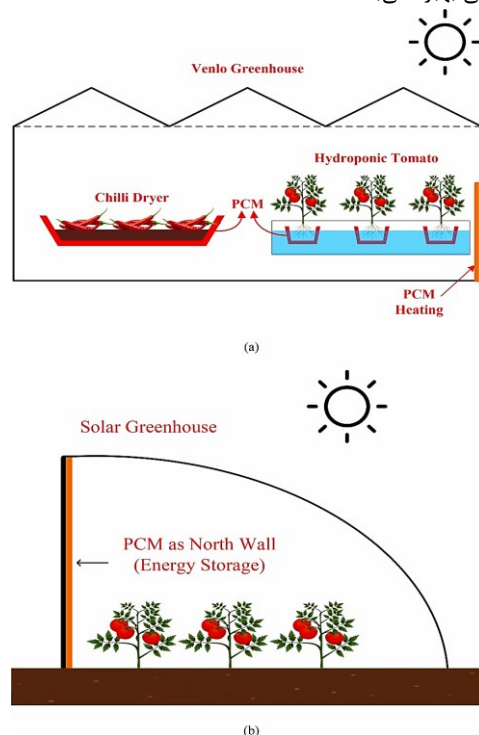
با وجود پیشرفت‌های صورت گرفته در فناوری مواد تغییر فاز دهنده، هنوز چالش‌هایی مانند هدایت حرارتی پایین، پایداری بلندمدت در چرخه‌های مکرر تغییر فاز، هزینه‌های اولیه بالا و عملکرد متغیر در شرایط اقلیمی مختلف وجود دارد [1,8]. این محدودیت‌ها نیازمند تحقیقات بیشتر برای توسعه مواد مقرون به‌صرفه و طراحی‌های استاندارد هستند. جهت‌گیری‌های آینده در این زمینه شامل بهبود خواص مواد تغییر فاز دهنده با استفاده از افزودنی‌هایی مانند نانوذرات، ترکیب این مواد با منابع انرژی تجدیدپذیر مانند سیستم‌های خورشیدی و زمین‌گرایی، و بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند برای مدیریت دقیق‌تر شرایط محیطی است [10,12].

استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در گلخانه‌ها با اهداف پایداری جهانی هم‌راستا است و می‌تواند به صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، و بهبود عملکرد محصولات منجر شود. به‌طور خاص، مطالعات نشان داده‌اند که با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، امکان صرفه‌جویی انرژی تا 47 کیلووات در مدت 28 روز فراهم است و دوره بازگشت سرمایه به‌طور میانگین تنها 1/6 سال است [9]. با پیشرفت‌های بیشتر در تحقیقات، مواد تغییر فاز دهنده آماده‌اند تا نقشی کلیدی در توسعه سیستم‌های کشاورزی پایدار و انرژی کارآمد ایفا کنند، به‌ویژه در شرایطی که تقاضای جهانی برای غذا افزایش یافته و نگرانی‌های زیست‌محیطی بیشتر می‌شود [13].

استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در کشاورزی به پیشرفت‌های چشمگیری منجر شده است. کاربرد این مواد همانطور که گفته شد، به دو دسته سیستم‌های ذخیره حرارت با مواد تغییر فاز دهنده غیرفعال و فعال تقسیم می‌شوند که در نحوه انتقال و استفاده از انرژی حرارتی با هم تفاوت دارند. در سیستم غیرفعال² گرما مستقیماً با ذوب مواد تغییر فاز دهنده جذب شده و در طی فرآیند خنک‌سازی به‌طوری که دمای تاسیسات بدون نیاز به تجهیزات خارجی تنظیم شده و به تدریج آزاد می‌شود. این سیستم به‌طور مستقل عمل می‌کند و نیازی به منبع انرژی خارجی ندارد. اما در سیستم فعال³، انتقال انرژی حرارتی از طریق لوله‌کشی منجر به انعطاف‌پذیری بیشتری در مدیریت انرژی حرارتی و با استفاده از محیطی مانند هوا یا آب انجام می‌شود که امکان ذخیره انرژی اضافی یا هدر رفته را فراهم می‌کند [14]. شکل 2، دو نمونه کاربردی از ذخیره‌سازی مواد تغییر فاز دهنده را در کشاورزی نشان می‌دهد.

با توجه به فشارهای فزاینده بر بخش کشاورزی برای تأمین تقاضای جهانی غذا به‌صورت پایدار، مواد تغییر فاز دهنده نقشی حیاتی در شکل‌دهی به آینده کشاورزی ایفا خواهند کرد [7]. این مواد به‌عنوان یک فناوری نوین در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی شناخته می‌شوند. این مواد با استفاده از توانایی جذب و آزادسازی گرمای نهان هنگام تغییر فاز (که معمولاً از حالت جامد به مایع است)، قادر به حفظ ثابت دمای محیط هستند [8]. در گلخانه‌های کشاورزی، که بخش زیادی از انرژی خود را به منظور تأمین گرمایش و سرمایش مصرف می‌کنند، مواد تغییر فاز دهنده نقش اساسی در کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری محصولات ایفا می‌کنند [2, 9]. این مواد با ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی اضافی در طول روز و آزادسازی آن در شب، به کاهش نوسانات دمایی کمک کرده و وابستگی به سیستم‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهند [1].

کاربردهای مواد تغییر فاز دهنده در گلخانه‌ها بسیار متنوع است و شامل استفاده در سیستم‌های غیرفعال و فعال می‌شود. در سیستم‌های غیرفعال، مواد تغییر فاز دهنده در بخش‌های ساختاری مانند دیوارهای شمالی یا کف گلخانه‌ها قرار می‌گیرند تا به‌طور طبیعی گرما را جذب و آزاد کنند (شکل 1). در مقابل، سیستم‌های فعال از تجهیزاتی مانند جمع‌کننده‌های حرارتی خورشیدی یا مبدل‌های حرارتی برای بهبود کنترل دما استفاده می‌کنند [10]. به‌عنوان نمونه، در مناطق با تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد، مواد تغییر فاز دهنده در گلخانه‌های پلاستیکی به ذخیره‌سازی گرمای روزانه کمک کرده و در شب با استفاده از عایق‌بندی مناسب، گرما را آزاد می‌کنند [11]. علاوه بر این، مواد تغییر فاز دهنده در فرآیندهای خنک‌سازی گلخانه‌ها و خشک کردن محصولات کشاورزی مانند فلفل و موز نیز کاربرد دارند و عملکرد این فرآیندها را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشند [9].



² Passive PCM Heat Storage - PCHS
³ Active PCHS

¹ گلخانه ونلو احتمالاً شناخته شده ترین نوع گلخانه در میان تولیدکنندگان حرفه‌ای است.

آلی،
مقرون به صرفه و
سازگار با
محیط گلخانه

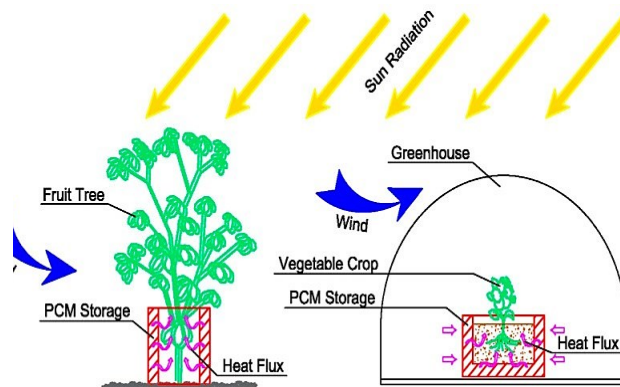
فلزی
جدایی
فازی در
چرخه های
مکرر
نیاز به
افزودنی ها
برای پایداری
گرمای

ترکیبات
مخلوط با دمای
ذوب مشخص،
مناسب برای
تنظیم دقیق تر
دما در
گلخانه ها

ترکیب ۶۰٪
اسید
دکانوئیک و
۴۰٪ اسید
اولئیک

مواد یو
کتیک

نشان پایداری
از برخی مواد
معدنی
پیچیدگی
در سنتز و
تهیه
هزینه بالاتر
نسبت به
مواد منفرد



شکل 2 مفهوم مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده برای حفاظت از درختان میوه ایستاده (سمت چپ) و گیاهان گلخانه‌ها (سمت راست) [15].

طبق آمار تحقیق ارائه شده در [16]، پارافین و ترکیبات پارافینی در حدود ۳۰ درصد از مقالات منتخب به عنوان ماده تغییر فاز در گلخانه‌های کشاورزی به کار رفته‌اند. همچنین، کلسیم کلرید هگزا هیدرات و ترکیبات مشابه آن به عنوان یکی از پرکاربردترین مواد تغییر فاز دهنده در این حوزه شناخته می‌شوند که به دلیل ویژگی‌های حرارتی مطلوب و هزینه مناسب، استفاده گسترده‌ای دارند. این مواد به دلیل ظرفیت بالای ذخیره انرژی گرمایی و قابلیت تنظیم دمای محیط گلخانه، نقش مهمی در بهبود بهره‌وری انرژی و شرایط رشد گیاهان ایفا می‌کنند [17,18].

جدول 1 خلاصه انواع مواد تغییر فاز دهنده در گلخانه‌های کشاورزی [16].

دسته - بندی مواد تغییر فاز دهنده (PCM)	نمونه‌های معمول	درصد استفاده در مقالات منتخب	ویژگی‌ها و کاربردها	معایب
مواد آلی	پارافین، اسیدهای چرب	30%	دارای دامنه دمای ذوب متنوع، پایداری حرارتی و شیمیایی مناسب، استفاده گسترده در کنترل دمای گلخانه‌ها	رسانایی حرارتی پایین - 0.2 W/m·K - حجم تغییر شکل قابل توجه در ذوب
مواد معدنی (غیر آلی)	کلرید کلسیم شش‌آبه (CaCl ₂ ·6H ₂ O)	محبوب‌ترین نوع	گرمای نهان بالاتر، رسانایی حرارتی بهتر نسبت به مواد	پدیده ابرسردشدگی - خوردگی تجهیزات

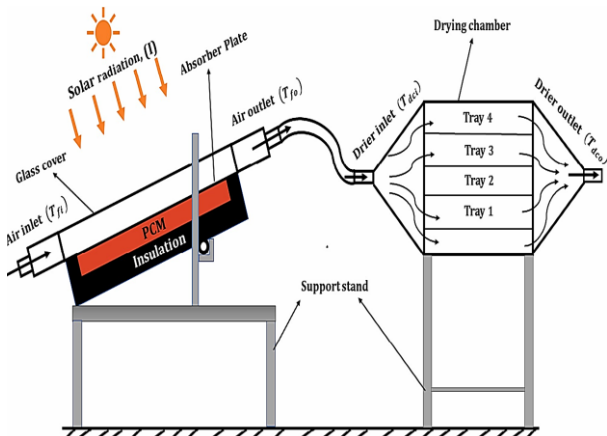
4- مواد تغییر فاز دهنده در خشک‌کن‌ها

در سیستم‌های خشک‌کن، به‌ویژه انواع خورشیدی آن، مواد تغییر فاز دهنده نقشی اساسی در افزایش بهره‌وری انرژی و تضمین عملکرد پایدار ایفا می‌کنند. این مواد با توانایی ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی گرمایی، می‌توانند بر چالش‌هایی همچون نوسانات تابش خورشید غلبه کرده و عملکرد خشک‌کن را در شرایط ناپایدار بهبود بخشند. در این نوشتار، به کاربردهای متنوع مواد تغییر فاز دهنده در خشک‌کن‌ها پرداخته می‌شود و به‌ویژه مزایای آن‌ها از جنبه‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

خشک‌کن‌های خورشیدی نقش مهمی در نگهداری محصولات کشاورزی دارند، چرا که با کاهش رطوبت، عمر مفید این محصولات را افزایش داده و مانع فساد زود هنگام آن‌ها می‌شوند. با این حال، در مناطقی با عرض جغرافیایی بالا یا در مناطقی که تغییرات فصلی در تابش خورشید چشمگیر است، عملکرد خشک‌کن‌های سنتی با محدودیت‌هایی مواجه می‌شود. نبود تابش مداوم خورشید، چه در طول روز و چه در برخی فصول سال، می‌تواند منجر به کاهش کیفیت فرآیند خشک‌سازی و پایین آمدن کیفیت محصول نهایی شود. به عنوان نمونه، کشورهایی مانند روسیه یا کانادا که با کمبود نور خورشید در برخی فصول مواجه‌اند، بیش از پیش به استفاده از راهکارهایی برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نیاز دارند [19].

برای غلبه بر این محدودیت‌ها، پژوهشگران به سمت طراحی خشک‌کن‌های خورشیدی پیشرفته با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده حرکت کرده‌اند. و این مواد، موادی هستند که توانایی ذخیره‌سازی حجم بالایی از انرژی حرارتی را در حین فرآیند تغییر فاز (مانند ذوب یا انجماد) دارند، در حالی که تغییر دمای آن‌ها بسیار اندک است. این خاصیت به آن‌ها اجازه می‌دهد تا انرژی اضافی حاصل از تابش خورشیدی در ساعات اوج ذخیره کرده و در زمان‌هایی که نور خورشید در دسترس نیست (مانند شب یا روزهای ابری) آزاد کنند. بدین ترتیب، فرآیند خشک‌سازی با بازده بیشتری ادامه می‌یابد.

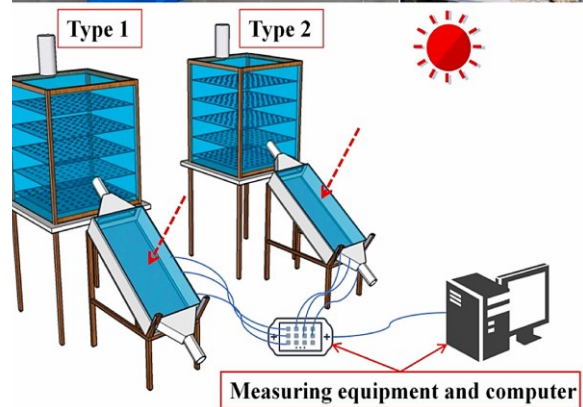
این طراحی به حفظ دمای یکنواخت و مناسب در طول فرآیند کمک کرده و پایداری حرارتی سیستم را در شرایط متغیر محیطی تضمین می‌کند.



شکل 4 نمودار شماتیک خشک‌کن خورشیدی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده.

انتخاب نوع مواد تغییر فاز دهنده و نحوه جای‌گذاری آن در ساختار خشک‌کن، نقش اساسی در عملکرد نهایی سیستم ایفا می‌کند. در همین زمینه، شاتوف و همکارانش (۲۰۲۵) به بررسی رفتار حرارتی و دینامیکی یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم پرداختند که در آن مواد تغییر فاز دهنده در دو موقعیت متفاوت نصب شده بود: یکی در زیر صفحه جاذب و دیگری در محفظه پلنیوم. یافته‌های این پژوهش نشان داد که قرارگیری مواد تغییر فاز دهنده در محفظه پلنیوم تأثیر به‌مراتب مؤثرتری در حفظ دمای سیستم داشته و منجر به بهبود توزیع جریان هوای گرم در میان سینی‌های خشک‌کن شده است. این ویژگی باعث افزایش یکنواختی فرآیند خشک‌سازی و ارتقاء کارایی کلی سیستم گردید. چیدمان این پیکربندی در شکل 5 ارائه شده است [21].

در همین راستا، هو و همکارانش (۲۰۲۵) در یک مطالعه، نمونه‌ای نوآورانه از خشک‌کن خورشیدی با جریان هوای گرم را معرفی کردند که برای شرایط اقلیمی مناطق با عرض جغرافیایی بالا طراحی شده بود. در این طرح، یک لایه از ماده مواد تغییر فاز دهنده با دمای تغییر فاز ۴۶ درجه سلسیوس^۱ به‌عنوان بخش ذخیره‌سازی حرارتی در زیر صفحه جاذب نصب شده بود. همان‌گونه که در شکل 3 مشاهده می‌شود، این خشک‌کن (مدل نوع ۲) قادر بود در دوره‌های کم‌نور، دمای مطلوب‌تری را حفظ کند. یافته‌های تجربی نشان دادند که استفاده از این سیستم منجر به کاهش ۱۶/۵۶٪ در زمان خشک‌کردن قارچ‌ها (حدود ۵/۱۵ ساعت) نسبت به نمونه‌های سنتی و از نظر اقتصادی نیز این طراحی به‌صرفه ارزیابی شد [19].



شکل 3 چیدمان محل آزمایش.

در مطالعه‌ای مشابه، براهما و همکارانش (۲۰۲۴) به بررسی عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده^۲ برای فرآیند خشک‌کردن گوجه‌فرنگی پرداختند. در این تحقیق، سه نوع مختلف مواد تغییر فاز دهنده شامل پارافین مومی، اسید استئاریک و استامید مورد آزمایش قرار گرفتند تا عملکرد سیستم از نظر کارایی حرارتی و تأثیرات زیست‌محیطی ارزیابی شود. یافته‌های پژوهش نشان داد که استفاده از خشک‌کن خورشیدی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده به شکل قابل توجهی فرآیند خشک‌سازی را بهبود بخشید، مصرف انرژی ویژه را کاهش داد و در نتیجه باعث کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن و فراهم شدن زمینه برای دریافت اعتبارهای کربنی شد [20]. ساختار این خشک‌کن، همان‌طور که در شکل 4 نمایش داده شده است، شامل مخازنی حاوی مواد تغییر فاز دهنده در داخل محفظه خشک‌کردن بود.

² PCMSD

¹ مانند PCM-A-46

سلسیوس، تأثیر مثبتی بر کیفیت محصول نهایی داشته و باعث حفظ بهتر ویژگی‌هایی نظیر رنگ، رایحه و ترکیبات زیست‌فعال، به‌ویژه والپوتریات‌ها، شده است. پیشرفت‌های یادشده، امکان بهره‌برداری از موادی با هدایت گرمایی بالا و پایداری بلندمدت را فراهم کرده‌اند؛ موضوعی که به‌طور مستقیم می‌تواند منجر به افزایش کارایی و قابلیت اطمینان در عملکرد خشک‌کن‌های خورشیدی شود.

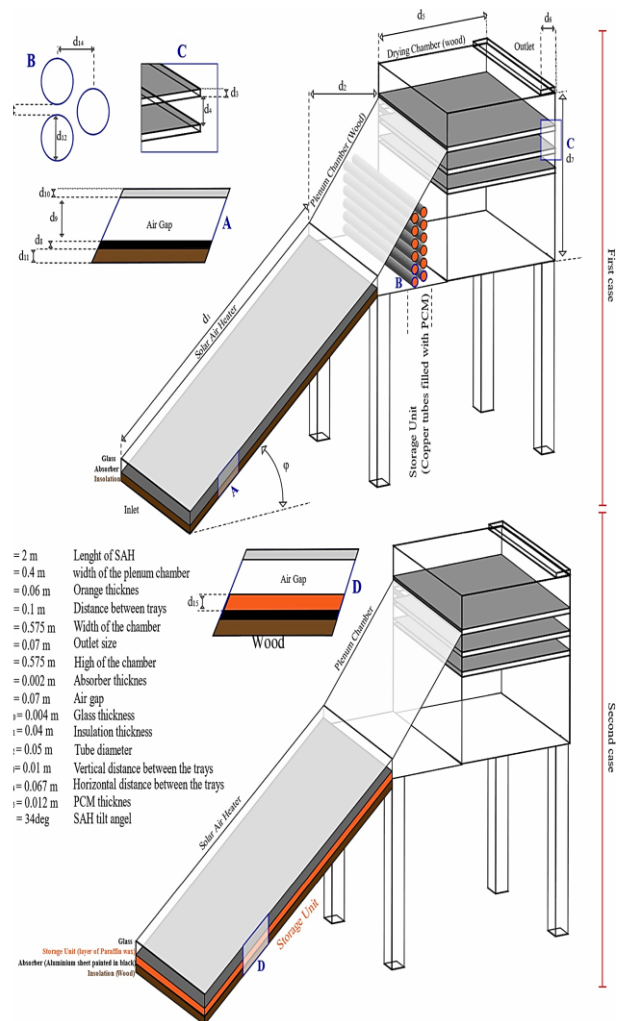
5- مواد تغییر فاز دهنده در تصفیه آب و آبیاری کشاورزی

فشارهای روزافزون بر منابع آبی، ناشی از تغییرات اقلیمی، رشد سریع جمعیت و گسترش فعالیت‌های کشاورزی، اهمیت بهره‌برداری بهینه از منابع آب را در بخش کشاورزی بیش از پیش آشکار کرده است. در این زمینه، مواد تغییر فاز دهنده به عنوان یک راه‌حل نوآورانه برای بهبود بهره‌وری انرژی و مدیریت منابع آبی در کشاورزی مورد توجه قرار گرفته‌اند [24]. ویژگی‌های منحصر به فرد مواد تغییر فاز دهنده، آنها را برای کاربردهایی چون تصفیه آب خورشیدی و تنظیم دمای گلخانه‌ها، که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با آبیاری و مدیریت منابع آبی در کشاورزی ارتباط دارند، بسیار مناسب می‌سازد [25].

5-1- تصفیه آب خورشیدی با استفاده از PCMها

سیستم‌های تصفیه آب خورشیدی، همچون تقطیرکننده‌های خورشیدی^۴، از انرژی تابشی خورشید برای تبخیر آب شور یا آلوده و تولید آب شیرین استفاده می‌کنند [26]. این فناوری‌ها به‌ویژه در مناطقی با شرایط خشک و نیمه‌خشک، که منابع آب زیرزمینی غالباً شور یا آلوده هستند، از اهمیت بالایی برخوردارند. با این وجود، یکی از چالش‌های اصلی این سیستم‌ها، وابستگی آن‌ها به تابش مستقیم خورشید و کاهش کارایی در ساعات کم‌نور یا شب است. در این راستا، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند راه‌حلی مؤثر باشد. مواد تغییر فاز دهنده با ذخیره انرژی حرارتی اضافی در طول روز و آزادسازی آن در زمان‌های کمبود نور، قادر هستند این محدودیت را رفع کرده و امکان تولید مستمر آب تمیز را فراهم آورند [27].

به‌عنوان نمونه، مطالعه‌ای توسط رجبی کومار و همکارانش (2022) نشان داد که یک سیستم تقطیر خورشیدی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده (همچون پارافین) می‌تواند تولید روزانه آب تمیز را به میزان 13/62 لیتر در مترمربع برساند. این مقدار تولید برای تأمین آب آبیاری محصولات کشاورزی در مناطق دورافتاده و کم‌برخوردار از منابع آب مناسب است. در شکل 6، که از این مطالعه استخراج شده است، طرحی از سیستم تقطیر خورشیدی با مواد تغییر فاز دهنده نمایش داده شده که فرآیند ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتی را توضیح می‌دهد [28].



شکل 5 طرح شماتیک رنگرز خورشیدی مورد مطالعه در هر دو مورد (مواد تغییر فاز دهنده در محفظه پلنوم و مواد تغییر فاز دهنده در زیر صفحه جاذب)

پیشرفت‌های اخیر در زمینه مواد تغییر فاز دهنده ترکیبی، افق‌های جدیدی را در بهبود ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی گشوده‌اند. در همین راستا، جوانبیدی^۱ در یک مرور جامع، به بررسی مواد تغییر فاز دهنده ترکیبی نوین از جمله کامپوزیت‌های مبتنی بر گرافن و نانومواد پرداخت. وی در تحقیق خود، ویژگی‌های برتر این مواد را از نظر رسانایی حرارتی، ثبات ساختاری و دوام عملکردی برجسته ساخت. این خصوصیات موجب شده‌اند که مواد تغییر فاز دهنده ترکیبی به گزینه‌هایی بسیار مناسب برای به‌کارگیری در سیستم‌های خشک‌کن تبدیل شوند [22].

یافته‌های تحقیق [23] نیز نشان می‌دهند که به‌کارگیری پارافین^۳ به‌عنوان ماده تغییر فاز دهنده در خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم، تأثیر بسزایی در ارتقاء عملکرد فرآیند خشک‌سازی دارد. بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده در تحقیق، این ماده موجب کاهش 64/29٪ در زمان خشک‌کردن ریزوم‌های والرینا جاتامانسی^۳ (نوعی از گیاهان دارویی) نسبت به روش سنتی خشک‌سازی در سایه شد. افزون بر این، حفظ دمای ثابت و بهینه در حدود ۴۰ درجه

³ Valeriana jatamansi
⁴ Solar Stills

¹ Junaidi
² RT-42

علاوه بر این، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در سیستم‌های تقطیر خورشیدی فعال، نظیر سیستم‌های مجهز به کلکتورهای صفحه تخت یا متمرکزکننده‌های پارابولیک، می‌تواند به‌طور چشمگیری بازدهی این سیستم‌ها را افزایش دهد. طبق تحقیق امرا و همکارانش (2019)، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده موجب کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به میزان 28/72 تن در سال می‌شود، که این امر مواد تغییر فاز دهنده را به گزینه‌ای پایدار و مؤثر برای تصفیه آب در کشاورزی تبدیل کرده است [30].

همچنین، مه‌لینگ (2022) در بررسی خود به کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در سیستم‌های تصفیه آب خورشیدی برای کشاورزی اشاره کرده و بر اهمیت این فناوری‌ها در تأمین منابع آبی برای آبیاری تأکید کرده است. این پیشرفت‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالای مواد تغییر فاز دهنده در بهبود کارایی و کاهش اثرات زیست‌محیطی سیستم‌های تصفیه آب در کشاورزی است [3].

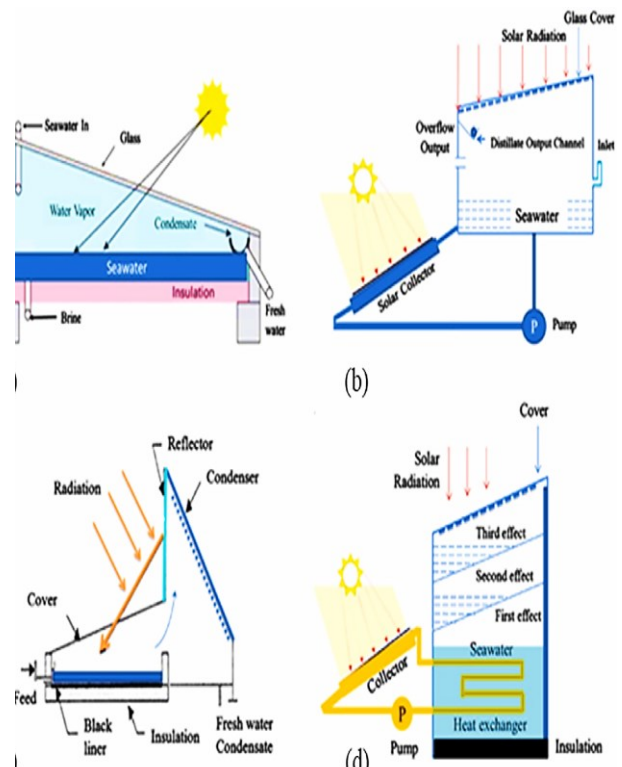
5-2- مدیریت دمای گلخانه‌ها و تأثیر بر مصرف آب

مدیریت دمای گلخانه‌ها یکی دیگر از کاربردهای مهم و مؤثر مواد تغییر فاز دهنده در کشاورزی است که به‌طور غیرمستقیم بر مصرف آب تأثیر می‌گذارد. گلخانه‌ها به‌منظور ایجاد شرایط بهینه برای رشد گیاهان، به‌ویژه در مناطق با آب و هوای نامساعد، به کار گرفته می‌شوند [32]. با این حال، نوسانات دمایی در داخل گلخانه‌ها می‌تواند منجر به افزایش تبخیر آب و در نتیجه نیاز بیشتر به آبیاری شود. در این زمینه، مواد تغییر فاز دهنده با ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی در طول روز و آزادسازی آن در شب، قادرند دمای گلخانه را در یک سطح ثابت نگه دارند. این ویژگی باعث می‌شود نیاز به سیستم‌های گرمایش یا سرمایش مبتنی بر سوخت‌های فسیلی کاهش یابد و در نتیجه، مصرف انرژی و هزینه‌های مرتبط با آن به‌طور چشمگیری کاهش پیدا کند [33].

تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند نوسانات دمایی در گلخانه‌ها را تا 6 درجه سلسیوس کاهش داده و مصرف سوخت برای گرمایش را تا 48 درصد کاهش دهد [5]. این ویژگی نه تنها به بهبود رشد گیاهان کمک می‌کند، بلکه با کاهش تبخیر، بهینه‌سازی مصرف آب را نیز به همراه دارد. به‌عنوان مثال، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در دیوارها یا مخازن ذخیره حرارتی گلخانه‌ها قادر است دمای مطلوب برای رشد گیاهان را ثابت نگه دارد و بدین ترتیب به مدیریت بهتر منابع آبی در گلخانه‌ها کمک نماید. همچنین، نیشاد و کروپا (2022) در پژوهش خود به کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در گلخانه‌ها برای تنظیم دما و کاهش مصرف آب اشاره کرده‌اند، که این موضوع اهمیت آن‌ها را در بهینه‌سازی فرآیندهای کشاورزی و صرفه‌جویی در منابع آبی نشان می‌دهد [8].

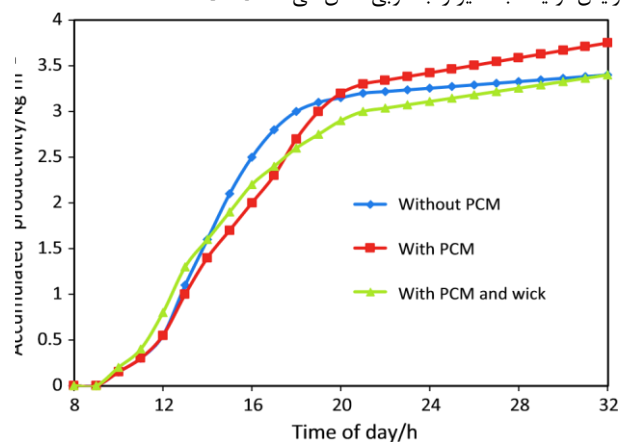
6- مواد تغییر فاز دهنده در نگهداری و حمل‌ونقل محصولات کشاورزی و غذایی

محصولات کشاورزی و غذایی مانند میوه‌ها، سبزیجات، لبنیات، گوشت و فرآورده‌های دریایی نیازمند شرایط دمایی خاصی برای حفظ تازگی و کیفیت خود هستند. تحقیقات نشان داده‌اند که ضایعات غذایی در زنجیره تأمین، به‌ویژه در مرحله حمل‌ونقل، می‌تواند به میزان 30-40 درصد برسد که یکی از علل عمده آن، نبود کنترل مناسب دما در این فرایند است [34]. مواد تغییر فاز دهنده با ایجاد محیطی پایدار از نظر دمایی، قادرند به حفظ تازگی و ویژگی‌های ارگانولپتیک محصولات کمک کنند. علاوه بر این، با کاهش نیاز به سیستم‌های



شکل 6 نمودار شماتیک انواع تقطیر خورشیدی (a) تقطیر خورشیدی با حوضچه منفرد و شیب منفرد (b) تقطیر خورشیدی با جمع‌کننده خورشیدی (c) تقطیر خورشیدی با کندانسور (d) تقطیر خورشیدی چند مرحله‌ای [29].

در همین راستا، امرا و همکارانش (2019) در تحقیق خود نشان دادند که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند کارایی سیستم‌های تقطیر خورشیدی را تا 70 درصد نسبت به سیستم‌های سنتی افزایش دهد، در حالی که سیستم‌های غیرفعال نیز بهبودهایی تا 120 درصد را تجربه کرده‌اند. شکل 7، برگرفته از این تحقیق، مقایسه‌ای از کارایی سیستم‌های تقطیر خورشیدی با و بدون مواد تغییر فاز دهنده را ارائه می‌دهد که تأثیر قابل توجه این فناوری در افزایش تولید آب تمیز را به‌خوبی نشان می‌دهد [30].



شکل 7 مقایسه بهره‌وری تجمعی تقطیر خورشیدی با مواد تغییر فاز دهنده، بدون مواد تغییر فاز دهنده و با مواد تغییر فاز دهنده و فتیله در جرم آب 25 کیلوگرم [31].

و افزایش پایداری فرآیندها کمک کند [46]. بیوجار، با ویژگی‌هایی نظیر تخلخل بالا و ظرفیت جذب مناسب، به‌عنوان یک ماده پایدار در کشاورزی شناخته می‌شود و می‌تواند به کاهش اثرات زیست‌محیطی زباله‌ها و تقویت چرخه اقتصادی کمک کند [47].

تصفیه آب آلوده در کشاورزی یکی دیگر از چالش‌های مهم است که فناوری‌های نوین به آن پرداخته‌اند. تقطیر خورشیدی، به‌ویژه زمانی که با مواد تغییر فاز دهنده و فناوری‌های اینترنت اشیا^۱ برای نظارت بر کیفیت آب ترکیب می‌شود، به‌عنوان یک روش مؤثر برای حذف آلاینده‌هایی همچون آفت‌کش‌ها، کودها و فلزات سنگین شناخته شده است [48]. این روش، به دلیل استفاده از انرژی خورشیدی و هزینه‌های عملیاتی پایین، به‌ویژه در مناطق دورافتاده بسیار مناسب است. ادغام فناوری اینترنت اشیا امکان نظارت بلادرنگ بر پارامترهای مختلف کیفیت آب، نظیر میزان اسیدی یا بازی بودن و مواد جامد محلول را فراهم می‌آورد، که این امر منجر به بهبود قابل توجه کارایی فرآیند تصفیه می‌شود [49].

با وجود توسعه قابل توجه کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در حوزه کشاورزی و صنایع پس از برداشت، چالش‌های بنیادینی همچنان مانع بهره‌برداری کامل از ظرفیت آن‌ها است. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به رسانایی حرارتی پایین، به‌ویژه در گروه مواد آلی، اشاره کرد که فرآیند انتقال گرما و در نتیجه سرعت شارژ و دشارژ حرارتی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، پدیده ابرسردشدگی در برخی مواد معدنی منجر به آغاز تأخیر در فرایند انجماد و کاهش بازدهی حرارتی می‌شود. تغییر حجم و احتمال نشتی در هنگام تغییر فاز نیز ضرورت طراحی دقیق و توسعه فناوری‌های کپسوله‌سازی را برجسته می‌سازد [4,23]. در کنار این موارد، هزینه‌های بالای تولید مواد تغییر فاز دهنده بهینه و سازگار با محیط زیست، یکی دیگر از موانع تجاری‌سازی محسوب می‌شود. در راستای رفع این چالش‌ها، مسیر تحقیقات آینده باید به سمت ارتقای رسانایی حرارتی با استفاده از افزودنی‌های نانو ساختار نظیر گرافن و نانولوله‌های کربنی، کاهش ابرسردشدگی از طریق اصلاح شیمیایی و به‌کارگیری عوامل هسته‌زایی، افزایش دوام چرخه‌ای برای شرایط محیطی متغیر و طراحی کامپوزیت‌های زیست‌پایه و تجزیه‌پذیر به‌منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی و وابستگی به منابع فسیلی متمرکز شود. همچنین، ادغام مواد تغییر فاز دهنده با سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر و بهره‌گیری از فناوری‌های مدیریت حرارتی هوشمند می‌تواند به افزایش بازده و انعطاف‌پذیری در کاربردهای کشاورزی منجر شود. تحقق این چشم‌انداز، نویدبخش نقش‌آفرینی گسترده‌تر مواد تغییر فاز دهنده در کاهش اتلاف انرژی، ارتقای پایداری سیستم‌های کشاورزی و بهبود کارایی فرآیندهای پس از برداشت است [22,41].

8- نتیجه گیری

کاربرد گسترده‌ی مواد تغییر فاز دهنده در حوزه‌های متنوع کشاورزی مانند تعدیل شرایط حرارتی گلخانه‌ها، بهبود عملکرد خشک‌کن‌های خورشیدی، ارتقای سامانه‌های تصفیه آب و بهینه‌سازی حمل‌ونقل محصولات غذایی بیانگر رویکردی نوین در راستای استفاده پایدار از انرژی در این بخش است.

برودتی پرهزینه، مواد تغییر فاز دهنده می‌توانند به بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی کمک نمایند [35].

کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در نگهداری و حمل‌ونقل محصولات غذایی بسیار وسیع است. به‌عنوان مثال، در حمل‌ونقل زنجیره سرد، مواد تغییر فاز دهنده می‌توانند به‌عنوان منبع انرژی ذخیره‌شده عمل کرده و در مواقع قطع برق یا تغییرات دمایی محیطی، دمای محصولات را در حالت ثابت نگه دارند [36]. علاوه بر این، در فرآیندهای خشک‌کردن مواد غذایی با استفاده از انرژی خورشیدی، مواد تغییر فاز دهنده می‌توانند به بهبود کارایی سیستم و کاهش مصرف انرژی کمک کنند [37, 38]. این مواد همچنین در بسته‌بندی فعال^۱ برای کنترل دمای محصولات غذایی حساس به تغییرات دما، مانند گوشت، ماهی و فرآورده‌های لبنی، به‌کار می‌روند [39, 40].

مواد تغییر فاز دهنده از نظر نوع و ویژگی‌ها بسیار متنوع هستند. به‌عنوان مثال، مواد تغییر فاز دهنده آلی همچون اسیدهای چرب و استرها به دلیل عدم سمیت و سازگاری بالا با مواد غذایی، گزینه‌های مناسبی برای کاربردهای مرتبط با صنایع غذایی محسوب می‌شوند [41]. از سوی دیگر، مواد تغییر فاز دهنده غیرآلی مانند هیدرات‌های نمک به دلیل ظرفیت بالای ذخیره‌سازی انرژی خود مورد توجه قرار گرفته‌اند، اگرچه برای جلوگیری از مشکلات جدایی فاز ممکن است نیاز به تثبیت داشته باشند. همچنین، مواد تغییر فاز دهنده ترکیبی که از ترکیب مواد مختلف تشکیل می‌شوند، می‌توانند به افزایش رسانایی حرارتی و بهبود پایداری سیستم کمک کنند [42].

از منظر زیست‌محیطی، مواد تغییر فاز دهنده نقشی اساسی در کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند. به‌ویژه، مواد تغییر فاز دهنده مبتنی بر منابع زیستی^۲، که از منابع تجدیدپذیر همچون روغن‌های گیاهی یا ضایعات بیولوژیکی تولید می‌شوند، می‌توانند به‌عنوان گزینه‌های پایدار در نظر گرفته شوند [43, 44]. این مواد تغییر فاز دهنده نه تنها قابلیت تجزیه‌پذیری دارند، بلکه می‌توانند به کاهش وابستگی به منابع غیرتجدیدپذیر کمک کرده و به‌طور کلی اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهند.

با این حال، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده با چالش‌هایی همراه است. به‌عنوان مثال، نیاز به بهبود رسانایی حرارتی، جلوگیری از پدیده ابرخنک شدن^۳ و اطمینان از سازگاری این مواد با محصولات غذایی از جمله مسائل حیاتی در این زمینه هستند. علاوه بر این، تولید این مواد در مقیاس صنعتی و کاهش هزینه‌ها به‌منظور رقابت با روش‌های سنتی، یکی دیگر از چالش‌های اصلی به‌شمار می‌آید [6].

7- چالش‌ها و چشم‌انداز آینده

ترکیب مواد تغییر فاز دهنده با فناوری‌های دیگر، مانند نانوالیاف، می‌تواند راه‌حل‌های جامع‌تری برای مدیریت منابع آب در کشاورزی ارائه دهد. نانوالیاف که از ضایعات کشاورزی مانند پوست نارگیل یا باگاس نیشکر تولید می‌شوند، در حذف آلاینده‌هایی نظیر فلزات سنگین و نیترات‌ها کارایی بالایی دارند و می‌توانند به‌عنوان مکملی برای سیستم‌های تصفیه آب خورشیدی مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده عمل کنند [45]. علاوه بر این، استفاده از ضایعات کشاورزی در تولید مواد نانو ساختار، همچون بیوجار، می‌تواند به کاهش هزینه‌ها

¹ Active packaging

² Bio-based PCM

³ Supercooling

⁴ IoT

- [14] N. Ghasem, K. Majid, and G. Amin, "The importance and application of phase change materials," presented at the 10th National Congress of Agricultural Machinery Engineering (Biosystems) and Mechanization of Iran, 1395. [Online]. Available: <https://civilica.com/doc/563518/>. (in Persian)
- [15] S. M. Thaler, J. Zwatz, P. Nicolay, R. Hauser, and R. Lackner, "An Innovative Heating Solution for Sustainable Agriculture: A Feasibility Study on the Integration of Phase Change Materials as Passive Heating Elements," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 16, p. 7419, 2024.
- [16] M. Mu, S. Zhang, S. Yang, and Y. Wang, "Phase change materials applied in agricultural greenhouses," *Journal of Energy Storage*, vol. 49, p. 104100, 2022.
- [17] P. Nasehi and A. Jamekhorshid, "Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials (PCMs): A Literature Review," *Journal of Renewable and New Energy*, vol. 9, no. 2, pp. 34-45, 2022. (in Persian)
- [18] khodkam, Himan, ghaebi, and Hadi, "Commercial production of antioxidants from fresh agricultural residues," *Renewable and New Energy*, 2025. (in Persian)
- [19] W. Hu, V. N. Alekhin, Y. Huang, T. Meng, and Y. Du, "Design, thermal performance evaluation, and economic analysis of a new solar air dryer suitable for high latitude regions," *Energy*, p. 134766, 2025.
- [20] B. Brahma, A. K. Shukla, and D. C. Baruah, "Energy, exergy, economic and environmental analysis of phase change material based solar dryer (PCMSD)," *Journal of Energy Storage*, vol. 88, p. 111490, 2024.
- [21] D. CHAATOUF, M. SALHI, A. Bria, B. RAILLANI, S. AMRAQUI, and A. MEZRHAB, "Numerical and Experimental Evaluation of the Thermal and Dynamic Performance of a Phase Change Material in an Indirect Solar Dryer," *International Journal of Refrigeration*, 2025.
- [22] M. A. Raheem Junaidi, "Influence of advanced composite phase change materials on thermal energy storage and thermal energy conversion," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, pp. 1-22, 2025.
- [23] A. Bhardwaj, R. Chauhan, R. Kumar, M. Sethi, and 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.
- [24] B. Bai, K. Zhao, and X. Li, "Application research of nano-storage materials in cold chain logistics of e-commerce fresh agricultural products," *Results in Physics*, vol. 13, p. 102049, 2019.
- [25] A. K. Thakur, S. K. Hazra, A. M. Saleque, S. Bhattarai, J.-Y. Hwang, and M. S. Ahamed, "Toward Sustainable Water Solutions: A Review of Nanomaterials for Solar-Driven Water Harvesting," *ACS ES&T Water*, vol. 4, no. 11, pp. 4741-4757, 2024.
- [26] Z. Sheykhan Nejad Fallah, M. Zangeneh, and N. Banaeian, "Evaluation of Kiwi Quality Indicators in the Drying Process by a Fixed Bed Dryer Equipped with Phase Change Materials," *Agricultural Mechanization*, vol. 9, no. 2, pp. 17-28, 2024. (in Persian)
- [27] J. H. Tan, Y. Y. Liew, R. Bahar, H. K. Jun, and J. Low, "Enhancing solar still productivity in tropical climate with conductive particle-assisted phase change material," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 279, p. 113227, 2025.
- [28] R. Kumar et al., "Phase change materials integrated solar desalination system: An innovative approach for sustainable and clean water production and storage," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 165, p. 112611, 2022.
- [29] C. Li, Y. Goswami, and E. Stefanakos, "Solar assisted sea water desalination: A review," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 19, pp. 136-163, 2013.
- [30] A. A. Omara, A. A. Abuelnuor, H. A. Mohammed, and M. Khiadani, "Phase change materials (PCMs) for improving solar still productivity: a review," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 139, pp. 1585-1617, 2020.
- این مواد با ذخیره‌سازی و آزادسازی به‌هنگام حرارت، به تنظیم مؤثر دما کمک کرده و وابستگی به منابع انرژی متعارف را کاهش می‌دهند. پیامد چنین بهینه‌سازی حرارتی، صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی در فرایندهای کشاورزی است. علاوه بر دستاوردهای فعلی، تداوم تحقیق و توسعه و آینده‌پژوهی در زمینه‌ی بهبود و تطبیق مواد تغییر فاز دهنده با نیازهای در حال تحول کشاورزی از اهمیت بسزایی برخوردار است. چنین رویکرد آینده‌نگرانه‌ای می‌تواند ضمن گسترش دامنه‌ی کاربردهای مواد تغییر فاز دهنده، پایداری بلندمدت این راهکارها را در مواجهه با چالش‌های پیش‌رو تضمین کند. در مجموع، مواد تغییر فاز دهنده نه صرفاً یک فناوری مدیریت حرارتی، بلکه یک عامل تحول‌زا در مسیر کشاورزی آینده به‌شمار می‌رود که با ارائه‌ی راهکارهای نوآورانه برای صرفه‌جویی انرژی و حفاظت از محیط‌زیست، زمینه‌ساز ارتقای پایداری در این حوزه است.

9- مراجع

- [1] Y. Cui, R. Gulfam, Y. Ishrat, S. Iqbal, and F. Yao, "Recent Progress of Phase Change Materials and Their Applications in Facility Agriculture and Related-Buildings—A Review," *Buildings*, vol. 14, no. 9, p. 2999, 2024.
- [2] J. Zhu, X. Zhang, W. Hua, J. Ji, and X. Lv, "Current status and development of research on phase change materials in agricultural greenhouses: A review," *Journal of Energy Storage*, vol. 66, p. 107104, 2023.
- [3] H. Mehling, "Use of phase change materials for food applications—State of the art in 2022," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 5, p. 3354, 2023.
- [4] D. Zou, X. Ma, X. Liu, P. Zheng, and Y. Hu, "Thermal performance enhancement of composite phase change materials (PCM) using graphene and carbon nanotubes as additives for the potential application in lithium-ion power battery," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 120, pp. 33-41, 2018.
- [5] H. Mehling and L. F. Cabeza, "Heat and cold storage with PCM," *Heat and mass transfer*, pp. 11-55, 2008.
- [6] L. Zhang et al., "Fundamental studies and emerging applications of phase change materials for cold storage in China," *Journal of Energy Storage*, vol. 72, p. 108279, 2023.
- [7] J. J. Espitia et al., "Solar Energy Applications in Protected Agriculture: A Technical and Bibliometric Review of Greenhouse Systems and Solar Technologies," *Agronomy*, vol. 14, no. 12, p. 2791, 2024.
- [8] S. Nishad and I. Krupa, "Phase change materials for thermal energy storage applications in greenhouses: A review," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 102241, 2022.
- [9] A. M. Nair, C. Wilson, M. J. Huang, P. Griffiths, and N. Hewitt, "Phase change materials in building integrated space heating and domestic hot water applications: A review," *Journal of Energy Storage*, vol. 54, p. 105227, 2022.
- [10] M. Marciukaitis, V. Katinas, and A. Kavaliauskas, "Wind power usage and prediction prospects in Lithuania," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 1, pp. 265-277, 2008.
- [11] S. Chen, Y. Zhu, Y. Chen, and W. Liu, "Usage strategy of phase change materials in plastic greenhouses, in hot summer and cold winter climate," *Applied Energy*, vol. 277, p. 115416, 2020.
- [12] Y. Gu, X. Zheng, Z. Zhou, G. Chen, S. Chen, and Q. Li, "Amphiphilic ionic liquid hydrogel electrolytes with high ionic conductivity towards dendrite-free ultra-stable aqueous zinc ion batteries," *Journal of Energy Storage*, vol. 89, p. 111892, 2024.
- [13] F. G. Montoya, A. García-Cruz, M. G. Montoya, and F. Manzano-Agugliaro, "Power quality techniques research worldwide: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 846-856, 2016.

and AI in Agriculture: Self-sufficiency in Food Production to Achieve Society 5.0 and SDG's Globally: Springer, 2023, pp. 75-96.

- [49] R. Ahmed, M. Ahamed, S. M. F. Islam, and M. T. Alam, "IoT Based Water Purification and Monitoring System Using Solar Energy," Faculty of Engineering, American International University–Bangladesh, 2024.
- [31] S. Shalaby, E. El-Bialy, and A. El-Sebaei, "An experimental investigation of a v-corrugated absorber single-basin solar still using PCM," *Desalination*, vol. 398, pp. 247-255, 2016.
- [32] S. Nasimi, M. Fakhroleslam, G. Zarei, and S. M. Sadrameli, "Passive energy-efficiency optimization in greenhouses using phase change materials; a comprehensive review," *Journal of Energy Storage*, vol. 90, p. 111762, 2024.
- [33] Y. He, R. Feng, S. Wang, X.-W. Wu, and G. Hu, "Design of a Passive Temperature Management House Using Composite Phase Change Materials," *Energy*, p. 134962, 2025.
- [34] B. Xiang and X. Zhang, "Advancements in the development of field precooling of fruits and vegetables with/without phase change materials," *Journal of Energy Storage*, vol. 73, p. 109007, 2023.
- [35] M. Calati, G. Righetti, C. Zilio, K. Hooman, and S. Mancin, "CFD analyses for the development of an innovative latent thermal energy storage for food transportation," *International Journal of Thermofluids*, vol. 17, p. 100301, 2023.
- [36] S. Tan and X. Zhang, "Preparation of organic ternary phase change materials for fruit and vegetable cold chain logistics," *Journal of Energy Storage*, vol. 108, p. 115067, 2025.
- [37] W. J. Luo, P. Negi, Y.-C. Chang, C. Zuo, and B. Panigrahi, "Performance Evaluation of Mof-Coated Desiccant-Assisted Intermittent Heat Pump Drying for Energy-Efficient Dehydration of Apple Slices," *Available at SSRN 5196293*.
- [38] G. Vasudevan, G. Muthuvairavan, S. K. Suraparaju, A. Yadav, M. Samykano, and S. K. Natarajan, "Exploring the role of phase change materials in low-temperature solar thermal applications: an extensive overview with challenges and opportunities," *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 1-33, 2025.
- [39] A. R. Al - Hilphy et al., "A pilot - scale rotary infrared dryer of shrimp (*Metapenaeus affinis*): Mathematical modeling and effect on physicochemical attributes," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 45, no. 6, p. e13945, 2022.
- [40] S. Singh, K. K. Gaikwad, and Y. S. Lee, "Phase change materials for advanced cooling packaging," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 16, pp. 845-859, 2018.
- [41] W. Aftab, X. Huang, W. Wu, Z. Liang, A. Mahmood, and R. Zou, "Nanoconfined phase change materials for thermal energy applications," *Energy & Environmental Science*, vol. 11, no. 6, pp. 1392-1424, 2018.
- [42] A. Jain, M. Ghosh, M. Krajewski, S. Kurungot, and M. Michalska, "Biomass-derived activated carbon material from native European deciduous trees as an inexpensive and sustainable energy material for supercapacitor application," *Journal of Energy Storage*, vol. 34, p. 102178, 2021.
- [43] S. Prasanth, S. Narayanan, N. Sivakumaran, and R. S. Rominus, "A hybrid technique to control superheater steam temperature in power plants using multi modeling and predictive sliding mode control," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 55, p. 102912, 2023.
- [44] M. Sadi, A. mohammad Behzadi, A. S. Alsagri, K. H. Chakravarty, and A. Arabkoohsar, "An innovative green multi-generation system centering around concentrating PVTs and biomass heaters, design and multi-objective optimization," *Journal of Cleaner Production*, vol. 340, p. 130625, 2022.
- [45] S. Agrawal et al., "Synthesis and water treatment applications of nanofibers by electrospinning," *Processes*, vol. 9, no. 10, p. 1779, 2021.
- [46] Z. Raji, A. Karim, A. Karam, and S. Khalloufi, "Adsorption of heavy metals: mechanisms, kinetics, and applications of various adsorbents in wastewater remediation—a review," *in Waste*, 2023, vol. 1, no. 3: MDPI, pp. 775-805.
- [47] B. COSKUN, U. N. Temel, and M. Bulut, "Investigation of thermal energy storage capacities of phase change material embedded different bio-based materials converted into biochar," *Physica Scripta*, 2025.
- [48] P. Kahandage, M. H. Seyar, R. Noguchi, and T. Ahamed, "Purification of agricultural polluted water using solar distillation and hot water producing with continuous monitoring based on iot," *in IoT*