



مروری بر نوآوری‌ها و تحولات اخیر در خشک‌کن‌های خورشیدی گلخانه‌ای

علی دلیران^۱، مرتضی تاکی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی ماشینهای کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران

*اهواز، کدپستی: ۶۳۴۱۷۷۳۶۳۷، mortezaataaki@gmail.com mtaki@asnrukh.ac.ir

چکیده

دنیای امروز با توجه به محدودیت منابع فسیلی و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های تجدیدناپذیر، در حال حرکت به سمت استفاده از منابع پاک و تجدیدپذیر است. انرژی خورشیدی یکی از این منابع بوده که به دلیل توزیع مناسب در سرتاسر دنیا و سازگاری با محیط‌زیست از اهمیت خاصی برخوردار است. خشک‌کردن محصولات کشاورزی زیر نور خورشید از اولین کاربردهای این انرژی می‌باشد. استفاده از این روش، تلفات بالا، بازدهی کم و کیفیت نامناسب محصول خشک‌شده را به دنبال دارد. در همین راستا محققان برای غلبه بر این مشکلات، انواع خشک‌کن‌های خورشیدی گلخانه‌ای را طراحی، ساخته و بررسی کرده‌اند. در این مطالعه به بررسی، طبقه‌بندی و معرفی خشک‌کن‌های گلخانه‌ای بر اساس معیارهای متفاوت پرداخته شده و سعی شده زمینه‌ساز آشنایی کامل خواننده با این فناوری را مهیا سازد. به‌طور کلی می‌توان گفت این مقاله برای محققان، کشاورزان و سرمایه‌گذارها یک منبع جامع از جدیدترین مطالعات انجام شده در حوزه خشک‌کن‌های گلخانه‌ای بوده که با هدف کمک به بهبود گسترش و صنعتی شدن این علم، گردآوری و تدوین شده است.

کلیدواژه‌گان: انرژی خورشیدی، خشک‌کن خورشیدی، گلخانه، خشک‌کن گلخانه‌ای

A review on recent innovations and developments in greenhouse solar dryers

Ali Daliran¹, Morteza Taki^{2*}

1. PhD Student, Department of Agricultural Machinery and Mechanization, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

2. Assistant Prof, Department of Agricultural Machinery and Mechanization, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

* P.O.B: 6341773637, Ahvaz, Iran, moortezaataaki@gmail.com, mtaki@asnrukh.ac.ir

Received: 15 May 2020 Accepted: 18 August 2020

Abstract

Today's world is moving towards the use of clean and renewable resources due to the limitation of fossil resources fuels and the environmental problems caused by the consumption of non-renewable fuels. Solar energy is one of these sources that has particular importance due to its proper distribution around the world and its compatibility with the environment. Drying the agricultural products under the sunlight is one of the first uses of this energy. The use of this method leads to the high losses, low efficiency, and poor quality of dried product. To overcome these problems, researchers have designed, built and studied the variety of greenhouse solar dryers. In this study according to different criteria, the introduction and classification of greenhouse dryers have been studied and there is attempt to provide the complete aquantane with this technology for reader. In general, this article is a comprehensive resource for researchers, farmers, and investors that it has been compiled to improve the expansion and industrialization of this science.

Keywords: Solar energy, solar dryer, greenhouse, greenhouse dryer



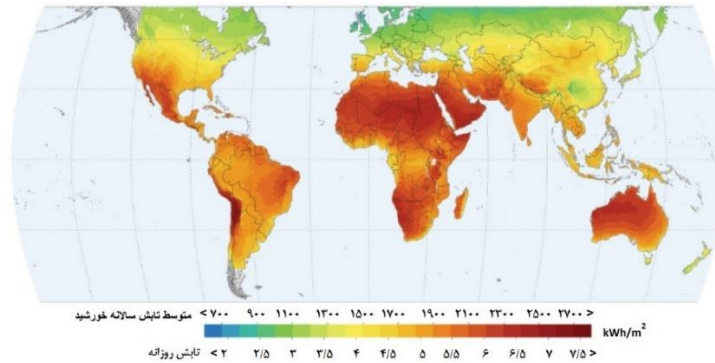
۱- مقدمه

جواب: مقدمه مقاله بصورت زیر بازنویسی شد (اضافه کردن بررسی

ادبی مرتبط با خشککن های گلخانه‌ای):

امروزه با توجه به مشکلات استفاده از سوخت‌های تجدیدناپذیر، به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر از قبیل انرژی خورشیدی و زیست‌توده از اهمیت بالایی برخوردار است. در میان این منابع، انرژی خورشیدی پرستفاده‌ترین منبع برای عملیات خشک‌کردن محسوب می‌شود به‌ویژه در مکان‌هایی که دسترسی

مناسبی به تابش خورشیدی دارند [۱]. کشور ایران همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود با عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۴۵ درجه شمالی دارای پتانسیل مناسبی برای استفاده از فناوری‌های خورشیدی هست (ایران در سال به‌طور متوسط ۲۸۰ روز آفتابی دارد). ۶۰ درصد از مساحت کل کشور را نواحی گرم و خشک تشکیل می‌دهند که در معرض شدت تابش خورشیدی بالایی هستند. مقدار متوسط سالانه شدت تابش خورشیدی روزانه در ایران ۱۸۰۰-۲۲۰۰ کیلو وات ساعت تخمین زده شده است [۲].



شکل ۱ نقشه جهانی تابش افقی [۲]

زمین، به‌صورت تابش مادون قرمز منجر به افزایش دمای داخلی گلخانه می‌شوند. از این گرما می‌توان برای اهداف گوناگون مانند پرورش محصولات، آبیاری، طیور و همچنین خشک‌کردن محصولات مختلف استفاده کرد. خشک‌کن‌های گلخانه‌ای معمولاً در گروه خشک‌کن‌های مستقیم (تابش مستقیم پرتوهای خورشیدی به محصول) و گاهی اوقات مرکب (استفاده از پیش‌گرم‌کن‌ها) دسته‌بندی می‌شوند که با توجه به میزان رطوبت محصول به‌صورت غیرفعال یا فعال طراحی می‌شوند [۱۳]. در حالت غیرفعال جریان هوا توسط اختلاف چگالی، فشار باد یا ترکیبی از هر دو به‌طرف قفسه‌های محصول به جریان درمی‌آید. در نوع فعال از فن دمنده یا مکند برای به جریان درآوردن سیال واسط استفاده می‌شود [۱۴].

اصول کار یک خشک‌کن گلخانه‌ای به گونه‌ای است که محصول روی سینی یا قفسه‌های داخلی قرار می‌گیرد بعد از دریافت تابش خورشیدی عبوری از پوشش خشک‌کن توسط محصول، هوای مرطوب از طریق همرفت اجباری یا اختیاری به بیرون منتقل می‌شود. نوع پوشش گلخانه با توجه به معیارهایی از قبیل هزینه، استحکام، پایداری در برابر امواج ماوراء بنفش و درصد انتقال نور انتخاب و تعیین می‌گردد. تهویه و تابش در یک خشک‌کن گلخانه‌ای دو فاکتور مهم در کنترل رطوبت و دمای داخلی هستند. تهویه بالا کاهش دما را به‌دنبال دارد در حالی که کاهش تهویه امکان دستیابی به حداکثر دمای ممکن و افزایش بازدهی فرایند خشک‌شدن محصول را به ما می‌دهد [۱۵].

به‌طور کلی خشک‌کن‌های گلخانه‌ای اقتصاسی از گلخانه‌های سنتی اصلاح شده هستند که برای کنترل جریان هوا مجهز به دریچه‌هایی با اندازه و موقعیت مناسب شده‌اند. از این رو می‌توان از آن‌ها برای خشک‌کردن در فصل گرم و کاشت در فصل معتدل یا سرد استفاده کرد. به‌کارگیری دو منظوره این فناوری منجر به کاهش هزینه و از نظر اقتصادی کاملاً کارآمد معرفی شده است [۱۶]. برخی پژوهش‌ها در مورد خشک‌کردن محصولات متفاوتی از قبیل لعل، انگور، گوجه‌فرنگی، و انگورفرنگی^۱ با استفاده از گلخانه‌های خورشیدی گزارش شده است [۱]. در هند از یک خشک‌کن گلخانه‌ای استوانه‌ای شکل برای

هر محصول کشاورزی با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی خود باید در شرایط مناسبی از رطوبت و دما نگهداری شود. دمای معقول برای خشک‌کردن اکثر محصولات کشاورزی در محدوده دمایی ۴۵ تا ۶۰ سانتی‌گراد ثبت شده است [۴]. عملیات خشک‌کردن روشی مناسب به‌منظور حفظ سلامت محصول در طول دوره انبارداری است که شامل کاهش آب محصول برای تولید یک ماده خشک و پایدار هست [۵]. این عملیات بیش‌تر روی محصولات کشاورزی متمرکز شده و در اکثر مطالعات به‌عنوان عملیاتی واحد تجزیه‌و‌تحلیل می‌گردد. موضوع خشک‌کردن با توجه به سطح بالای انرژی مورد نیاز همواره مورد توجه پژوهشگران زیادی بوده است [۶].

فرآیند خشک‌کردن با استفاده از تابش خورشیدی در فضای باز از زمان‌های بسیار دور مورد استفاده قرار گرفته است. این روش به دلایل برخی مسائل از قبیل: وجود گردوخاک، امراض و حشرات، حیوانات و پرندگان و بارندگی، پایین است [۸]. برای مقابله با این مشکلات، محققان روش‌های متفاوتی از قبیل اسپری کردن، روش‌های الکتریکی، مکانیکی و خشک‌کن‌های خورشیدی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در بین تمامی این روش‌ها، استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی به دلیل عملکرد و کیفیت بالا، حفظ سلامت محیط‌زیست، اشغال فضای کم‌تر و هزینه انرژی نزدیک به صفر، دارای ارجحیت است [۹]. در خشک‌کردن خورشیدی هدف قرار دادن محصول در شرایطی با گرمای بیش‌تر و رطوبت کم‌تر از محیط بوده تا افزایش فشار بخار رطوبت محصول و کاهش رطوبت نسبی هوای داخل خشک‌کن، منجر به افزایش ظرفیت حمل رطوبت هوا گردد [۷].

پژوهشگران انواع مختلفی از خشک‌کن‌های خورشیدی را با توجه به مسائل فنی و اقتصادی ارائه داده‌اند. در این میان، خشک‌کن‌های گلخانه‌ای به دلایلی از قبیل ساختار ساده، ظرفیت بالا، عملکرد بهینه و کیفیت مناسب محصول خشک شده به جایگزینی مناسب و کاربردی تبدیل شده‌اند [۱۰-۱۲]. گلخانه، محیطی محصور بوده که به تابش خورشیدی با طول موج کوتاه اجازه ورود می‌دهد. تابش خورشیدی بعد از ورود و برخورد با سطوح داخلی و

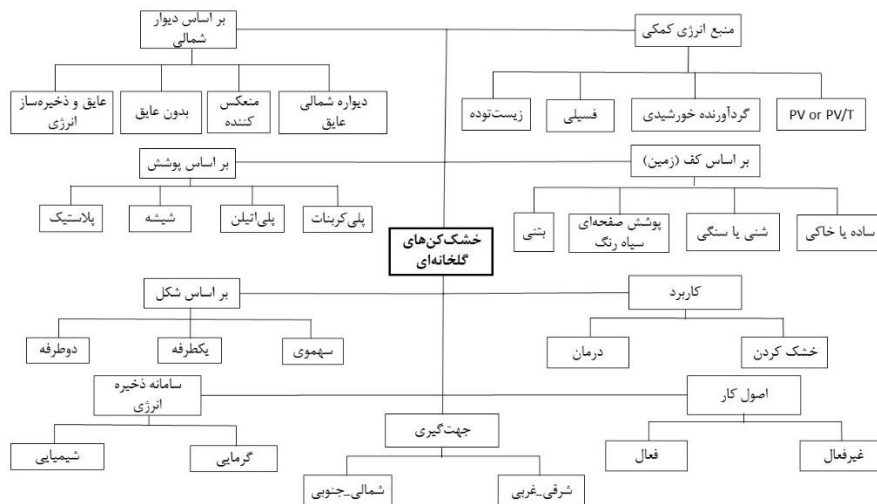
¹ Gooseberry



انواع ساختار، اصلاحات و نوآوری‌های جدید انجام شده است. شکل ۲ یک دسته‌بندی کلی از خشک‌کن‌های گلخانه‌ای را بر اساس پارامترهای مختلف نشان می‌دهد که به‌صورت جداگانه هر کدام در بخش بعد معرفی و بررسی می‌شوند.

خشک‌کردن انجیر و کدو تلخ استفاده شد. نتایج این بررسی کیفیت بالاتر محصول خشک‌شده نسبت به روش آفتاب باز را نشان داد [۱۷].

در این تحقیق، دسته‌بندی و معرفی خشک‌کن‌های گلخانه‌ای بر اساس معیارهای کاربردی با توجه به جدیدترین و بهترین مقالات منتشرشده در این حوزه انجام شده است. هدف ما آگاه کردن محققان، کشاورزان و سرمایه‌گذارهای داخلی و خارجی برای توسعه بیش‌تر این فناوری با توجه به



شکل ۲ دسته‌بندی کلی از انواع خشک‌کن‌های گلخانه‌ای [۹، ۸، ۱۲، ۱۳، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱]

بارگذاری این سامانه ۱۰۰ کیلوگرم انگور بود که در طی آزمایش مقدار ۸ کیلوگرم انگور زرد و سبزرنگ با هدف کاهش هزینه‌ها بارگذاری گردید. برای ارزیابی انتقال جرم و انرژی، داده‌هایی از قبیل مقدار تبخیر، رطوبت هوای داخلی و خارجی و دمای هوا به‌صورت ساعتی اندازه‌گیری و ثبت شد. نتایج تحلیل حرارتی نشان داد ضریب انتقال حرارت در انگور زرد (۴۵/۲۱-۰/۱) کیلووات بر مترمربع بیش‌تر از نوع سبز (۲۶/۳۱-۰/۱) هست که دلیل بر علت زودتر خشک شدن انگور زرد در مقایسه با نوع سبز بود. همچنین کیفیت محصول خشک شده در گلخانه، سایه و زیر نور خورشید با هم مقایسه شد. کیفیت رنگ انگور خشک شده در سایه بسیار بهتر از دو نوع دیگر گزارش گردید. برای اولین بار در فیلیپین، یک خشک‌کن خورشیدی در مقیاس صنعتی (۳×۳×۳) متر با هدف خشک‌کردن انبه، طراحی، ساخت و آزمایش شد [۲۵]. خشک شدن میوه در سه حالت گوشت، هسته و بذری در شرایط آفتابی، ابری و بارانی در یک دوره ۱۱ ماهه صورت گرفت. این خشک‌کن شامل ۳۶ قفسه چرخ‌دار و هر قفسه متشکل از ۵ سینی بود. سینتیک خشک شدن محصول توسط اندازه‌گیری تغییرات زمانی وزن، به‌عنوان پیش‌بینی کننده درصد رطوبت، مدل گردید. در این کار تغییرات وزنی محصول توسط فناوری بی‌سیم^۳ به دلیل قیمت مناسب، دقت (±۱ گرم) و کنترل بالا، ثبت شد. مقدار کاهش رطوبت برای گوشت، هسته و بذری به‌ترتیب ۶۱/۸۰۸، ۷۴/۵۲ و ۱۶/۱۲۰ گرم در ساعت اندازه‌گیری گشت. بخش‌های متفاوت این خشک‌کن در شکل ۳ نشان داده شده است.

۲- طبقه‌بندی خشک‌کن گلخانه‌ای بر اساس پارامترهای مختلف

جواب: متن مقاله بازنویسی شد (بازخوانی ادبی، علمی و اضافه کردن پژوهش‌های جدید):

در انتخاب، طراحی و ساخت یک خشک‌کن، مسائل مختلفی از قبیل اقتصادی، اقلیمی و تحقیقاتی نقش مؤثری دارند. به‌طور کلی، خشک‌کن‌های گلخانه‌ای را می‌توان بر اساس کاربرد، اصول کار، شکل سازه، جنس پوشش، کف سازه، دیواره شمالی، منبع انرژی کمکی، مواد ذخیره‌ساز و جهت‌گیری سازه دسته‌بندی کرد.

۲-۱- کاربرد

خشک‌کن‌های گلخانه‌ای بر اساس کاربرد، عموماً با دو هدف ایجاد فضای مناسب به‌منظور خشک‌کردن محصولات کشاورزی و درمان (کاهش عوامل بیماری‌زای موادی از قبیل لجن فاضلاب و کمپوست‌سازی) طراحی و ساخته می‌شوند [۲۱-۲۲].

در یک پژوهش، عملکرد یک خشک‌کن گلخانه‌ای جریان طبیعی برای خشک‌کردن شکر زرد^۱، به‌صورت تجربی و تئوری بررسی گشت [۲۳]. این خشک‌کن در ابعاد ۱/۲۰ × ۰/۷۸ متر با ارتفاع دیواره مرکزی و کناری، به‌ترتیب ۰/۴ و ۰/۶ متر، طراحی و ساخته شد. برای کمک به گردش جریان هوای طبیعی، در سقف این سازه یک پنجره مستطیلی شکل به مساحت ۰/۰۷۲۲ مترمربع تعبیه گردید. پارامترهای ورودی برای کار شبیه‌سازی توسط شبکه هوش مصنوعی شامل دمای محیط، تابش خورشیدی و رطوبت نسبی بود. عملکرد رضایت‌بخش این سامانه توسط نتایج تئوری و تجربی گزارش گردید. بارنوال و تیوری [۲۴]، یک خشک‌کن گلخانه‌ای دوطرفه را برای خشک‌کردن انگور در پارک انرژی خورشیدی دهلی‌نو در هند، توسعه دادند. ظرفیت

³ Wireless weighing scale

¹ Jaggery

² Peels, kernels and seeds

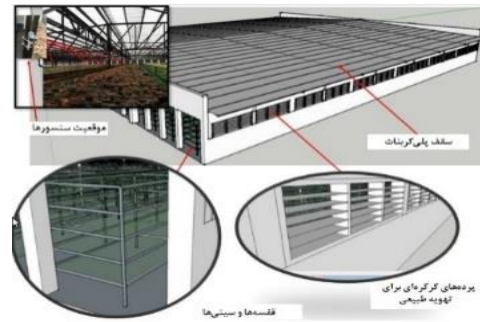


۲-۲- اصول کار

خشک‌کن‌های گلخانه‌ای بر اساس مکانیسم تهویه یا اصول کار به دو نوع فعال (همرفت اجباری) و غیرفعال (همرفت طبیعی) دسته‌بندی می‌شوند. در همرفت طبیعی، انتقال جرم و انرژی از طریق اصول ترموسیفون اتفاق می‌افتد و جریان هوای گرم و مرطوب داخلی در اثر اختلاف چگالی از طریق دودکش و پنجره خارج می‌شود. در صورتی که در همرفت اجباری از مکنده یا دمنده الکتریکی برای به گردش درآوردن سیال هوا استفاده می‌شود [۸]. خشک‌کن‌های فعال کیفیت و عملکرد بهتری نسبت به نوع غیرفعال دارند اما به دلیل نیاز به منبع انرژی برای مناطق روستایی و دور افتاده مناسب نیستند [۱۲].

تان و همکاران خشک شدن موفق آمیز سه محصول موز، گوجه و بامیه را در یک خشک‌کن دوطرفه همرفت طبیعی گزارش دادند. در این کار متوسط اختلاف دما بین خشک‌کن و محیط ۱۰ درجه ثبت شد [۲۸]. در یک آزمایش، عملکرد خشک‌کن گلخانه‌ای خورشیدی دوطرفه تحت جریان همرفت طبیعی و اجباری توسط کومار و همکاران [۲۹] مقایسه گردید. خشک‌کن در ابعاد $1/5 \times 1/01$ مترمربع با پوشش پلی کربنات با قطر ۳ میلی‌متر طراحی و ساخته شد. حداکثر دما در همرفت طبیعی و اجباری به ترتیب $60/40$ و $40/41$ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری گشت. میزان رطوبت نسبی هوا در همرفت اجباری $19/8$ درصد کمتر از همرفت طبیعی بود. راندمان خشک‌کن در حالت اجباری ۳۱ درصد بیشتر از اختیاری گزارش شد. مرداد و همکاران [۳۰] در مصر عملکرد سه خشک‌کن استوانی گلخانه‌ای را برای خشک کردن گیاه نعنا بررسی کردند. هر تونل با طول ۲m، عرض ۱m و ارتفاع ۰/۸m، از پوشش پلاستیکی شفاف با ضخامت ۲۰۰ میکرومتر طراحی و ساخته شد. آزمایش در چهار وضعیت؛ (۱) سه نرخ متفاوت دبی جرمی هوا؛ $1/05$ ، $2/10$ و $3/15$ مترمکعب بر دقیقه، (۲) دو حالت دمنده؛ جریان مداوم و متناوب (۳) دو وضعیت بارگیری نعنا؛ با و بدون ساقه (۴) سه نرخ بارگذاری $4/2$ و 6 کیلوگرم بر مترمربع صورت گرفت. بهترین عملکرد در دبی جرمی $2/10$ مترمکعب بر دقیقه، دور متناوب و حجم بارگذاری ۴ کیلوگرم بر مترمربع به دست آمد. در بخش تئوری این کار، استفاده از معادلات ریاضی تعادل گرمایی برای پیش‌بینی عملکرد خشک‌کن با نتایج رضایت بخشی همراه شد.

گرادیان دمایی و عملکرد یک گلخانه دوطرفه به ابعاد $1/5m \times 1/2m \times 1/2m$ ، با پوشش پلی‌کربنات (UV) با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی تحت جریان همرفت طبیعی و اجباری بررسی گردید [۳۱]. شبیه‌سازی برای پوشش با دو قطر ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومتر در سه نرخ دبی جرمی $0/5$ ، $1/5$ و $2/5$ کیلوگرم بر ثانیه انجام شد. حداکثر دما برای دبی جرمی $2/5$ و پوشش ۲۰۰ میکرومتر به دست آمد. با توجه به نتایج، افزایش دبی جرمی کاهش دمای هوای داخلی را به دنبال داشت در مقابل تغییر قطر پوشش تأثیر چندانی بر گرادیان دمایی نشان نداد، به طوری که افزایش ضخامت از ۱۰۰ به ۲۰۰ میکرومتر تنها باعث افزایش دمای هوا از ۱ به ۲ درجه سانتی‌گراد گردید. این مطالعه نشان داد دمای هوای به دست آمده در همرفت اجباری بیشتر از طبیعی است. چرچی و داس [۳۲] مقدار ضریب انتقال حرارت گرما (h_c) را برای خشک کردن انگور در یک گلخانه دوطرفه تحت همرفت طبیعی و اجباری بررسی کردند. این دو محقق از دو مدل پرسپترون چندلایه (MLP)^۳ و درخت تصمیم (DT)^۴ برای پیش‌بینی این ضریب استفاده کردند. برخلاف DT، الگوریتم MLP دارای کاربردی متداول برای پیش‌بینی مقادیر



شکل ۳ خشک‌کن گلخانه‌ای صنعتی

از خشک‌کن‌های گلخانه‌ای علاوه بر خشک کردن محصولات کشاورزی می‌توان برای اهداف دیگری از جمله ضد عفونی کردن مواد، استفاده کرد. در مراکش برای از بین بردن عوامل بیماری‌زای لجن فاضلاب و کاهش حجم آن، یک خشک‌کن گلخانه‌ای دوطرفه طراحی و آزمایش گشت [۲۶]. عملیات خشک کردن طی دو دوره گرم و سرد برای شرایط اقلیمی خشک بررسی گردید. در طی آزمایش تغییرات محتوای رطوبتی و ابعاد هندسی لجن فاضلاب با استفاده از اسکن دیجیتالی به‌طور مداوم یادداشت شد. محتوای رطوبت لجن در دوره گرم از ۴ کیلوگرم (water/kg) به ۰/۸ کیلوگرم (water/kg) و در دوره سرد به ۰/۲ کیلوگرم (water/kg) تنها در ۷۲ ساعت کاهش یافت. در هر دو دوره درمان، کاهش ۸۰ درصدی حجم اولیه لجن اتفاق افتاد. نتایج گویای این است که استفاده از این روش نسبت به روش مرسوم مزایای مالی زیادی برای مدیریت فاضلاب به دنبال دارد و به‌طوری منجر به کاهش هزینه‌های بارگیری، حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی فاضلاب می‌شود. سالیانه با به‌کارگیری این فناوری برای درمان هر تن فاضلاب حداقل ۵ یورو صرفه‌جویی می‌شود. استارچویچ و همکاران در یک پژوهش خلافتانه از یک خشک‌کن گلخانه‌ای دوطرفه برای درمان و خشک کردن زیست‌توده در فیلدراشتات، آلمان استفاده کردند [۲۷]. این محققان در این سامانه از یک رباط برای تسهیل در بارگیری، مخلوط کردن و تخلیه زیست‌توده بهره گرفتند. طراحی و اجرای این پروژه با استفاده از ابزارهای مهندسی به کمک کامپیوتر (CAE)^۱ و دسکتاپ مجازی (VDI 2221)^۲ صورت گرفت. ارزش فنی رباط و ارزش اقتصادی آن به ترتیب $0/76$ و $0/77$ تخمین زده شد که نشان دهنده یک طراحی خوب و مقرون‌به‌صرفه است. استفاده از رباط در این سامانه منجر به افزایش عملکرد سامانه در مقایسه با روش‌های معمول گردید که بهبود در مسائل زیست‌محیطی را به دنبال خواهد داشت. با توجه به نتایج می‌توان گفت ترکیب روش VDI و ابزارهای اختصاصی CAE یک ابزار طراحی مناسب و کاربردی مبتنی بر نوآوری در پردازش زیست‌توده گلخانه‌ای است. شکل ۴ موقعیت رباط را در داخل گلخانه نشان می‌دهد.



شکل ۴ خشک‌کن گلخانه‌ای برای زیست‌توده



فصلنامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

۱۴۰۰ سال هشتم، شماره دوم پاییز و زمستان

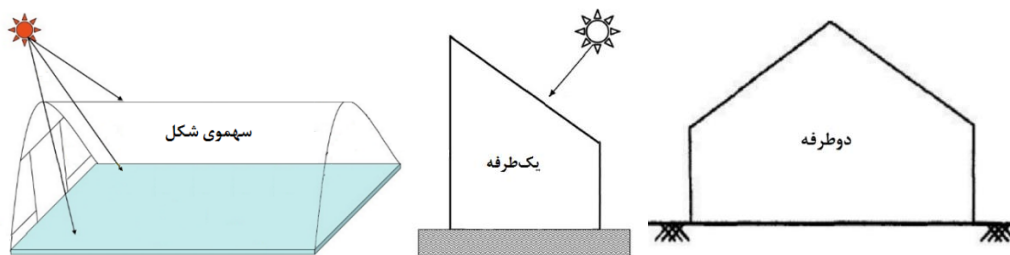
³ Multilayer perceptron

⁴ Decision tree

¹ Computer Aided Engineering

² Virtual Desktop

دمای ۴۰، ۴۵ و ۴۹ درجه سانتی‌گراد با دبی جرمی ۰/۳ متر بر ثانیه و شار تابشی ۷۰۰ وات بر مترمربع بررسی گشت. بازدهی انرژی این سامانه ۶۳ تا ۷۳ درصد گزارش شد. نتایج نشان داد افزایش دبی جرمی هوای ورودی به علت نیاز به مصرف انرژی بیشتر تلفات انرژی و کاهش بازدهی انرژی را به دنبال دارد. پرکاش و کومار [۳۵] در شهر مالانای هند آنالیز زیست‌محیطی و مدل‌سازی فرآیند خشک شدن گوجه‌فرنگی را در یک خشک‌کن گلخانه‌ای دوطرفه انجام دادند. ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی با استفاده از پارامترهایی از قبیل دوره بازگشت سرمایه، زمان بازپرداخت انرژی، انرژی تجسم‌یافته، انتشار CO₂ و اعتبار کربن صورت گرفت. کاهش رطوبت اولیه محصول از ۹۶ درصد (بر پایه‌تر) به ۹/۰۹ درصد در ۱۵ ساعت اتفاق افتاد که بازگویی صرفه‌جویی ۵۵/۷۱ درصدی زمان خشک شدن نسبت به روش سنتی است. در این کار، انرژی تجسم‌یافته^۱ ۶۲۸/۷۳ کیلووات ساعت، انتشار CO₂ ۱۷/۶ کیلوگرم در سال و زمان بازپرداخت انرژی (EPBT)^۲ ۱/۱۴ سال به دست آمد. همچنین اعتبار کربن تخمین زده شده از ۱۲۵۶۱/۷۰ تا ۵۰۲۴۵/۴۹ روپیه هند (INR) در طول عمر سازه متفاوت بود و اعتبار کربن^۳ خالص ۳۸/۰۶ تن محاسبه شد. ضریب تبیین مدل ریاضی ۰/۹۹۸۵ و دوره بازگشت سرمایه نیز ۱/۹ سال گزارش گردید. عملکرد تجربی و شبیه‌سازی فرآیند خشک شدن موز و چشالو^۴ در خشک‌کن گلخانه‌ای سهموی شکل بررسی شد [۳۶]. خشک شدن موز و چشالو هر کدام در ۵ مرحله انجام شد. دمای خشک‌کن برای چشالو از ۳۱ تا ۵۸ و برای موز از ۳۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد متغیر بود. با استفاده از این خشک‌کن زمان خشک شدن برای هر دو محصول نسبت به روش سنتی تقریباً نصف شد. در بخش شبیه‌سازی این پژوهش از سیستم معادلات دیفرانسیل جزئی برای بیان انتقال جرم و انرژی استفاده گشت. حل عددی این معادلات با کمک نرم‌افزار فورتن نسخه ۶/۵ صورت گرفت؛ نتایج کار تئوری این پژوهش توسط داده‌های تجربی تأیید گردید.



شکل ۵ متداول‌ترین اشکال خشک‌کن‌های گلخانه‌ای

در مقایسه با روش سنتی زمان خشک شدن محصول از رطوبت اولیه ۵۳ درصد به ۷ درصد در تابستان و زمستان ۹۹ و ۱۷۳ ساعت کاهش یافت. میزان انتشار سالانه کربن ۱۵۱۸ کیلوگرم، کاهش خالص کربن ۶۷۸ تن و اعتبار کربن کل ۱۸۶۴۵ دلار محاسبه گشت. مقدار انرژی تجسم‌یافته و دوره بازگشت سرمایه نیز به ترتیب ۱۸۳۰۳ کیلووات‌ساعت و ۳/۳ سال تخمین زده شد.

۲-۵- بر اساس نوع پوشش

گلخانه‌های خشک‌کن خورشیدی محیطی بسته با پوشش شفاف یا نیمه شفاف هستند. یک پوشش مناسب به تابش خورشیدی با طول موج کوتاه اجازه ورود می‌دهد و با جلوگیری از خروج پرتوهای مادون‌قرمز، دمای مناسب برای

ضریب انتقال حرارت خشک‌کن‌ها است. با مقایسه نتایج این دو مدل و با بررسی خطای میانگین مربعات (RMSE=۰/۰۹۰۳) مشخص گردید که در همرفت اجباری الگوریتم DT یک مدل موفق‌تر از الگوریتم MLP در برآورد مقادیر h_c است. در مقابل، الگوریتم MLP در همرفت اختیاری با خطای میانگین ۰/۰۸۱۵ موفق‌تر از DT بود. میانگین ضریب انتقال حرارت در همرفت اختیاری و اجباری به ترتیب ۱/۲۴ و ۱/۱۰ تخمین زده شد که نشان می‌دهد ضریب انتقال حرارت در همرفت اختیاری، ۱۱/۳٪ بیشتر از اجباری هست. در این مطالعه مشخص گشت که مدل DT و MLP می‌توانند برای پیش‌بینی صحیح ضریب انتقال حرارت همرفتی در طراحی خشک‌کن‌ها استفاده شوند.

۲-۳- بر اساس شکل سازه

خشک‌کن‌های گلخانه‌ای بر اساس ساختار عمدتاً به سه شکل؛ یک‌طرفه، دوطرفه و سهموی ساخته می‌شوند. دوطرفه و سهموی شکل، بیشترین کاربرد را دارند. نوع سهموی نسبت به انواع دیگر بیشترین مقدار تابش خورشیدی ورودی را دارد در صورتی که گردش هوا داخلی در نوع دوطرفه بهتر صورت می‌گیرد [۸، ۱۹]. شکل ۵ نمایی از این سه سازه را نشان می‌دهد. پورسونامان و همکاران با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، عملکرد خشک‌کن گلخانه‌ای در سه شکل نیم‌کره، دوزنقه‌ای و مثلثی تحت جریان همرفت اجباری و طبیعی بررسی کردند. این محققان بهترین عملکرد را برای نوع دوزنقه‌ای در حالت بدون بار گزارش دادند [۳۳]. عملکرد یک خشک‌کن گلخانه‌ای یک‌طرفه جریان منفعل با هدف بررسی تغییرات انرژی فرآیند خشک شدن محصول در ترکیه با عرض جغرافیایی ۳۸/۲۴ N و طول ۲۷/۵۰ E مطالعه گردید [۳۴]. در این کار راندمان انرژی به‌عنوان تابعی از دمای کاری و مدت‌زمان خشک شدن در نظر گرفته شد. آزمایش تحت جریان ایزوبار با انتقال همزمان جرم و انرژی بین هوا و جامد صورت گرفت. خشک شدن محصول با رطوبت اولیه ۳۰ تا ۳۲ درصد تا رطوبت ثانویه ۱۳ درصد در سه

۲-۴- جهت‌گیری

کمیت تابش خورشیدی علاوه بر شکل گلخانه به‌شدت تحت تأثیر جهت‌گیری آن نیز قرار دارد. این دو پارامتر نقش مهمی در تعیین دمای گلخانه دارند. به‌طور متداول با توجه به موقعیت جغرافیایی محل از دو جهت‌گیری شرقی-غربی و شمالی-جنوبی استفاده می‌شود [۳۷]. یک گلخانه خشک‌کن تونلی در ابعاد ۴m*۴m*۱۰m متر، با جهت‌گیری شرقی-غربی برای خشک‌کردن نارگیل در شهر پلانچی هند ساخته و از نقطه‌نظر اقتصادی و زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفت [۳۸]. دمای داخلی این خشک‌کن در تابستان و زمستان به ترتیب ۳۳-۶۰ و ۲۶-۴۶ درجه سانتی‌گراد گزارش گردید.

³ Carbon credit

⁴ Longan

¹ Embodied Energy

² Energy payback time

دیواره شمالی نیمه عایق استفاده شد. زمان خشک شدن کاغذها از رطوبت اولیه ۵۳/۸۵ درصد به رطوبت مطمئن ۹/۹۶ درصد، ۵ ساعت طول کشید. سه شاخص‌های اقتصادی این پروژه شامل؛ ارزش فعلی خالص، نسبت منفعت به سود و دوره برگشت سرمایه به ترتیب ۱۸۳۱۷۴۸ روپیه هند، ۱/۹ و ۱/۳۳ سال تخمین زده شد. پژوهشگران چین و هند در مطالعه‌ای مشترک عملکرد یک خشک‌کن گلخانه‌ای دوطرفه را تحت جریان همرفت اجباری و اختیاری با استفاده از پوشش پلی‌اتیلن مقاوم شده (ماوا-بنفش) و پوشش زده چکه بررسی کردند. حداکثر راندمان حرارتی (۳۰/۶۴ درصد) و بازدهی اکزرژی (۰/۰۹ درصد) در حالت فعال با پوشش ضد چکه به دست آمد [۴۵].



شکل ۶ خشک‌کن گلخانه‌ای (a) سهموی و (b) سهموی با باله‌های تقویت‌شده

۶-۲- بر اساس کف سازه

کف خشک‌کن می‌تواند با در نظر گرفتن مسائل بهداشتی، اقتصادی و کاربردی در انواع زمین خالی، بتنی، ماسه‌ای، سنگی و ورقه‌های PVC دسته‌بندی شود. در کشور هند عملکرد حرارتی یک خشک‌کن گلخانه نیمه‌دایره‌ای با جریان همرفت طبیعی در سه حالا کف بتن، سنگ و ماسه‌ای بررسی گردید [۴۶]. با توجه به نتایج استفاده از کف سنگی به عنوان ماده ذخیره ساز انرژی، نسبت به دو نوع دیگر بهترین عملکرد را به همراه داشت. کاهش رطوبت نارگیل از ۵۲ به ۷ درصد (وزنی) با استفاده از کف بتنی ۷۸ ساعت، سنگی ۵۳ ساعت و شنی ۶۶ ساعت طول کشید. در مقایسه با روش آفتاب باز کف بتن ۵۵٪، شن ۶۲٪ و سنگ ۶۹٪ زمان خشک شدن را کاهش داد. پرکاش و همکاران [۴۷] تجزیه و تحلیل انرژی و اکزرژی را روی یک گلخانه اصلاح شده (MGD)^۱ انجام دادند. در این مطالعه مقایسه استفاده از سه روش کف معمولی، کف پوشیده با ورق پلی‌اتیلن سیاه‌رنگ (PVC) و کف رنگ‌شده (سیاه) تحت جریان همرفت اجباری و اختیاری، انجام شد. نتایج گزارش شده حاکی از آن بود که کف پوشیده شده با PVC نسبت به دو نوع دیگر به دلیل کاهش نوسانات حرارتی و رطوبت نسبی داخلی، دارای عملکرد حرارتی بهتر هست. راندمان اکزرژی تحت جریان هوای اجباری، قبل و بعد از ظهر به ترتیب ۲۹ و ۸۶ درصد و در همرفت اختیاری ۳۰ و ۷۸ درصد محاسبه گردید.

خشک‌کردن محصول را تأمین می‌کند. انتخاب پوشش باید با جنبه‌های ساختاری و کاربردی گلخانه سازگار باشد [۳۲، ۳۹]؛ در همین راستا انواع پوشش شیشه، پلاستیک، پلی‌اتیلن، پلی‌کربنات و پوشش‌های مقاوم شده در برابر امواج UV متداول است.

تیواری و همکاران [۴۰] عملکرد یک خشک‌کن گلخانه‌ای دوطرفه را با پوشش پلاستیکی و مساحت کف $1/20m \times 0/78m$ در هند آزمایش کردند. این محققان از نرم‌افزار متلب برای آنالیز انرژی و پیش‌بینی دمای داخلی خشک‌کن، سطح میگو و مقدار آب تبخیر شده با و بدون دمنده بهره گرفتند. با توجه به نتایج این پژوهش راندمان اکزرژی لحظه‌ای در ساعات اولیه به دلیل دمای هوای کاری پایین نسبت به مراحل بعدی کمتر گزارش شد. نتایج کار تئوری و تجربی هم‌خوانی مناسبی با هم داشت به طوری که ضریب همبستگی $0/99-$ و $0/94-$ و انحراف جذر میانگین مربعات $e=2/4-$ ، $1/10-$ محاسبه گشت. خشک شدن میگو با و بدون دمنده به ترتیب ۹ و ۱۲ ساعت طول کشیده است. در یک پژوهش [۴۱] دو ساختار خشک‌کن گلخانه‌ای (۱ سهموی ۲ سهموی با باله‌های تقویت‌کننده با پوشش پلی‌کربنات طراحی، ساخت و آزمایش گردید. شکل ۶ نمای بیرونی این دو سازه را نشان می‌دهد. نتایج مدل ریاضی استفاده شده برای پیش‌بینی دمای هوای خشک‌کن و مقدار کاهش رطوبت ورقه‌های پلاستیکی (محصول) با نتایج تجربی تطابق خوبی داشت. هزینه ساخت خشک‌کن باله‌دار ۷ درصد بیشتر بود ولی استفاده از باله به علت افزایش سطح تماس تابش خورشیدی با پوشش، بازدهی گرمایی را ۱۵ درصد افزایش و زمان خشک‌شدن را در مقایسه با نوع بدون باله ۵۰ درصد کاهش داد. دوره بازگشت سرمایه این کار ۱ سال تخمین زده شد. نوع خاصی از خشک‌کن گلخانه‌ای در مقیاس کوچک جهت نصب روی پشت‌بام توسط مردم هند طراحی و آزمایش شد [۴۲]. ساختار خشک‌کن از چهارچوب آلومینیومی، پوشش شیشه با ضخامت ۳ میلی‌متر، دو دمنده برای تهویه و سه ماژول PV نیمه شفاف هر کدام به مساحت 1×4 مترمربع تشکیل شده بود. در این پژوهش بازدهی گرمایی کل، بازدهی اکزرژی کل، تأثیر دبی جرمی هوا و ضریب فشردگی بر بازدهی در حالت بدون بار بررسی گشت. یافته‌های این مطالعه نشان داد افزایش ضریب فشردگی ماژول منجر به کاهش انرژی حرارتی و افزایش انرژی الکتریکی می‌شود و افزایش دمای کاری ماژول کاهش بازدهی الکتریکی را به دنبال دارد. مقدار انرژی حرارتی کل $1/84$ و $3/26$ کیلووات ساعت محاسبه گشت همچنین افزایش دبی جرمی تأثیر مثبت بر عملکرد حرارتی سامانه نشان داد. این مطالعه استفاده از خشک‌کن‌های گلخانه‌ای پشت بامی را کاملاً اقتصادی معرفی کرد. یک خشک‌کن تونلی با ابعاد $1/8m \times 2/5m \times 8m$ ، با پوشش پلی‌اتیلن برای خشک‌کردن گوجه‌فرنگی در ترکیه طراحی و آزمایش شد [۴۳]. زمان خشک شدن در این سامانه در مقایسه با روش آفتاب باز از رطوبت اولیه $93/35$ تا رطوبت ثانویه $11/50$ درصد، $26/9$ درصد کمتر بود. در بخش تئوری این پژوهش از یک رگرسیون غیرخطی برای سنجیدن ۱۰ مدل مختلف خشک شدن لایه‌نازک بهره گرفته شد. نتایج نشان داد مدل انتشار در مقایسه با سایر مدل‌ها به علت داشتن کای اسکوار کمتر، ضریب تعیین بیشتر و کاهش خطای جذر مربعات مطابقت بهتری با نتایج تجربی دارد. سودا و راتور عملکرد یک گلخانه نیمه‌استوانه‌ای با مساحت $122/95$ مترمربع را برای خشک‌کردن 1500 عدد کاغذ دست‌ساز (810 کیلوگرم) بازیابی شده از زباله‌های سلولوزی، طراحی و آزمایش کردند [۴۴]. در این سازه برای افزایش راندمان حرارتی از پوشش پلی‌اتیلن مقاوم شده (UV)، کف بتنی سیاه‌رنگ همراه با عایق پشم‌شیشه و

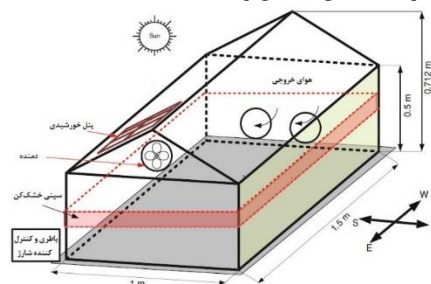
¹ Modified Greenhouse Dryer

بین آن با عایق پشم‌شیشه پر شده بود برای درمان این مشکل استفاده کردند. خشک شدن انگور از رطوبت اولیه ۸۵٪ تا رطوبت ثانویه ۱۶٪، در دمای کاری ۵۵-۷۰ درجه سانتی‌گراد هفت روز طول کشید. این مطالعه نشان داد به‌کارگیری دیوار شمالی عایق افزایش عملکرد سامانه را به‌دنبال داد.

بررسی و تحلیل انرژی و اکرژی یک گلخانه‌ای نیمه تونلی برای خشک کردن ۶۰۰ کیلوگرم پنبه جراحی در هند انجام شد [۵۳]. دیواره شمالی و کف این خشک‌کن‌ها با استفاده از پشم‌شیشه، عایق و به رنگ مشکی درآمد. ورقه‌های نیمه شفاف پلی‌اتیلن مقاوم شده (UV) با ضخامت ۲۰۰ میکرومتر به‌عنوان پوشش لحاظ شد. مدل پیش‌بینی شده ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد با کار تجربی اختلاف داشت. بازدهی انرژی در کار تجربی از ۱/۷۹-۱/۵۱ درصد و در کار تئوری از ۲/۲۳-۱/۲۹۸ درصد متفاوت بود همچنین بازدهی انرژی در کار تجربی و تئوری به‌ترتیب ۰/۰۷۲-۰/۳۹ درصد و ۰/۰۵۸-۰/۳۰ درصد محاسبه گردید. دوره بازگشت سرمایه این پژوهش با در نظر گرفتن جایگزینی برای سوخت دیزل (LDO)^۲ و گاز (LPG)^۳ به‌ترتیب ۳/۰۳ و ۲/۲۶ سال تخمین زده شد. از دیدگاه زیست‌محیطی این طرح، استفاده از هر تونل بجای سامانه LDO منجر به کاهش انتشار ۱۲/۱۵ تن کربن در سال می‌شود.

استفاده از منعکس‌کننده در دیوار شمالی خشک‌کن‌های خورشیدی راهی برای افزایش بازدهی حرارتی این سامانه‌ها در نیم‌کره جنوبی است. عبدالطیف و همکاران در طراحی و ساخت شکل جدیدی از خشک‌کن گلخانه‌ای یک‌طرفه؛ با ایجاد تله حرارتی (بازتاب‌کننده) به تقویت اثر گلخانه‌ای متمرکز شدند [۵۴]. دیوار جنوبی و دو دیوار شرقی و غربی از پلی‌کربنات تقویت شده با ضخامت ۶ میلی‌متر و دیواره شمالی از تیرهای آهن ۶cm×۶cm ساخته شد. برای افزایش بازدهی خشک‌کن دیوار شمالی با لایه بازتاب‌کننده از جنس ورق نیکل-کروم ۲ میلی‌متر پوشانده شد. با استفاده از دیوار شمالی منعکس‌کننده شدت تابش خورشیدی ۳۶/۳۰ درصد و دمای هوای داخلی ۶۰/۹۰ درصد افزایش یافت. متوسط شدت تابش خورشیدی اندازه‌گیری شده در بیرون و داخل ۳/۱۸۸ و ۳/۳۸۳ کیلووات ساعت و ضریب انتقال مؤثر تابش ۶۵/۲۱ درصد محاسبه گردید. رطوبت نسبی داخلی در مقایسه با محیط، ۳۸/۹۳ درصد کمتر اندازه‌گیری شد. عملکرد یک خشک‌کن گلخانه‌ای دوطرفه به مساحت ۶m×۴m با استفاده از دیواره شمالی شیب‌دار منعکس‌کننده، تحت جریان همرفت طبیعی و اجباری آزمایش گردید [۵۵]. جنس صفحه منعکس‌کننده از فلز آلومینیوم با ضخامت ۵۰ میکرومتر و ضریب بازتاب ۰/۹۳ بود. بازتاب‌کننده با شیبی مناسب در جلوی دیوار شمالی شفاف با هدف انعکاس نور بر روی محصول قرار گرفت. استفاده از این صفحه تحت جریان همرفت طبیعی، دمای گلخانه و محصول (کدو تلخ)^۴ را به‌ترتیب ۶/۷-۱ و ۴-۱ درجه سانتی‌گراد و تحت همرفت اجباری ۴/۵-۱ و ۳-۱ درجه سانتی‌گراد افزایش داد. به‌کارگیری صفحه بازتاب‌کننده زمان خشک شدن را در همرفت اختیاری ۱۳/۱۳ درصد و اجباری ۱۶/۶۷ درصد کاهش داد. نایاک و تیوری تجزیه‌وتحلیل انرژی و اکرژی یک خشک‌کن گلخانه‌ای با دیواره شمالی ساخته شده از مصالح ساختمانی را انجام دادند [۵۶]. آن‌ها برای به‌گردش درآوردن هوا و تأمین نیاز الکتریکی سامانه از یک مکنده ۱۲ ولتی و یک پانل خورشیدی استفاده کردند. پانل با زاویه ۴۵ درجه به سمت جنوب قرار گرفت. بین نتایج محاسبات عددی و داده‌های تجربی هم‌خوانی مناسبی وجود داشت؛ به‌طوری‌که انحراف معیار ریشه مربع و ضریب همبستگی برای دمای سلول، صفحه پشتی تدارک و هوای

یک خشک‌کن گلخانه‌ای سهموی متشکل از ورقه‌های پلی‌کربنات، ۹ مکنده، ۳ ماژول خورشیدی ۵۰ وات و ظرفیت بارگذاری یک تن محصول تازه، برای خشک کردن ۵۰۰ کیلوگرم فلفل آزمایش شد [۴۸]. برای حفظ بهداشت محصول، کف این گلخانه با مساحت ۱۶۰ m² از بتن ساخته شد. فلفل خشک شده در این خشک‌کن از نظر کیفیت رنگ و بازاریابی بسیار بهتر از محصول خشک شده به روش سنتی بود. در این کار زمان خشک شدن محصول ۲ روز کمتر از روش سنتی (۵ روز) طول کشید. طبق گزارش‌ها این نوع خشک‌کن گلخانه‌ای به دلیل کیفیت و عملکرد مناسب در دستور کار برنامه ترویجی وزارت تایلند قرار گرفته و بیش از ده نوع از این گلخانه در مقیاس‌های متفاوت برای خشک کردن و فرآوری محصولات کشاورزی در نقاط مختلف این کشور احداث شده است. پرکاش و همکارش در یک پژوهش [۴۹] تأثیر به‌کارگیری کف بتونی با پوشش سیاه‌رنگ (به عنوان ماده ذخیره ساز انرژی) و دیواره شمالی عایق را بر عملکرد خشک‌کن گلخانه‌ای بررسی کردند. خشک‌کن متشکل از یک فن ۱۲ وات، ۶ ماژول فتوولتائیک (۱ وات) و یک باطری جهت ذخیره‌سازی انرژی اضافی در ساعات آفتابی بود. نتایج نشان داد استفاده از کف بتونی با پوشش سیاه و دیوار شمالی عایق به علت کاهش تلفات حرارتی و رطوبت نسبی داخلی، افزایش دمای داخلی و بهبود عملکرد خشک‌کن را نتیجه می‌دهد. شکل ۷ شماتیک رسم شده از این گلخانه را نشان می‌دهد. در تایلند برای خشک کردن فلفل قرمز یک خشک‌کن گلخانه‌ای خورشیدی سهموی شکل به مساحت ۸/۰m×۵/۵m، مجهز به تهویه PV^۱ و پوشش پلی‌کربنات آزمایش گردید [۵۰]. در این سامانه از چهار دسته سینی برای بارگیری ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم فلفل قرمز بهره گرفته شد. نتایج نشان داد استفاده از کف بتی کاهش نوسانات گرمایی در سه منطقه بالا، میانه و پایین گلخانه را به دنبال دارد. دمای کاری این خشک‌کن در روزهای آفتابی ۶۰ تا ۶۵ درجه سانتی‌گراد و مدت بازپرداخت سرمایه این کار ۳/۳۶ سال تخمین زده شد.



شکل ۷ شماتیک گلخانه خشک‌کن با کف پوش تیره

۲-۷- بر اساس کاربری دیوار شمالی

با توجه به اینکه در نیم‌کره جنوبی اکثر تلفات حرارتی خشک‌کن گلخانه‌ای از طریق دیواره شمالی اتفاق می‌افتد در همین راستا محققان تلاش‌های زیادی برای حل این مشکل کرده‌اند این راه‌حل‌ها شامل استفاده از دیوار شمالی عایق، منعکس‌کننده، منعکس‌کننده شیب دار، ذخیره‌ساز انرژی و مات است [۵۱]. راتهوره و همکارش [۵۲] عملکرد یک خشک‌کن گلخانه‌ای نیمه‌استوانه‌ای را برای خشک کردن انگور آزمایش کردند. خشک‌کن با مساحت ۳۷/۵ مترمربع متشکل از چارچوب فلزی پوشیده شده با صفحات پلی‌اتیلن، دمنده و ۵ دودکش بود. در این خشک‌کن از ۵ سینی برای بارگذاری ۳۲۰ کیلوگرم انگور بهره گرفته شد. این محققان دیواره شمالی را عامل اصلی تلفات حرارتی (۳۲ درصد از کل مساحت خشک‌کن) ذکر کردند و از یک صفحه فلزی دولایه که

³ Liquefied petroleum gas

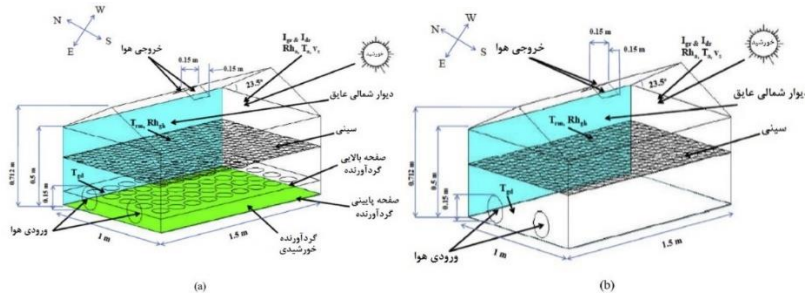
⁴ Bitter melon

¹ PV-ventilated

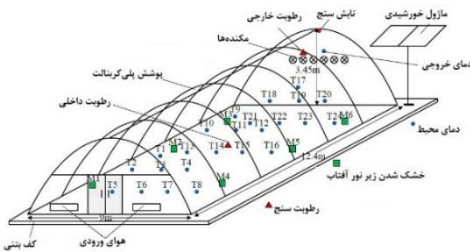
² Light diesel oil



همرفتی، ضریب عملکرد سنجیده شد. حداکثر مقدار فاکتور استفاده از گرما گلخانه با و بدون گردآورنده ۰/۶۸ و ۰/۶۱ و حداکثر ضریب عملکرد با گردآورنده ۰/۱۹ و بدون گردآورنده ۰/۸۶ به دست آمد. بیشترین دما (۶۶/۲) درجه سانتی‌گراد) برای خشک‌کن مجهز به گردآورنده خورشیدی اتفاق افتاد. این پژوهش نشان داد استفاده از دیواره شمالی عایق کاهش تلفات حرارتی و افزایش عملکرد را نتیجه می‌دهد.



شکل ۸ خشک‌کن گلخانه‌ای با دیوار شمالی عایق با (a) و بدون (b) نصب گردآورنده خورشیدی تخت هوای



شکل ۹ ساختار گلخانه و موقعیت حس‌گرهای اندازه‌گیری و تجهیزات

شیام و همکاران [۱۴] در کاری تحقیقاتی از PV/T به‌عنوان سقف یک خشک‌کن گلخانه‌ای یک‌طرفه با هدف استفاده همزمان از گرما و الکتریسیته استفاده کردند. آن‌ها مدل‌سازی حرارتی و اعتبارسنجی تجربی را برای کار خود انجام دادند. این سامانه متشکل از: چهارچوب آلومینیوم، پوشش شیشه‌ای ۵ میلی‌متری، ۸ ماژول نیمه شفاف (هر ماژول با توان $35 W_p$ و سطح مؤثر $1.2m \times 0.56m$)، باتری ۱۸ واتی به همراه کنترل‌کننده شارژ و اینورتر بود. برای بررسی دبی جرمی بهینه از ۴ فن ۲۰/۵ کیلوواتی به‌منظور تامین هوای خشک‌کن استفاده گشت. تعداد بهینه دمده ۳ عدد تعیین شد. نتایج نشان داد افزایش دبی جرمی باعث کاهش دمای سلول‌های خورشیدی و هوای داخلی و بهبود بازدهی الکتریکی PV/T می‌شود. این تحقیقات نشان داد استفاده از سلول‌های خورشیدی راهی برای تامین نیاز الکتریکی سامانه (مناطق دورافتاده) است.

عملکرد یک خشک‌کن گلخانه‌ای کلیسا شکل با استفاده از گردآورنده تخت هوایی در تونس مطالعه گردید [۶۲]. خشک‌کن گلخانه‌ای در ابعاد $3m \times 4m \times 3m$ و از جنس پلاستیکی با ضخامت ۰/۰۰۳ متر ساخته شد. گردآورنده خورشیدی با طول ۲ و عرض ۱ متر با شیب ۳۷ درجه به سمت جنوب مستقر شد. گردآورنده دارای یک پوشش شیشه‌ای با ضخامت ۰/۰۰۴ متر بوده که با فاصله ۰/۰۵ متر از صفحه جاذب دندان‌دار مستقر گردید. برای کاهش تلفات حرارتی از قسمت پشت گردآورنده، عایق پلی‌اورتان با ضخامت ۰/۰۵ متر با فاصله ۰/۰۴ متر از صفحه جاذب قرار گرفت. فاصله بین عایق و صفحه جاذب، صفحه جاذب و پوشش شیشه‌ای دو کانال عبور هوا را تشکیل دادند. در این مکانیزم، هوا از طریق یک مکنده سانتریفیوژ از قسمت پایین این دو کانال مکیده شده و بعد از تبادل حرارتی با صفحه جاذب از قسمت بالای خشک‌کن وارد و به طرف سینی محصول هدایت می‌شد. استفاده از این سامانه

داخلی به ترتیب ۱۷/۵۸-۷/۰۵ و ۰/۹۷-۰/۹۵ محاسبه گشت. اکزرژی خروجی کل این سامانه ۷۲۸/۸ کیلووات ساعت و بازدهی اکزرژی ۰/۰۴ به دست آمد. یک خشک‌کن گلخانه‌ای دوطرفه با ابعاد $1m \times 1m \times 0.5m$ تحت جریان همرفت اختیاری در تایلند طراحی، ساخته و آزمایش گشت [۵۷]. عملکرد خشک‌کن با دیواره شمالی عایق در دو حالت با و بدون نصب گردآورنده خورشیدی در کف سازه بررسی گردید (شکل ۸). کیفیت کار خشک‌کن از طریق مؤلفه‌هایی از قبیل ضریب انتشار، ضریب افت گرما، ضریب انتقال حرارت

۲-۲- بر اساس منبع انرژی کمکی

استفاده از مکانیزم همرفت اجباری در نقاط دور افتاده نیاز به منبع توان الکتریکی مستقل دارد استفاده از انواع سلول‌های خورشیدی (PV) یکی از راه‌های غلبه بر این مشکل است [۵۸]. از دیگر نگرانی‌های مهم در به‌کارگیری سامانه‌های خشک‌کن خورشیدی این است که تنها در ساعات آفتابی می‌توان از آن‌ها استفاده کرد که ممکن است منجر به کاهش عملکرد و حتی پایین آمدن کیفیت محصول شود. برای تولیدگران تجاری، قابلیت اعتماد و تداوم عملیات خشک‌کردن جهت حفظ تعادل عرضه و تقاضای بازار مهم است. از این رو پشتیبانی این سامانه‌ها با انواع منبع گرمایش کمکی، مهم و اجتناب‌ناپذیر است [۵۹]. به‌طور کلی می‌توان این سامانه‌ها را بر اساس منبع انرژی کمکی به انواع فسیلی (مشتقات مایع و گاز، زیست‌توده) و خورشیدی (سلول‌ها و گردآورنده‌های خورشیدی) دسته‌بندی کرد.

در تایلند یک خشک‌کن گلخانه‌ای سهمی‌وار در ابعاد $9m \times 12.4m \times 2.4m$ با پوشش پلی‌کربنات و کف بتنی برای خشک‌کردن فندق ساخته و آزمایش گردید [۶۰]. در این کار برای به‌گردش درآوردن هوا از شش فن ۱۵ وات DC و دو ماژول ۵۰ واتی بهره گرفته شد (شکل ۹). محصول روی شش ردیف هر کدام با ظرفیت ۷۳۰ کیلوگرم مستقر گشت. زمان خشک شدن در دمای کاری متغیر از ۳۰ تا ۶۵ درجه سانتی‌گراد، ۵ روز طول کشید. پیش‌بینی مقدار انتقال گرما و رطوبت با حل معادلات دیفرانسیل جزئی از طریق روش تفاضل محدود صورت گرفت. این محققان با توجه به نتایج، روش تئوری خود را به‌عنوان ابزاری مناسب جهت به‌کارگیری در پژوهش‌های دیگر پیشنهاد دادند. در پژوهش دیگر بررسی فراینده خشک شدن ورقه‌های لاستیک طبیعی در خشک‌کن گلخانه‌ای از طریق مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی و اعتبارسنجی آن توسط آزمایش عملی صورت گرفت [۶۱]. خشک‌کن گلخانه‌ای سهمی‌وار با عرض ۹ متر، طول ۲۷ متر و ارتفاع ۳ متر از پوشش پلی‌کربنات ساخته شد. ۹ دمده و سه ماژول الکتریکی (PV) برای برقراری جریان هوای اجباری استفاده گشت. در هر مرحله آزمایش ۷۵۰ کیلوگرم ورقه لاستیکی روی تیرهای موازی نصب شده در داخل خشک‌کن، بارگذاری گشت. متوسط دمای هوای کاری این سامانه ۳۲-۵۵ درجه سانتی‌گراد گزارش گردید. هم‌خوانی معقول کار تجربی و تئوری عملکرد مناسب این سامانه را تأیید کرد.



فصلنامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو - سال هشتم، شماره دوازدهم پاییز و زمستان ۱۴۰۰

۳۵ ساعت به رطوبت ثانویه ۰/۱۴ برگی و ۰/۸۲ ریشه‌ای رسید. دمای کاری این سامانه ۴۱ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. تلفات ذخیره‌سازی محصول خشک شده با این روش ۱/۶۸ درصد کمتر از روش آفتاب باز و عملکرد آن نیز ۵/۲ درصد بیشتر بود. از دیدگاه اقتصادی مزیت اصلی این روش نسبت به روش سنتی امکان برداشت محصول در روزهای بارانی، حفظ کیفیت و ارزش اقتصادی محصول است. نسبت B/C (منفعت به هزینه) ۴/۶ و دوره بازگشت سرمایه ۵ سال تخمین زده شد. عملکرد یک خشک‌کن گلخانه‌ای قفسه‌ای برای خشک‌کردن زنجبیل به‌عنوان یک گیاه دارویی در مالزی بررسی شد [۶۷]. این خشک‌کن متشکل از ۱۴۴ سینی، هر کدام به ابعاد ۰/۵m×۰/۵m×۰/۰۴ چهار دمنده هر کدام با قدرت ۸۰ وات، مشعل و مبدل حرارتی بود. در این کار از چوب به‌عنوان سوخت بخاری زیست‌توده استفاده شد. آزمایش در دو ظرفیت بارگذاری ۲۱ و ۶۰ کیلوگرم و بدون بار صورت گرفت. این طراحی جریان یکنواخت هوا با انحراف معیار ۲/۳۲ و توزیع مناسب رطوبت با مقدار ۰/۳۸ درصد در تمامی قفسه‌ها به دنبال داشت. بهترین عملکرد برای ظرفیت ۶۰ کیلوگرم در دمای ۴۷/۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ ساعت ثبت گردید. راندمان خشک‌کردن و انرژی مصرفی کل به ترتیب ۰/۰۸ و ۲۹ مگاژول بر کیلوگرم محاسبه شد.

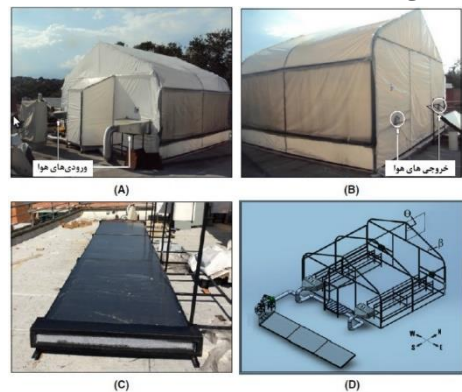
جانجایی [۶۸] یک خشک‌کن سهموی را برای خشک‌کردن گوجه‌فرنگی در تایلند توسعه داد. این محقق برای جبران کمبود انرژی حرارتی خشک‌کن در روزهای ابری و بارانی از یک مشعل گازسوز LPG ۱۰۰۰ کیلوواتی بهره گرفت. شکل ۱۱ تصویری از این مشعل همراه با کانال انتقال گرما به زیر سینی‌های خشک‌کن را نشان می‌دهد. از معادلات دیفرانسیل برای توزیع گرما و رطوبت محصول در طول فرایند خشک شدن استفاده شد. دمای کاری خشک‌کن از ۳۵ تا ۶۵ درجه سانتی‌گراد متغیر بود. مدت‌زمان خشک شدن محصول ۲-۳ روز کمتر از روش آفتاب باز گزارش گردید. بین نتایج تئوری و عملی این کار توافق خوبی وجود داشت. چان و همکاران [۶۹] در جاکارتا عملکردی خشک‌کن گلخانه‌ای استوانه‌ای را برای خشک‌کردن شلتوک برنج بررسی کردند. اجزای اصلی خشک‌کن استوانه‌ای شامل؛ (۱) دمنده (۲) قیف تغذیه (۳) مخزن LPG (۴) محفظه شفاف (۵) نقاله پنوماتیک (۶) قیف گیرنده بود. آزمایش در دو حجم بارگذاری متفاوت انجام شد. در آزمایش اول با دمای کاری ۵۰/۱ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی (هوای داخل) ۲۱/۷۳ درصد، ۱۰۴ کیلوگرم شلتوک بعد از ۵ ساعت از رطوبت ۲۸/۴ به ۱۴/۳ درصد رسید. در آزمایش دوم با دمای کاری ۴۶/۹ درجه و رطوبت نسبی ۲۷/۷ درصد، رطوبت ۲۰۰ کیلوگرم شلتوک بعد از ۸ ساعت از ۲۷/۶ به ۱۴/۳ کاهش یافت. افزایش حجم بارگذاری باعث ارتقاء بازدهی گرمایی از ۲۲/۴ به ۳۱/۷ درصد شد.



شکل ۱۱ خشک‌کن سهموی با (a) مشعل LPG و (b) کانال هوای

یکی از مشکلات خشک‌کردن خورشیدی در کشورهای جنوب شرق آسیا بالا بودن رطوبت نسبی هوا به علت بارندگی زیاد است. ادغام پمپ حرارتی با

ترکیبی برای خشک‌کردن فلفل قرمز و انگور در مقایسه با روش سنتی زمان خشک‌کردن را به ترتیب ۷ و ۲۶ ساعت کاهش داد. دوره بازگشت سرمایه این پژوهش ۱/۶ سال تخمین زده شد. از نظر اقتصادی با توجه به طول عمر تقریبی این سامانه (۲۰ سال) اجرای این طرح کاملاً توجیه‌پذیر است. هائو و همکاران [۶۳] تجزیه و تحلیل انرژی، اکرژی، اقتصادی و محیطی یک خشک‌کن گلخانه‌ای یکطرفه مرکب را انجام دادند. این محققان کاهش نوسانات دمایی را به علت استفاده از گردآورنده خورشیدی دو منظوره (آب و هوا) گزارش کردند که این موضوع کاهش زمان خشک شدن و افزایش کیفیت محصول خشک شده را نتیجه داد. محققین تایلندی و بنگلادشی [۶۴] عملکرد یک خشک‌کن با سقف یکپارچه‌شده با گردآورنده خورشیدی را برای خشک‌کردن فلفل و گل قرمز، بررسی کردند. این خشک‌کن در ابعاد ۱۲m×۹m×۲/۵m ترکیب شده با سیستم گردآورنده خورشیدی صفحه تخت هوایی، از جنس پلی‌کربنات ساخته شد. هر مرحله آزمایش با بارگیری ۲۰۰ کیلوگرم محصول مطابق با استانداردهای بین‌المللی صورت گرفت. کاهش رطوبت گل قرمز از ۹۰ به ۱۸ درصد (بر پایه‌تر) در ۲۷ ساعت، در حالی که خشک شدن فلفل از ۸۰ به ۱۸ درصد در ۲۴ ساعت آفتابی اتفاق افتاد. بین داده‌های تئوری و تجربی همخوانی قابل قبولی وجود داشت. دوره بازگشت سرمایه این کار ۵ سال تخمین زده شد. رمان و همکارانش [۶۵] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)¹ یک گلخانه کلیسا شکل مجهز به گردآورنده خورشیدی تخت هوایی (شکل ۱۰) را بررسی کردند و از داده‌های تجربی برای معتبرسازی این کار بهره گرفتند. محاسبات عددی برای دو مدل (۱) مطابق با کار تجربی انجام شده (مدل واقعی) (۲) مدل اصلاح شده تئوری، انجام شد. هدف از مدل اصلاح شده کاهش حجم گلخانه از طریق کاهش ارتفاع در دیواره‌های جانبی و بررسی تاثیر آن بر عملکرد خشک‌کن بود. نتایج حل نشان داد کاهش دیواره‌ها منجر به کاهش ۳۶/۵ درصدی حجم گلخانه، افزایش انرژی جنبشی از ۱/۲۷ به ۳/۸ مترمربع بر مجذور ثانیه و افزایش ۱۱ درصدی دما شد. ۹۵ درصد حجم مدل تصحیح شده دارای یکنواختی دمای مناسب جهت خشک‌کردن با کیفیت و سرعت بالاتر از مدل واقعی بود. این کار اعتباری بر قابل اعتماد بودن نرم‌افزار CFD در انجام کارهای تحقیقاتی و جلوگیری از اتلاف زمان و هزینه است.



شکل ۱۰ (A)، نمای جلویی؛ (B)، نمای عقب؛ (C)، گردآورنده خورشیدی؛ (D)، طرح آزمایشی

یک خشک‌کن گلخانه‌ای در ابعاد ۳m×۴m همراه با سیستم گرمایشی کمکی زیست‌توده (چوب‌سوز) در اندونزی طراحی و نصب شد [۶۶]. در این سامانه از دو دسته قفسه چوبی برای بارگذاری ۱۰۸ کیلوگرم پیاز استفاده شد. ۱ تن پیاز قرمز با رطوبت اولیه ۰/۸۷ برگی و ۰/۸۶ ریشه‌ای (wb) در مدت‌زمان

¹ Computational fluid dynamic

فودولی و همکاران [۷۱] طراحی جدیدی از یک خشک‌کن گلخانه‌ای را برای خشک کردن گریبه‌ماهی (۲۰۰ کیلوگرم) در مالزی انجام دادند. اجزاء اصلی این سامانه شامل؛ گردآورنده لوله خلاء، گرم‌کن برقی، دمنده، مخازن آب و محفظه گلخانه بود. زمان خشک شدن در دمای کاری ۴۴ درجه سانتی‌گراد از رطوبت اولیه ۷۳ درصد به رطوبت مطمئن ۳۰ درصد (وزنی)، ۱۸ ساعت طول کشید. کل انرژی مورد نیاز ۲۹۴/۹۸ کیلووات ساعت محاسبه گشت که ۶۰ درصد از کل این انرژی توسط انرژی خورشیدی و مابقی از طریق گرم‌کن الکتریکی تأمین شد. متوسط مقدار انرژی و دوره بازگشت سرمایه به ترتیب ۴۶ درصد و ۱ سال گزارش گردید.

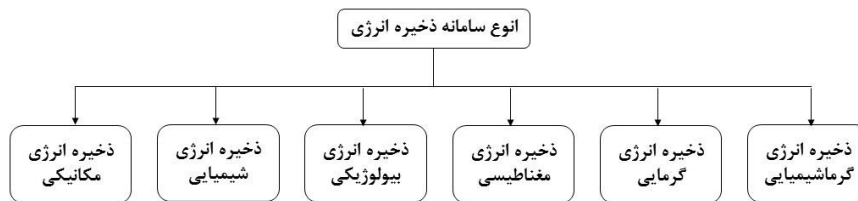
۹-۲- مواد ذخیره‌ساز انرژی

یکی از مشکلات انرژی خورشیدی دسترسی در زمان‌های محدود بوده که استفاده بهتر از این انرژی در صورت ذخیره آن امکان‌پذیر است. در همین راستا محققین سعی بر طراحی انواع سامانه‌های ذخیره انرژی را داشته‌اند یک دسته‌بندی کلی از انواع سیستم ذخیره انرژی در شکل ۱۳ ارائه شده است [۱۸]. در میان این منابع، نوع گرمایی و الکتریکی رایج‌ترین روش ذخیره انرژی در خشک‌کن‌های گلخانه‌ای است.

خشک‌کن خورشیدی راهی جدید برای کاهش این ناسازگاری است. سام و همکاران عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی دوطرفه، مجهز به پمپ حرارتی را برای خشک کردن چای جاوا و چمن مار در مالزی بررسی کردند [۷۰]. در شکل ۱۲ پمپ حرارتی مورد نظر با دبی جرمی ۰/۲۵-۰/۵۰ متر بر ثانیه نشان داده شده است. استفاده از این پمپ منجر به کاهش ۱۰ تا ۱۵ درصدی رطوبت نسبی داخلی و کاهش باز جذب آب توسط محصول در طول دوره خشک‌شدن شد. طراحی این نوع مکانیزم عمل علاوه بر کاهش ۱۰ درصدی زمان خشک شدن، نوسانات دمایی و رطوبت نسبی را نیز به حداقل رساند.



شکل ۱۲ پمپ حرارتی استفاده شده در خشک‌کن گلخانه



شکل ۱۳ دسته‌بندی کلی انواع سامانه ذخیره انرژی [۱۸]

۱. صرفه‌جویی در مصرف منابع تجدیدناپذیر و کمک به حفظ سلامت محیط‌زیست از طریق کاهش انتشار آلاینده‌هایی از قبیل CO₂
۲. کیفیت محصولات خشک‌شده از نظر مزه، رنگ و مواد مغذی بسیار بهتر از روش سنتی است.
۳. کاهش تلفات محصول در بازه زمانی خشک‌شدن محصول در اثر عوامل نامساعد جوی و محیطی.
۴. صرفه‌جویی در هزینه‌های حمل و نقل به علت کاهش حجم در محصول یا کمپوست.
۵. این تکنولوژی می‌تواند علاوه بر محصولات کشاورزی برای خشک کردن آبریان (ماهی و میگو)، کالاهای صنعتی (ورقه‌های دست‌ساز کاغذی و پلاستیکی)، زیست توده و همچنین درمان لجن فاضلاب استفاده شود.
۶. قابلیت طراحی و اجرا در مقیاس صنعتی و خانگی برای نصب بر روی پشت‌بام، مزرعه و منطقه صنعتی.

۴- مراجع

- [1] Z. Azaizia, S. Kooli, I. Hamdi, W. Elkhali, and A. A. Guizani, Experimental study of a new mixed mode solar greenhouse drying system with and without thermal energy storage for pepper, *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 1972-1984, 2020.
- [2] F. A. Ahmad, Valuation of solar power generating potential in Iran desert areas, *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, vol. 22, no. 6, p. 967, 2018.
- [3] A. Tiwari, A Review on Solar Drying of Agricultural Produce, *Journal of Food Processing & Technology*, vol. 7, no. 9, 2016.
- [4] O. Chatta, A. Sharma, and A. Gupta, Green House Drying: A Comprehensive Review, *International Journal of Engineering Technology Science and Research*, vol. 5, no. 3, pp. 325-333, 2018.

سامانه ذخیره انرژی گرمایی بیشترین مقدار بازدهی را نسبت به روش‌های دیگر دارد [۷۲]. یک سامانه ذخیره انرژی گرمایی می‌تواند انرژی خورشیدی و حرارتی اضافی روزانه را برای مدت زمان کوتاه یا فصلی ذخیره کند [۷۳]. از آنجا و همکاران [۱] در تونس آزمایشی تجربی روی یک خشک‌کن گلخانه خورشیدی ترکیبی، متشکل از (۱) گلخانه خورشیدی (۲) دو عدد جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت هوایی (۳) یک واحد ذخیره‌ساز انرژی را انجام دادند. پارافین به‌عنوان ماده تغییر دهنده جهت ذخیره انرژی استفاده شد. استفاده از پارافین در مقایسه با عدم بکارگیری آن منجر به افزایش دما (۷/۵) درجه سانتی‌گراد) و کاهش ۱۸/۶ درصدی رطوبت نسبی در تمام طول شب گشت. زمان خشک‌شدن فلفل قرمز در مقایسه با روش سنتی (۷۵ ساعت)، با استفاده از گلخانه خشک‌کن خورشیدی با و بدون مواد تغییر دهنده به ترتیب ۴۵ و ۲۰ ساعت کاهش یافت. پژوهشگران برای خشک کردن گوجه فرنگی در آکاندا از یک سامانه خشک‌کن مرکب از (۱) خشک‌کن گلخانه‌ای نیمه‌استوانه‌ای (۲) سامانه همرفت اجباری فتوولتائیک (۳) سامانه ذخیره انرژی ترکیب شده با گردآورنده خورشیدی، استفاده کردند. نتایج موفقیت آمیز بودن استفاده از سنگ گرانیته به عنوان مواد ذخیره‌ساز انرژی را گزارش داد [۷۴].

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله معرفی و دسته‌بندی خشک‌کن‌های گلخانه‌ای در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی، بر اساس معیارهای اصلی مطالعات صورت گرفته انجام شد. مهم‌ترین دستاوردها و نتایج مهم این مطالعات به شرح ذیل است.



- weighing scale, *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 13, no. 22, pp. 15933–15943, 2018.
- [26] M. O. Belloulid, H. Hamdi, and L. Mandi, Solar Greenhouse Drying of Wastewater Sludges Under Arid Climate, *Waste and Biomass Valorization*, 2016.
- [27] N. Starcevic et al., Development of a robot for biomass handling in a solar greenhouse dryer, *Agricultural Engineering International: CIGR Ejournal*, vol. IX, no. Manuscript PM 07 010, pp. 1–8, 2007.
- [28] P. P. Thant, T. Nwe, and A. K. Zaw, Thermal Analysis of a Greenhouse Dryer, *Engineering and Technology Research*, vol. 8, no. 8, pp. 356–362, 2019.
- [29] K. Anil, P. Om, K. Ajay, and T. Abhishek, Experimental Analysis of Greenhouse Dryer in No-Load Conditions, *Environmental Research And Development*, vol. 7 no. 4, April-June, 2013.
- [30] M. M. Morad, M. A. El-Shazly, K. I. Wasfy, and H. A. M. El-Maghawry, Thermal analysis and performance evaluation of a solar tunnel greenhouse dryer for drying peppermint plants, *Renewable Energy*, vol. 101, pp. 992–1004, 2017.
- [31] M. Purusothaman and T. N. Valarmathi, Computational fluid dynamics analysis of greenhouse solar dryer, *International Journal of Ambient Energy*, vol. 40, no. 8, pp. 894–900, 2019.
- [32] K. N. Çerçi and M. Daş, Modeling of heat transfer coefficient in solar greenhouse type drying systems, *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 18, 2019.
- [33] M. Purusothaman, T. N. Valarmathi, and P. S. Santhosh, CFD Analysis of Greenhouse Solar Dryer with Different Roof Shapes, *5th International Conference on Science Technology Engineering and Mathematics*, ICONSTEM 2019, vol. 1, pp. 408–412, 2019.
- [34] L. Ozgener and O. Ozgener, Exergy analysis of drying process: An experimental study in solar greenhouse, *Drying Technology*, vol. 27, no. 4, pp. 580–586, 2009.
- [35] O. Prakash and A. Kumar, Environomical Analysis and Mathematical Modelling for Tomato Flakes Drying in a Modified Greenhouse Dryer under Active Mode, *International Journal of Food Engineering*, 2014.
- [36] S. Janjai et al., Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana, *Solar Energy*, vol. 83, no. 9, pp. 1550–1565, 2009.
- [37] N. Choab, A. Allouhi, A. El Maakoul, T. Kousksou, S. Saadeddine, and A. Jamil, Review on greenhouse microclimate and application: Design parameters, thermal modeling and simulation, climate controlling technologies, *Solar Energy*, vol. 191, no. August, pp. 109–137, 2019.
- [38] S. Ayyappan, Performance and CO₂ mitigation analysis of a solar greenhouse dryer for coconut drying, *Energy and Environment*, vol. 29, no. 8, pp. 1482–1494, 2018.
- [39] D. Briassoulis, D. Waaijenberg, J. Gratraud, and B. Von Eslnr, Mechanical properties of covering materials for greenhouses: Part 1, general overview, *Journal of Agricultural and Engineering Research*, vol. 67, no. 2, pp. 81–96, 1997.
- [40] G. N. Tiwari, T. Das, C. R. Chen, and P. Barnwal, Energy and exergy analyses of greenhouse fish drying, *International Journal of Exergy*, vol. 6, no. 5, pp. 620–636, 2009.
- [41] K. Jitjack, S. Thepa, K. Sudaprasert, and P. Namprakai, Improvement of a rubber drying greenhouse with a parabolic cover and enhanced panels, *Energy and Buildings*, vol. 124, pp. 178–193, 2016.
- [42] S. Tiwari and G. N. Tiwari, Thermal analysis of photovoltaic-thermal (PVT) single slope roof integrated greenhouse solar dryer, *Solar Energy*, vol. 138, pp. 128–136, 2016.
- [43] K. Sacilik, R. Keskin, and A. K. Elicin, Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato, *Journal of Food Engineering*, vol. 73, no. 3, pp. 231–238, 2006.
- [44] M. S. Sevda and N. S. Rathore, Performance evaluation of the semicylindrical solar tunnel dryer for drying handmade paper, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 1–19, 2010.
- [45] S. Subramani, D. Sivakumar, N. Thirumalai, and M. George, Energy and exergy analysis of greenhouse drying of ivy gourd and turkey berry, *Thermal Science*, vol. 24, no. 1 Part B, pp. 645–656, 2020.
- [46] S. Ayyappan, K. Mayilsamy, and V. V. Sreenarayanan, Performance improvement studies in a solar greenhouse drier using sensible heat storage materials, *Heat and Mass*
- [5] O. Badaoui, S. Hanini, A. Djebli, B. Haddad, and A. Benhamou, Experimental and modelling study of tomato pomace waste drying in a new solar greenhouse: Evaluation of new drying models, *Renewable Energy*, vol. 133, pp. 144–155, 2019.
- [6] T. Ramirez, Y. Meas, and K. Gottschalk, Energy interaction of sub processes in drying value chain using exergy waste. Study case: Drying and greenhouse growing of tomato, *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 1437–1446, 2014.
- [7] V. Gupta and R. Varshney, A Review on Developments in Solar Greenhouse Dryers, *International Journal of Applied Science & Technology*, Vol. 10 & 11, No. 01 & 02, 2016.
- [8] O. Prakash and A. Kumar, Solar greenhouse drying: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 905–910, 2014.
- [9] P. Singh, V. Shrivastava, and A. Kumar, Recent developments in greenhouse solar drying: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, no. October 2017, pp. 3250–3262, 2018.
- [10] A. G. M. B. Mustayen, S. Mekhilef, and R. Saidur, Performance study of different solar dryers: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 463–470, 2014.
- [11] A. Fadhel, K. Charfi, M. Balghouthi, and S. Kooli, Experimental investigation of the solar drying of Tunisian phosphate under different conditions, *Renewable Energy*, vol. 116, pp. 762–774, 2018.
- [12] R. Patil and R. Gawande, A review on solar tunnel greenhouse drying system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56. Elsevier, pp. 196–214, 2016.
- [13] A. Kumar and V. Shrivastava, Historical Trends and Recent Developments in Solar Greenhouse Dryer Operated Under Active Mode: A Review, *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 10, no. 33, pp. 1–16, 2017.
- [14] Shyam, I. M. Al-Helal, A. K. Singh, and G. N. Tiwari, Performance evaluation of photovoltaic thermal greenhouse dryer and development of characteristic curve, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 7, no. 3, 2015.
- [15] A. Dubey, A. Sagar, P. Malkani, M. Kumar Choudhary, and S. Sanket Ramnath, A Comprehensive Review on Greenhouse Drying Technology, *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, vol. 21, no. 1, pp. 10–20, 2020.
- [16] A. Kumar, H. Deep, O. Parkash, and O. Ekechukwu, Advancement in Greenhouse Drying System, *Green Energy and Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 603–617, 2017.
- [17] U. Yokeshwaraperumal, A. S. Ramana, C. Arun Prakash, and V. Kannan, Performance study of a solar greenhouse dryer, *AIP Conference Proceedings*, vol. 2161, no. October, 2019.
- [18] M. Mofijur et al., Phase change materials (PCM) for solar energy usages and storage: An overview, *Energies*, vol. 12, no. 16, pp. 1–20, 2019.
- [19] R. K. Sahdev, Open Sun and Greenhouse Drying of Agricultural and Food Products: A Review, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 3, no. 3, pp. 1053–1066, 2014.
- [20] R. K. Sahdev, M. Kumar, and A. K. Dhingra, A review on applications of greenhouse drying and its performance, *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 395–412, 2016.
- [21] F. Galliou, N. Markakis, M. S. Fountoulakis, N. Nikolaidis, and T. Manios, Production of organic fertilizer from olive mill wastewater by combining solar greenhouse drying and composting, *Waste Management*, vol. 75, pp. 305–311, 2018.
- [22] A. Bechoff, D. Dufour, C. Dhuique-Mayer, C. Marouzé, M. Reynes, and A. Westby, Effect of hot air, solar and sun drying treatments on provitamin A retention in orange-fleshed sweetpotato, *Journal of Food Engineering*, vol. 92, no. 2, pp. 164–171, 2009.
- [23] O. Prakash and A. Kumar, Application of artificial neural network for the prediction of jaggery mass during drying inside the natural convection greenhouse dryer, *International Journal of Ambient Energy*, vol. 35, no. 4, pp. 186–192, 2014.
- [24] P. Barnwal and G. N. Tiwari, Grape drying by using hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) greenhouse dryer: An experimental study, *Solar Energy*, vol. 82, no. 12, pp. 1131–1144, 2008.
- [25] E. M. Querikiol and E. B. Taboada, Drying kinetics of mango byproducts in a greenhouse-type solar dryer using a wireless



- onion bulb, *Integrative Food, Nutrition and Metabolism*, vol. 4, no. 2, pp. 1–5, 2017.
- [67] E. Aritesty and D. Wulandani, Performance of the rack type-greenhouse effect solar dryer for wild ginger (*curcuma xanthorizza roxb.*) drying, *Energy Procedia*, vol. 47, pp. 94–100, 2014.
- [68] S. Janjai, A greenhouse type solar dryer for small-scale dried food industries: Development and dissemination, *International Journal of Energy and Environment*, vol. 3, no. 3, pp. 383–398, 2012.
- [69] Y. Chan, N. Dyah, and K. Abdullah, Performance of a recirculation type integrated collector drying chamber (ICDC) solar dryer, in *Energy Procedia*, 2015, vol. 68, pp. 53–59.
- [70] T. C. Tham et al., Effect of ambient conditions on drying of herbs in solar greenhouse dryer with integrated heat pump, *Drying Technology*, vol. 35, no. 14, pp. 1721–1732, 2017.
- [71] A. Fudholi, S. Mat, D. F. Basri, M. H. Ruslan, and K. Sopian, Performances analysis of greenhouse solar dryer with heat exchanger, *Contemporary Engineering Sciences*, vol. 9, no. 1–4, pp. 135–144, 2016.
- [72] M. Lanahan and P. C. Tabares-Velasco, Seasonal thermal-energy storage: A critical review on BTES systems, modeling, and system design for higher system efficiency, *Energies*, vol. 10, no. 6, 2017.
- [73] A. Evans, V. Strezov, and T. J. Evans, Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 6, pp. 4141–4147, 2012.
- [74] B. O. Ebangu, E. Dintwa, and O. Motsamai, Development of a Cost-effective Design of a P-V Ventilated Greenhouse Solar Dryer for Commercial Preservation of Tomatoes in a Rural Setting, *Advances in Technology Innovation*, vol. 4, no. 4, p. 222, 2019.
- Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, vol. 52, no. 3, pp. 459–467, 2016.
- [47] O. Prakash, A. Kumar, and V. Laguri, Performance of modified greenhouse dryer with thermal energy storage, *Energy Reports*, vol. 2, pp. 155–162, 2016.
- [48] J. Kaewkiew, S. Nabnean, and S. Janjai, Experimental investigation of the performance of a large-scale greenhouse type solar dryer for drying chilli in Thailand, in *Procedia Engineering*, 2012, vol. 32, pp. 433–439.
- [49] O. Prakash and A. Kumar, Performance evaluation of greenhouse dryer with opaque north wall, *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, vol. 50, no. 4, pp. 493–500, 2014.
- [50] S. Janjai, V. Khamvongsa, and B. K. Bala, Development, design, and performance of a PV-Ventilated greenhouse dryer, *International Energy Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 249–258, 2007.
- [51] P. S. Chauhan and A. Kumar, Performance analysis of greenhouse dryer by using insulated north-wall under natural convection mode, *Energy Reports*, vol. 2, pp. 107–116, 2016.
- [52] N. S. Rathore and N. L. Panwar, Experimental studies on hemi cylindrical walk-in type solar tunnel dryer for grape drying, *Applied Energy*, vol. 87, no. 8, pp. 2764–2767, 2010.
- [53] N. L. Panwar, S. C. Kaushik, and S. Kothari, Thermal modeling and experimental validation of solar tunnel dryer: A clean energy option for drying surgical cotton, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 11, no. 1, pp. 16–28, 2014.
- [54] S. Abdellatif, A. Mohmed, and G. Mosad, Utilization of Greenhouse (Lean-to Structural Frame) as a Solar Dryer for Drying Lemon Fruits Part I: Drying Process under High Air Temperature. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, vol. 8, no. 6, pp. 245–256, 2017.
- [55] V. P. Sethi and S. Arora, Improvement in greenhouse solar drying using inclined north wall reflection, *Solar Energy*, vol. 83, no. 9, pp. 1472–1484, 2009.
- [56] S. Nayak and G. N. Tiwari, Energy and exergy analysis of photovoltaic/thermal integrated with a solar greenhouse, *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 11, pp. 2015–2021, 2008.
- [57] P. S. Chauhan and A. Kumar, Heat transfer analysis of north wall insulated greenhouse dryer under natural convection mode, *Energy*, vol. 118, pp. 1264–1274, 2017.
- [58] N. S and P. kumar M, Analysis of Thermal Performance in Solar Dryer, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 71–74, 2014.
- [59] K. S. Tonui, E. B. K. Mutai, D. A. Mutuli, D. O. Mbuge, and K. V Too, Design and Evaluation of Solar Grain Dryer with a Backup Heater, *Engineering and Technology*, vol. 7, no. 15, pp. 3036–3043, 2014.
- [60] C. Phusampao, W. Nilnont, and S. Janjai, Performance of a greenhouse solar dryer for drying macadamia nuts, *Proceedings of the 2014 International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development*, vol. 5, no. 6, pp. 1155–1161, 2014.
- [61] Serm Janjai, Jagrapan Piwsaoad, Wanich Nilnont, and Prasan Pankaew, Experimental Performance and Neural Network Modeling of a Large-scale Greenhouse Solar Dryer for Drying Natural Rubber Sheets, *J. of Control Science and Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 48–53, 2015.
- [62] A. ELkhadraoui, S. Kooli, I. Hamdi, and 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.
- [63] W. Hao, S. Liu, B. Mi, and Y. Lai, Mathematical modeling and performance analysis of a new hybrid solar dryer of lemon slices for controlling drying temperature, *Energies*, vol. 13, no. 2, 2020.
- [64] S. Janjai, N. Srisittipokakun, and B. K. Bala, Experimental and modelling performances of a roof-integrated solar drying system for drying herbs and spices, *Energy*, vol. 33, no. 1, pp. 91–103, 2008.
- [65] N. I. Román-Roldán, A. López-Ortiz, J. F. Ituna-Yudonago, O. García-Valladares, and I. Pilatowsky-Figueroa, Computational fluid dynamics analysis of heat transfer in a greenhouse solar dryer ‘chapel-type’ coupled to an air solar heating system, *Energy Science and Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 1123–1139, 2019.
- [66] A. Nurhasanah, Suparlan, Suherman, and S. Mokhtar, Technical and economic analysis of a plant scale green house dryer for red

