وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

نشریه فنی:

سامانه ردیاب تابش آفتاب در خشک‌کن خورشیدی

امیدرضا روستاپور و حمیدرضا گازر

سال انتشار: ۱۳۹۸

AERI

آدرس: کرج، بلوار شهید فهمیده، صندوق پستی: ۸۴۵ -۳۱۵۸۵، مؤسسه تحقیقات فنی ومهندسی کشاورزی
تلفن: ۳۲۷۰۵۳۲۰، ۳۲۷۰۵۲۴۲ و ۳۲۷۰۸۳۵۹ (۰۲۶)
دورنگار: ۳۲۷۰۶۲۷۷ (۰۲۶)، پایگاه اطلاعاتی مؤسسه: www.aeri.ir

بسم الله الرحمن الرحیم

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

نشریهٔ فنی:
سامانه ردیاب تابش آفتاب در خشک‌کن خورشیدی

تهیه و تدوین:

امیدرضا روستاپور

حمیدرضا گازر

اعضاء هیئت علمی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

سال انتشار:

۱۳۹۸

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش وترویج کشاورزی
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

نوع نوشتار: نشریهٔ فنی
عنوان نوشتار: سامانه ردیاب تابش آفتاب در خشک‌کن خورشیدی
نگارندگان: امیدرضا روستاپور، حمیدرضا گازر
داوران و ویراستاران: محمدرضا بختیاری، جلال جوادی‌مقدم
صفحه‌آرا: صدیقه پردیس‌کیان
ناشر: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
شمارگان: محدود
نوبت چاپ: اول
سال انتشار: ۱۳۹۸

مسئولیت صحت مطالب با نگارندگان است.

شماره ثبت ۵۶۹۵۸ در مرکز فناوری اطلاعات و اطلاع‌رسانی کشاورزی سازمان تحقیقات، آموزش وترویج کشاورزی به تاریخ ۱۳۹۸/۱۱/۱۲

مخاطبان نشریه:

کارشناسان، محققان معین و کارشناسان پهنه مستقر در پهنه‌بندی، سازنده‌های خشک‌کن، باغداران و تولیدکنندگان میوه‌های خشک در مقیاس کوچک

اهداف آموزشی:

شما خوانندگان گرامی در این نشریه با:

به‌کارگیری سامانه ردیاب نور آفتاب برای بهبود عملکرد صفحات جاذب در خشک‌کن‌های خورشیدی

آشنا خواهید شد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	۱
نقش واحدهای جمع‌کننده	۵
سامانه ردیاب تابش خورشید	۱۱
بازه دوران واحد جمع‌کننده	۱۵
راه‌اندازی خشک‌کن مجهز به سامانه ردیاب تابش	۲۰
نتیجه‌گیری	۲۲
پیشنهادات	۲۳
منابع مورد استفاده	۲۳

مقدمه

فرآیند خشک کردن عبارت است از کاهش ظرفیت رطوبت محصول که باعث خشک شدن و کاهش فعل و انفعالات شیمیایی می‌شود. آبزدایی باعث کاهش حجم و وزن محصول در طی فرآیند می‌شود و عمر انبارمانی آن را افزایش می‌دهد. برای تأمین گرمای مورد نیاز در فرآیند خشک کردن می‌توان از منابع انرژی مختلف از جمله گرم‌کن‌های برقی یا انواع مشعل‌ها استفاده کرد. با توجه به بحران و محدویت منابع انرژی در سال‌های اخیر، بیشتر کشورها به استفاده از انرژی‌های ارزان و کم هزینه از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشید روی آورده‌اند. خورشید مقدار زیادی انرژی دارد و می‌تواند میزان قابل توجهی از انرژی مورد نیاز تجهیزات مختلف ثابت زراعی از جمله خشک‌کن‌ها را فراهم آورد. استفاده از نور خورشید برای خشک کردن محصولات کشاورزی همچون میوه‌ها غالباً به روش سنتی یا پهن کردن میوه در برابر آفتاب صورت می‌گیرد. روش خشک کردن با تابش مستقیم به‌علت زیان‌های زیاد ناشی از حمله قارچ‌ها، حشرات، پرندگان و جوندگان، ریزش باران‌های غیرمنتظره و تغییرات زیاد در میزان تابش، محدودیت‌های زیادی را برای بهره بردار ایجاد می‌کند. همچنین کاهش کیفیت محصول نهایی، غیریکنواختی خشک کردن، افزایش مدت زمان خشک کردن از جمله مشکلات دیگری است که فرایند خشک کردن در مقابل آفتاب را کم اثر می‌کند. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی جهت طراحی و ساخت تجهیزات گوناگون جهت جذب و استفاده بهینه از انرژی تابش خورشید شده است. از آن جمله می‌توان به ساخت انواع خشک‌کن‌های خورشیدی در مقیاس های خانگی و باغی اشاره نمود که در منابع

مختلف به آنها اشاره شده است (یانگ، ۱۹۸۰[1]; لالیت و دیگران، ۲۰۱۰[2]; روستاپور و دیگران، ۱۳۹۴ و گازر، ۱۳۹۷ الف).

یک خشک‌کن خورشیدی شامل قسمت‌هایی نظیر واحد جمع‌کننده انرژی خورشید[3]، سازهٔ نگهدارنده تجهیزات، فن برای ایجاد جریان اجباری هوای گرم در خشک‌کن، مخزن استقرار سینی‌های محصول و کانال ارتباطی بین واحد جمع‌کننده و مخزن است. خشک‌کن‌های خورشیدی بر اساس نحوهٔ جذب انرژی خورشید به سه دسته یکپارچه، توزیعی و ترکیبی تقسیم می‌شوند (گازر، ۱۳۹۷ ب).

خشک‌کن خورشیدی نوع یکپارچه

این نوع خشک‌کن، دارای یک مخزن است که در آن سینی‌های توری‌دار بر روی هم قرار گرفته‌اند. بر روی مخزن یک درب شیشه‌ای قرار دارد که آفتاب بر روی آن تابش می‌کند. قطعات میوه و یا سبزی بر روی سینی‌ها پهن شده و خشک‌کن در محیط بیرون و در مجاور آفتاب به‌سمت جنوب مستقر می‌شود تا محصول در اثر تابش مستقیم خورشید، خشک شود (شکل ۱).

1. Yang, 1980
2. Lalit *et al.*, 2010
3. Collector

شکل ۱- خشک‌کن خورشیدی یکپارچه (مستقیم)

مزیت این خشک‌کن‌ها، ساده بودن و هزینه پایین آن‌ها است. درحالی‌که کاربرد آن‌ها محدود بوده و برای محصولات حساس به تابش نور مستقیم خورشید مانند گیاهان دارویی مناسب نیست.

خشک‌کن خورشیدی نوع توزیعی (گرمایش غیر مستقیم):

این نوع از خشک‌کن‌ها دارای یک مخزن حاوی چند سینی هستند که باید قطعه‌های میوه و سبزی را بر روی سینی‌ها پهن نمود. هوای ورودی به واحد جمع‌کننده، بر روی یک صفحه سیاه رنگ به‌نام صفحه جاذب، توسط فن یا به‌صورت طبیعی جریان می‌یابد و در اثر جذب انرژی حرارتی خورشید گرم می‌شود و سپس با ورود به مخزن و عبور از لابه‌لای سینی‌ها باعث خشک شدن محصول می‌شود (شکل ۲).

شکل ۲- خشک‌کن خورشیدی توزیعی (غیرمستقیم)

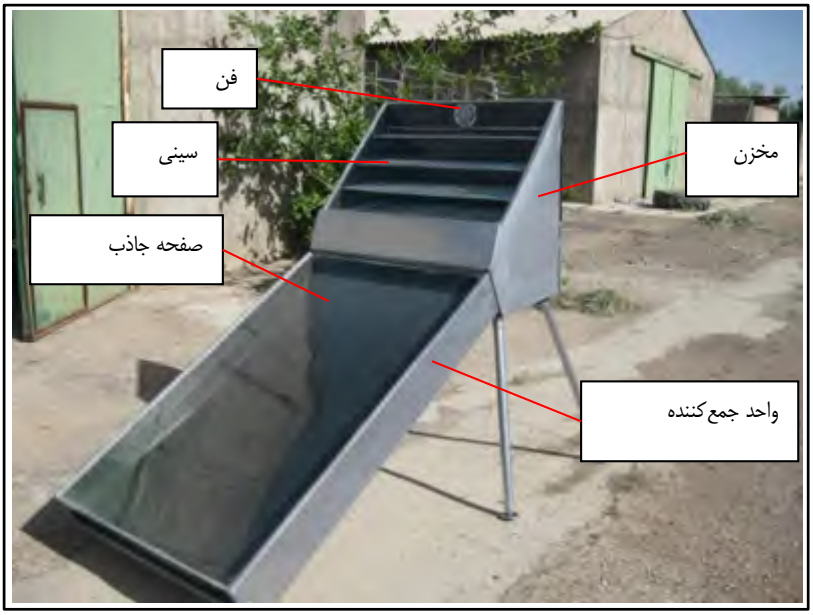
با توجه به این‌که فقط جریان هوای گرم باعث فرآیند خشک‌شدن می‌شود لذا این خشک‌کن‌ها برای خشک‌نمودن محصولات حساس به تابش مستقیم خورشید مناسب هستند. از معایب این روش می‌توان به عدم قابلیت استفاده از تابش مستقیم خورشید در خشک کردن محصول اشاره نمود که باعث کاهش راندمان حرارتی می‌شود.

خشک‌کن خورشیدی ترکیبی

در این خشک‌کن، از هر دو سیستم گرمایشی مستقیم و غیر مستقیم استفاده شده است به‌ترتیبی که هوا پس از عبور از صفحه جاذب گرم شده و در لابه‌لای سینی‌های محصول جریان می‌یابد. از طرفی مخزن سینی‌های محصول دارای یک سطح شیشه‌ای شیبدار است که از طریق آن تابش مستقیم خورشید بر محصول صورت می‌گیرد (شکل ۳). این نوع خشک‌کن‌ها راندمان بیشتری نسبت

به دو نوع خشک‌کن یکپارچه و توزیعی داشته و قابلیت استفاده برای خشک‌کردن محصولات متنوع را دارند، منتهی هزینه ساخت آن‌ها بالاتر است.

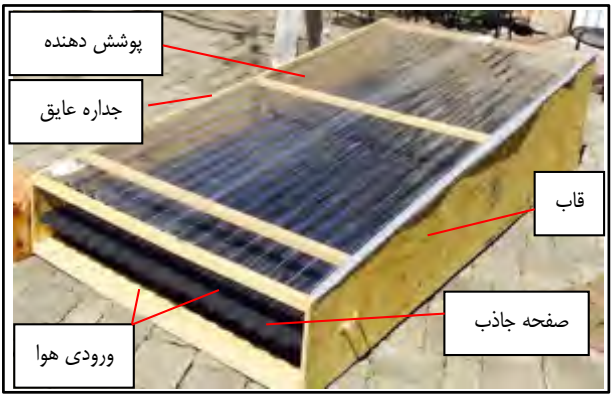
به‌طورکلی از محدودیت‌های خشک‌کن خورشیدی راندمان پایین آن است که متاثر از عوامل مختلف از جمله وابستگی آن به تابش آفتاب و گرمای هوا است. با استفاده حداکثری از انرژی تابشی خورشید می‌توان راندمان حرارتی خشک‌کن خورشیدی را افزایش و در نتیجه زمان خشک شدن محصول را کاهش داد (جهانگیر، ۱۳۹۲؛ روستاپور و علوی‌منش، ۱۳۹۷). برای افزایش راندمان حرارتی خشک کن خورشیدی باید در انتخاب و استفاده از واحدهای جمع‌کننده توجه بیشتری شود.



شکل ۳- خشک‌کن‌های خورشیدی ترکیبی

نقش واحدهای جمع‌کننده

جمع‌کننده‌ها انرژی تابشی دریافت شده از خورشید را به انرژی گرمایی تبدیل کرده و بعنوان قلب خشک کن عمل می‌کنند. معمولاً جمع‌کننده شامل یک صفحه فلزی به رنگ مشکی بنام صفحه جاذب است که هوا از سطح رویی و زیری آن عبور می‌کند (فصیح‌زاده، ۱۳۹۰). نمونه‌ای از یک واحد جمع‌کننده با صفحه جاذب آکاردئونی در شکل ۴ ارائه شده است. این جمع‌کننده شامل اجزاء زیر است:



شکل ٤- واحد جمع‌کننده خشک‌کن خورشیدی

- صفحه جاذب

صفحه جاذب دارای سطح مربع- مستطیل است و برای ساخت آن از آلیاژ با ضریب هدایت حرارتی بالا از جمله آلومینیم استفاده شده و سپس سطح آن با رنگ مشکی پوشش داده می‌شود تا بیشترین ضریب جذب تابش را داشته باشد. این صفحه عموماً به‌صورت تخت ساخته می‌شود. شکل ۵ صفحهٔ جاذب تخت در حال رنگ‌آمیزی را نشان می‌دهد. ابعاد این صفحه بر اساس ظرفیت خشک‌کن به‌دست می‌آید (فصیح‌زاده، ۱۳۹۰).

شکل ٥- رنگ‌آمیزی صفحه جاذب با رنگ مشکی

افزایش راندمان جذب تابش توسط صفحه جاذب یکی از مسائل مهم در خشک‌کن‌های خورشیدی است. یکی از راه‌کارها این است که سطح تماس صفحه جاذب با عملیات نورد به‌صورت آکاردئونی (شکل ۴) و یا گرده ماهی در آید (شکل ۶) (گازر، ۱۳۹۷ ب).

شکل ٦- صفحه جاذب با سطوح برجسته مضاعف

یک راه‌کار دیگر برای افزایش راندمان جذب تابش، آرام نمودن جریان بر روی صفحه جاذب و مخزن خشک‌کن است. برای این‌کار از تیغه‌های بادگیر به‌شکل نبشی در مسیر جریان بر روی صفحه جاذب استفاده می‌شود (روستاپور و دیگران، ۲۰۱۴[1]; روستاپور و دیگران، ۲۰۱۹[2]). نمونه‌ای از به‌کارگیری تیغه‌های بادگیر در شکل ۷ ملاحظه می‌شود.

شکل ۷- صفحه جاذب با تیغه‌های بادگیر

- پوشش دهنده

پوشش دهنده واحد جمع‌کننده از شیشه و یا صفحات از جنس پلاستیک سخت شفاف (پلی‌کربنات ضد اشعه ماوراء بنفش) به‌منظور جلوگیری از هدر رفتن انرژی حرارتی، ساخته می‌شود (محمدی مزرعه، ۱۳۸۹). شکل ۸ نمونه پوشش از جنس پلی‌کربنات در خشک‌کن خورشیدی یکپارچه را نشان می‌دهد.

[1] Roustapour *et al.*, 2014

[2] Roustapour *et al.*, 2019

شکل ۸- پوشش دهنده‌های پلی‌کربنات برای واحد جمع‌کننده خشک‌کن خورشیدی

- عایق

به‌منظور کاهش تلفات حرارتی، پشت و سطوح جانبی واحد جمع‌کننده با عایق از جنس پشم‌شیشه، پشم‌سنگ و دیگر عایق‌های حرارتی از جنس پلاستیک‌های مهندسی پوشش داده می‌شود (روستاپور، ۱۳۹۵) (شکل ۹).

شکل ۹- نمونه‌ایی از عایق‌کاری واحد جمع‌کننده توسط پشم‌شیشه

- قاب واحد جمع‌کننده

قاب واحد جمع‌کننده، نگهدارنده اجزاء مختلف جمع‌کننده می‌باشد. در جمع‌کننده، هوا از زیر یا طرفین صفحه جاذب عبور می‌کند و پس از گرم شدن، از خروجی تعبیه شده در انتهای بالایی آن خارج و به‌سمت مخزن سینی‌های محصول هدایت می‌شود (روستاپور و زمردیان، ۲۰۱۴[1]).

طراحی ابعادی واحد جمع‌کننده بر اساس ظرفیت خشک‌کن، رطوبت اولیه میوه، رطوبت نهایی چیپس، گرمای نهان تبخیر آب در متوسط دمای فرایند خشک شدن (حدود ۵۰ درجه سلسیوس) و انرژی حرارتی تابش خورشید به ازاء واحد سطح در هر منطقه بر حسب مگاژول انجام می‌شود (فصیح زاده، ۱۳۹۰).

واحد جمع‌کننده در خشک‌کن‌های خورشیدی برای دریافت تابش خورشید در طول روز، به سمت جنوب مستقر می‌شود. میزان متوسط انرژی خورشید که توسط زمین دریافت می‌شود معادل با تابشی است که به‌طور عمود بر واحد سطح برخورد می‌کند. این مقدار تحت عنوان ثابت خورشیدی (S) استاست. به‌علت پخش شدن و انعکاس اشعه خورشید در زمان ورود به جو زمین، ۳۰ درصد تلفات در شرایط هوای کاملاً صاف و آفتابی غیر قابل اجتناب است (گوورکیان، ۲۰۰۸[2]). در هر منطقه میزان انرژی دریافتی از تابش خورشید در سطح زمین وابسته به عوامل زیر است:

- تغییر دمای فصلی
- شرایط ابری
- عرض و طول جغرافیایی منطقه
- زاویه برخورد اشعه خورشید به زمین

1. Roustapour and Zomorodian, 2014
2. Gevorkian, 2008

معمولاً زاویه شیب واحد جمع‌کننده معادل با **عرض جغرافیایی** منطقه در نظر گرفته می‌شود. در این شرایط اشعه آفتاب در ظهر شرعی به صورت عمودی بر صفحه جاذب برخورد می‌کند (دافی و بکمن، ۱۹۹۱[1]). این عمل باعث جذب حداکثری انرژی تابشی خورشید و تبدیل آن به انرژی حرارتی خواهد شد.

جمع‌کننده‌ها در اغلب خشک‌کن‌های خورشیدی به‌صورت ثابت بوده و از تمام ظرفیت تابش نورخورشید در طول روز استفاده نمی‌کنند. به‌کارگیری سامانه ردیاب نورخورشید به‌منظور بهبود راندمان جذب تابش خورشید استفاده می‌شود و راندمان جذب را بیش از ۲۵ درصد نسبت به صفحه جاذب ثابت افزایش می‌دهد (صمیمی اخیجهانی و دیگران، ۱۳۹۵). در ادامه با اجزاء و سامانه عملکرد ردیاب نور خورشید آشنا خواهید شد.

سامانه ردیاب تابش خورشید

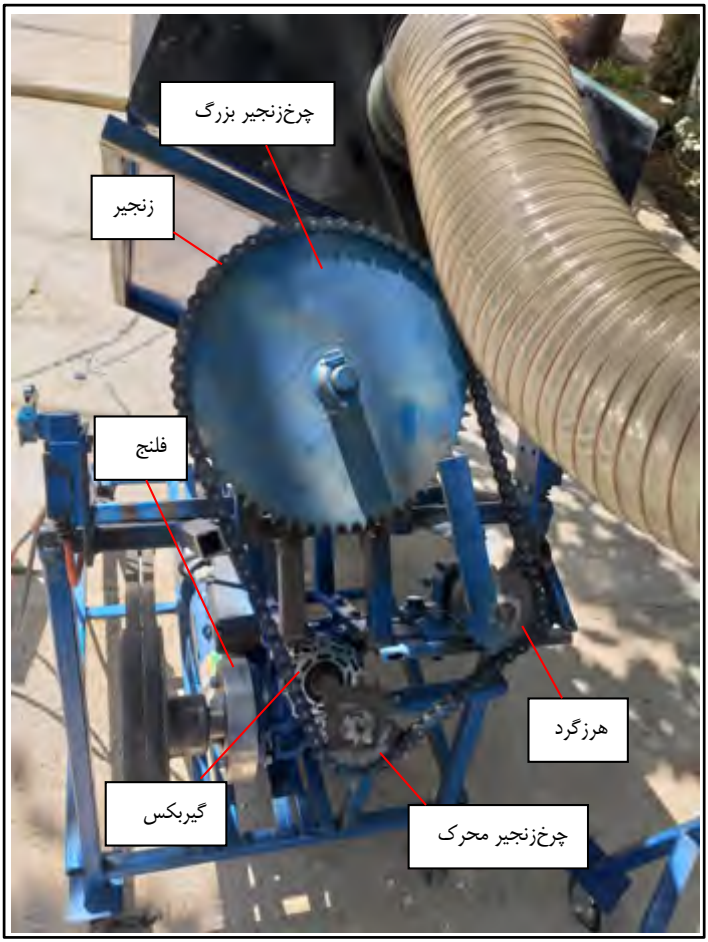
سامانه ردیاب تابش، متناسب با حرکت خورشید حرکت دورانی واحد جمع‌کننده از شرق به غرب را فراهم نموده و باعث می‌شود تا اشعه خورشید همیشه عمود بر صفحه جاذب بتابد. این عمل سبب افزایش راندمان جذب انرژی تابشی خواهد شد. دوران واحد جمع‌کننده می‌تواند توسط کنترلرهای ردیاب ماکزیمم نقطه توان خورشید صورت گیرد. در سامانه ارائه شده، ردیابی تابش با استفاده از یک مکانیزم مکانیکی ساده با هزینه به مراتب کمتر انجام می‌شود.

دوران واحد جمع‌کننده توسط یک الکتروموتور کوچک (توان ۰/۳۷ کیلووات و سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه) تامین می‌شود. برای کاهش دور الکتروموتور از دو عدد گیربکس کاهنده دور به‌همراه مکانیزم تسمه و پولی و در نهایت چرخ و زنجیر استفاده می‌شود. با استفاده از مکانیزم‌های فوق، سرعت

1. Duffie and Bekmen, 1991

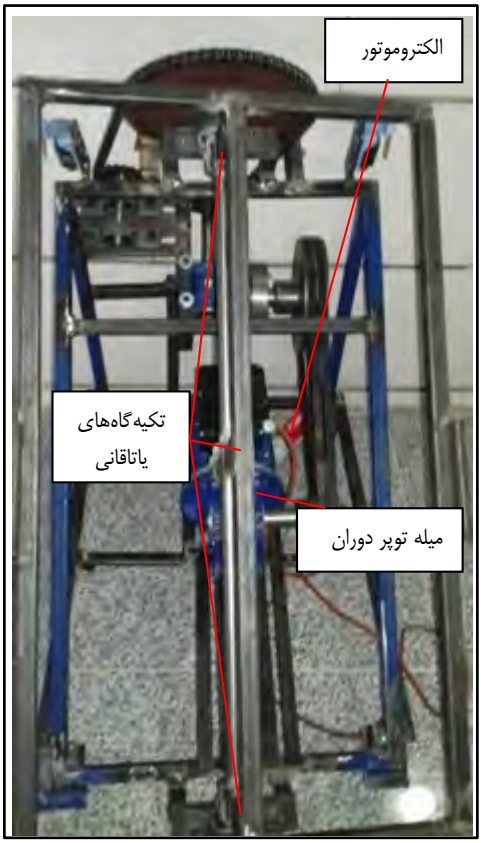
دورانی الکتروموتور در محور نصب شده در زیر قاب واحد جمع‌کننده به ۰/۰۱ دور در دقیقه کاهش می‌یابد. شکل های ۱۰ و ۱۱ مکانیزم‌های کاهنده دور تسمه- پولی و چرخ و زنجیر به‌کارگرفته شده در سیستم ردیاب تابش را نشان می‌دهد.

شکل ۱۰- سیستم انتقال دوران تسمه و پولی واحد جمع‌کننده



شکل ۱۱- سیستم انتقال دوران چرخ و زنجیر واحد جمع‌کننده

برای چرخش واحد جمع‌کننده از یک قاب مستطیلی شامل میله دوران استفاده می‌شود. انتهای بالایی میله توپر بر چرخ زنجیر بزرگ سوار شده و همراه با چرخش آن دوران می‌نماید (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- قاب واحد جمع‌کننده

در لبه‌های بالای قاب، ابتدا و انتهای مسیر دوران، دو عدد میکروسوئیچ نصب شده که به‌مجرد برخورد قاب به هر کدام از آن‌ها، دوران قطع می‌شود (شکل ۱۳). سپس فرمان دوران معکوس الکتروموتور صادر شده و قاب واحد جمع‌کننده به مکان اولیه خود باز می‌گردد.

شکل ۱۳- میکروسوئیچ جهت قطع چرخش قاب واحد جمع‌کننده

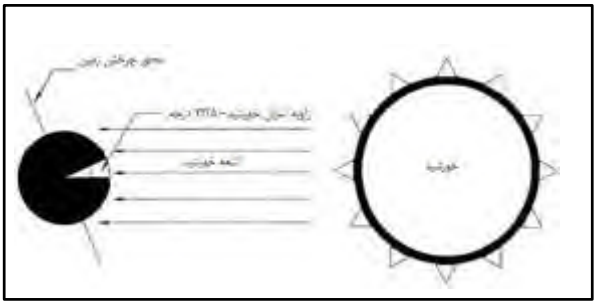
بازه دوران واحد جمع‌کننده

بازه دوران واحد جمع‌کننده تابعی از عرض جغرافیایی هر منطقه و زوایای تابشی خورشید است که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد. میزان انرژی بازتابش‌شده از اشعه تابشی خورشید در لحظه برخورد به سطح زمین، انزال خورشیدی[1] نام دارد.

[1] Solar insolation

برای مدیریت و بهره مندی بیشتر از شدت تابش اشعه خورشید، ابتدا باید با زاویه‌های تمایل خورشید[1]، ساعت[2] و اوج (سمت)[3] آشنا شد.

زمین بر روی یک مدار بیضی شکل به‌دور خورشید حرکت می‌کند و محور آن تحت زاویه شیب ۲۳/۵ درجه است و تحت عنوان **زاویه تمایل خورشید** (i) است. این زاویه در طی چرخش زمین در این مدار، به‌تدریج از ۲۳/۵+ در ۲۱ تا ۲۲ ماه ژوئن (سی و یکم خرداد تا یکم تیر ماه) تا ۲۳/۵- در ۲۱ تا ۲۲ ماه دسامبر (سی و یکم آذر تا یکم دی ماه) تغییر می‌کند (شکل ۱۴). این زاویه در اعتدالین تابستان و زمستان صفر است (گوورکیان، ۲۰۰۸[4]).



شکل ١٤- زاویه تمایل خورشید

زمین در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز، ۱۵ درجه دور محور خود در هر ساعت دوران می‌نماید و باعث طلوع و غروب خورشید می‌شود. این زاویه تحت عنوان **زاویه ساعت (H)** است (شکل ۱۵). این شرایط باعث می‌شود که جذب انرژی تابشی خورشید با راندمان کمتری رخ دهد. مقدار زاویه ساعت در ظهر شرعی یا

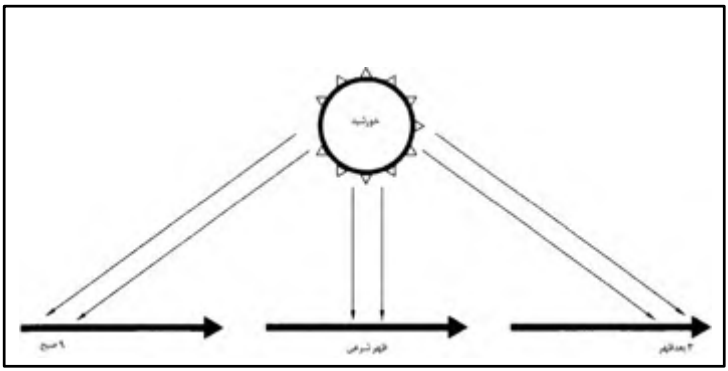
[1] Declination angle

[2] Hour angle

[3] Zenith angle

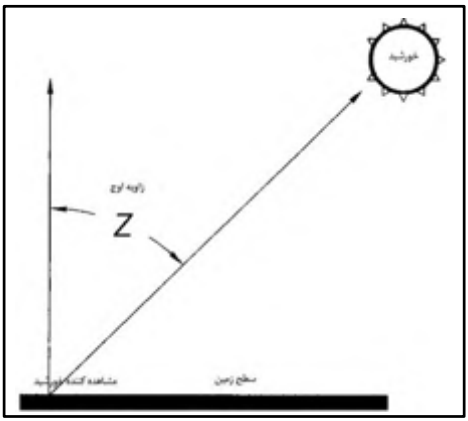
[4] Gevorkian, 2008

در زمان استقرار آفتاب در وسط آسمان، صفر است. در این شرایط، هیچ سایه‌ای از یک شئ عمودی تشکیل نمی‌شود.



شکل ۱۵- زاویه ساعت

زاویه بین امتداد دید مشاهده‌کننده خورشید از روی زمین و امتداد عمود بر سطح زمین تحت عنوان **زاویه اوج (Z)** است (شکل ۱۶).



شکل ۱۶- زاویه اوج خورشید

با توجه به تلفات حاصل از انعکاس و انحراف اشعه خورشید در جو زمین، مقدار انرژی که در یک روز آفتابی با هوای کاملاً صاف در سطح زمین دریافت می‌شود، معادل ۱۰۰۰ وات بر متر مربع (ثابت خورشیدی) است. بنابراین، لازم است با توجه به فصل سال، ساعت روز و موقعیت جغرافیایی در هر منطقه مقدار انرژی واقعی دریافتی از تابش خورشید با استفاده از روابط ذکر شده در منابع علمی مربوطه محاسبه شود (گوورکیان، ۲۰۰۸[1]).

در فاصله صبح تا ظهر شرعی و در بعدازظهر تا غروب آفتاب، امتداد تابش آفتاب بر روی صفحه جاذب خشک‌کن نسبت به خط عمود بر این صفحه متمایل خواهد بود. مقدار این تمایل معادل با زاویه اوج خورشید است. درصورتی‌که صفحه جاذب ثابت باشد، فقط در ظهر شرعی آفتاب عمود بر صفحه جاذب واحد جمع‌کننده تابش می‌کند و باعث جذب انرژی تابشی با حداکثر راندمان می‌شود. در حالی‌که در مابقی زمان روز، تابش عمود بر صفحه جاذب نبوده و راندمان جذب انرژی تابشی کاهش می‌یابد. این در حالی است که اگر واحد جمع‌کننده متحرک حول محور افقی خود مطابق با زاویه اوج خورشید دوران نماید، تابش در طول روز همیشه عمود بر صفحه جاذب خواهد بود. در مجموع می‌توان اذعان داشت که با مجهز نمودن واحد جمع‌کننده به یک موتور گردان و یک واحد ردیاب تابش خورشید[2]، می‌توان انرژی تابشی خورشید را با حداکثر راندمان و عمود بر صفحه جاذب دریافت نمود.

به‌منظور استفاده از حداکثر انرژی تابشی در یک خشک‌کن خورشیدی باغی، باید یک سامانه ردیابی تابش خورشید با محاسبه تغییرات زاویه اوج، طراحی و ساخته شود.

1. Gevorkian, 2008

2. Solar radiation tracking

در این راستا ابتدا زمان کار خشک‌کن را از ساعت ۸ صبح تا ۴ بعد ازظهر درنظر گرفته و زاویه اوج در ساعات یاد شده محاسبه می‌شود. برای انجام محاسبات باید منطقه و فصل مشخص باشد تا طراحی اولیه انجام شود. پس از ساخت این خشک‌کن، با تایمرهای بکارگرفته شده می‌توان تنظیمات لازم برای بکارگیری خشک‌کن در مناطق و فصول مختلف را انجام داد. به‌عنوان نمونه، محاسبه زاویه اوج در شهرستان شیراز با عرض جغرافیایی ۲۹/۳۹ شمالی و ابتدای فصل تابستان با زاویه تمایل خورشید مساوی ۲۳/۵+ به‌صورت جدول ۱ است.

جدول ۱- زاویه اوج خورشید در ابتدای تابستان (شهرستان شیراز)

زمان (ساعت)	زاویه اوج (درجه)
۸ صبح	۵۳
۴ بعد ازظهر	۵۳

همانطور که بیان شد سرعت دورانی محور دوران واحد جمع‌کننده، مساوی ۰/۰۱ دور در دقیقه است. به‌عبارتی در یک دوران ۳۶۰ درجه، محور قاب در هر دقیقه ۳/۶ درجه دوران می‌کند. زاویه اوج (دوران کل) واحد جمع‌کننده از ۸ صبح تا ۴ بعد ازظهر مساوی ۱۰۶ درجه است لذا کل زمان دوران $\frac{106}{3.6}$ یا ۲۹/۴۴ دقیقه طول می‌کشد. دوران ۱۰۶ درجه واحد جمع‌کننده باید در طی ۸ ساعت صورت پذیرد لذا در هر ساعت باید $\frac{106}{8}$ یا ۱۳/۲۵ درجه دوران تعریف شود. در این شرایط مدت زمان این میزان دوران برابر است با:

$$\frac{13.25 \times 29.44}{106} = 3.68\ min$$

به‌منظور مدیریت دوران، هر ساعت به ۴ محدوده زمانی ۱۵ دقیقه تقسیم می‌شود. به‌عبارتی در هر ۱۵ دقیقه می‌توان ۳/۳۱ درجه دوران را تعریف نمود. زمان این میزان دوران معادل $\frac{3.68}{4}$ یا ۰/۹۲ دقیقه (۵۵ ثانیه) است.

بنابراین، برای اینکه صفحه جاذب با تغییر زاویه ساعت خورشید هماهنگ باشد، باید موتور در هر ۱۵ دقیقه ۵۵ ثانیه روشن و ۱۴ دقیقه و ۵ ثانیه خاموش باشد. این کار مستلزم طراحی و ساخت یک سامانه کنترل برقی است.

تابلوی برق مناسب برای سامانه کنترل دوران واحد جمع‌کننده، معمولاً شامل یک عدد ساعت فرمان و دو عدد تایمر دیجیتال است که زمان خاموش و روشن شدن موتور توسط آن‌ها تعریف می‌گردد. تایمرها دستور چرخش واحد جمع‌کننده در زمان تعریف شده توسط ساعت فرمان را صادر می‌کنند. شکل ۱۷ تابلو برق و تجهیزات مربوطه را نشان می‌دهد.

شکل ۱۷- تابلو فرمان سیستم دوران واحد جمع‌کننده

راه‌اندازی خشک‌کن مجهز به سامانه ردیاب تابش

مراحل راه‌اندازی یک خشک‌کن خورشیدی که مجهز به سامانه ردیاب تابش است، به قرار زیر خواهد بود:

۱- استقرار خشک‌کن در موقعیت مناسب در محیط و به سمت جنوب
۲- چیدن محصول بر روی سینی‌های خشک‌کن
۳- اتصال محفظه خشک‌کن با واحد جمع‌کننده به وسیله لوله خرطومی انعطاف‌پذیر
۴- راه‌اندازی تابلوی برق
۵- روشن نمودن پنکه (حجم جابجایی ۰/۱ مترمکعب بر ثانیه) توسط فیوز مخصوص در تابلو برق در طی زمان فرایند خشک شدن
۶- روشن نمودن الکتروموتور سامانه تغییر زاویه واحد جمع‌کننده

برای بررسی عملکرد سامانه ردیاب و تاثیر آن بر کاهش زمان خشک شدن، می‌توان فرایند خشک کردن برش های انواع محصولات جالیزی یا میوه‌های باغی را در خشک‌کن مذکور انجام داد. به‌عنوان نمونه خشک شدن ورقه‌های نازک گوجه‌فرنگی در خشک‌کن خورشیدی مجهز به این سامانه در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

شکل ۱۸- خشک‌کن خورشیدی مجهز به سامانه ردیاب تابش

نتیجه‌گیری

به‌کارگیری سامانه ردیاب در واحد جمع‌کننده باعث می‌شود که در فصول مختلف سال آفتاب در طول روز تقریباً عمود بر صفحه جاذب بتابد و در نتیجه راندمان جذب تابش خورشید افزایش پیدا کند. این عمل باعث می‌شود که استفاده مفید از انرژی حرارتی خورشید در طول فرایند صورت گرفته و زمان خشک شدن کاهش یابد.

به‌کارگیری سیستم ردیاب تابش باعث می‌شود که کاهش رطوبت محصول با سرعت بیشتری اتفاق بیفتد و در برخی موارد تا حدود ۳۰ درصد زمان خشک شدن کم شود.

پیشنهادات

پیشنهاد می‌شود بازه دوران خشک‌کن خورشیدی با واحد جمع‌کننده متحرک در موقعیت‌های مختلف جغرافیایی کشور تعریف شود و تأثیر کاربرد آن در افزایش راندمان جذب تابش خصوصاً در مناطق سرد و دارای حداقل روزهای آفتابی در سال پایش شود.

لازم به‌ذکر است که با توجه به تغییر زاویه تابش خورشید در فصول مختلف سال، برای جذب حداکثری تابش، باید مکانیزم تغییر زاویه عمودی صفحه جاذب در خشک‌کن مورد توجه قرار گیرد.

منابع

جهانگیر، ی. ۱۳۹۲. بهینه سازی مصرف انرژی در خشک‌کن خورشیدی و استفاده از توربین تهویه در لوله خروجی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی شیراز.

روستاپور، ا. ر.، افسری، ا. و جهانگیر، ی. ۱۳۹۴. تاثیر بازگشت جریان هوا در خشک‌کن خورشیدی بر انرژی مصرفی خشک‌کردن و راندمان. مهندسی بیوسیستم ایران. دوره ۴۶، شماره ۱، ص. ۳۱-۳۸.

روستاپور، ا. ر. ۱۳۹۵. طراحی، ساخت و ارزیابی خشک‌کن خورشیدی ترکیبی مجهز به مکانیزم تغییر زاویه دریافت تابش به منظور خشک کردن سیب گلاب. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

روستاپور، ا. ر. و علوی‌منش، م. ۱۳۹۷. خشک‌کن خورشیدی و راهکارهای افزایش کارآیی آن. نشریه ترویجی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

صمیمی اخیجهانی، ه.، عرب حسینی، ا. و کیانمهر، م. ح. ۱۳۹۵. بررسی جریان یک بعدی هوا در یک جمع‌کننده خورشیدی تخت با قابلیت تعقیب تابش خورشید. نشریه ماشین‌های کشاورزی. جلد ۶، شماره ۲، ص. ۴۵۱-۴۶۲.

فصیح‌زاده، ب. ۱۳۹۰. طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه خشک‌کن خورشیدی ترکیبی مجهز به مکانیزم تغییر زاویه دریافت تابش. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی شیراز.

گازر، ح. ر. ۱۳۹۷ الف. آشنایی با خشک‌کن‌های کشاورزی. دستنامه، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

گازر، ح. ر. ۱۳۹۷ ب. خشک‌کن‌های خورشیدی محصولات کشاورزی. نشریه فنی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

محمدی مزرعه، ح. ۱۳۸۹. ارزیابی خشک‌کن خورشیدی فعال برای تهیه کشمش. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

Duffie, J. A. and Beckmen, W. A. 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York: John Wiley.

Gevorkian, P. 2008. *Solar Power in Building Design*. Mc Graw Hill Publishing Company, New York, USA, pp. 95-116.

Lalit, M., Santosh Satya, B. and Naik, S. N. 2010. Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review Centre for Rural Development and Technology, Indian Institute of Technology, Hauz Khas, New Delhi 110016, India.

Roustapour O. R. and Zomorodian, A. 2014. Development and Evaluation of a Mixed and Active Solar Dryer with Variable Inclination. International Conference on Agricultural Engineering, Muscat, Oman.

Roustapour, O. R., Mozaffari, K. and Tahhavor, A. R. 2014. Optimization of energy consumption in a solar dryer by numerical modeling of flow in the chamber with air

deflectors. Journal of Agricultural Machinery Science, 10 (1): 43-47.

Roustapour, O. R., Gazor, H. R. and Kazemi, F. 2019. Numerical modeling of air flow in a cabinet dryer equipped by deflector plates. International Journal of Food Engineering, DOI: https://doi.org/10.1515/ijfe-2018-0341, Article in Press.

Yang, K. C. 1980. Solar kiln performance at latitude 48 ^{o}N. Food Producing Journal. 3: 37-40.