



## Experimental Study of an Infrared-Solar Dryer Powered by a Photovoltaic-Thermal System

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Mirzaei S.<sup>1</sup> MSc,

Ameri M.\*<sup>1</sup> PhD,

Ziaforoughi A.<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Mirzaei S, Ameri M, Ziaforoughi A. Experimental Study of an Infrared-Solar Dryer Powered by a Photovoltaic-Thermal System. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(6):1677-1689.

### ABSTRACT

In the current study, an infrared-solar dryer powered by a photovoltaic-thermal system was designed, manufactured and tested in the Shahid Bahonar University of Kerman. The drying time, temperature, and the amount of electrical energy consumed during the drying process were investigated for potato slices with thicknesses of 3 and 7mm in the dryer. The amount of airflow rate in the photovoltaic-thermal system, which was supplied by a fan, was controlled during the experiments. The power of this fan was supplied directly from photovoltaic panels and the remaining amount of electrical energy produced by the panels was transferred to an infrared radiation source for drying the product. The results showed that the best drying condition is at 0.004kg/s with the radiation source. The significant advantage of this system compared to systems that use only the radiating source or hot air, as well as systems that part of their electricity or total electricity is provided by the city's electricity, is a significant reduction in time of drying process and energy consumption, along with is that the total energy for the drying process is provided by solar energy. The system was also designed to transfer the heat of the photovoltaic panels to the inlet air of photovoltaic-thermal collector to increase the temperature of the air and decrease the photovoltaic temperature and therefore to improve the thermal and electrical energy efficiency.

**Keywords** Solar dryer; Infrared Wave; Photovoltaic Panel; Photovoltaic-Thermal Collector

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

#### \*Correspondence

Address: Engineering Faculty, Shahid Bahonar University of Kerman, Jomhuri-e Eslami Boulevard, Kerman, Iran. Postal Code: 7618868366  
Phone: +98 (34) 32111763  
Fax: +98 (34) 32120964  
ameri\_mm@uk.ac.ir

#### Article History

Received: November 14, 2019

Accepted: March 11, 2020

ePublished: June 20, 2020

### CITATION LINKS

[1] Drying and energy technologies [2] Some fundamental attributes of far infrared radiation drying of potato [3] A salient reduction of energy consumption and drying time in a novel PV-solar collector-assisted intermittent infrared dryer [4] Simultaneous application of microwave energy and hot air to whole drying process of apple slices: Drying kinetics, modeling, temperature profile and energy aspect [5] Solar PV powered mixed-mode tunnel dryer for drying potato chips [6] Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit [7] The effects of infrared and hot air drying on some properties of corn (Zea mays) [8] Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables [9] Influence of combined hot air impingement and infrared drying on drying kinetics and physical properties of potato chips [10] Tomato slices drying in a liquid desiccant-assisted solar dryer coupled with a photovoltaic-thermal regeneration system [11] Solar engineering of thermal processes [12] Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists [13] Infrared heating for food and agricultural processing (Contemporary Food Engineering Book 14)

## مطالعه آزمایشگاهی خشک کن فروسرخ- خورشیدی با سامانه فتوولتائیک- حرارتی

سعید میرزایی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

مهران عامری PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

امین ضیافروری PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

### چکیده

در مطالعه حاضر یک خشک کن فروسرخ- خورشیدی که انرژی آن به وسیله یک سیستم فتوولتائیک- حرارتی تامین می‌شد، در دانشگاه شهید باهنر کرمان طراحی، ساخت و مورد آزمایش قرار گرفت. زمان و دمای خشک شدن و مقدار انرژی الکتریکی مصرفی در حین فرآیند خشک شدن برای برش‌های سیب‌زمینی با ضخامت ۳ و ۷ میلی‌متر در سیستم خشک کن ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت. پارامتر کنترل شده در این تحقیق، میزان دبی هوای ورودی به سیستم فتوولتائیک- حرارتی بود که تامین این مقادیر مختلف دبی توسط یک فن انجام گرفت. انرژی الکتریکی این فن به صورت مستقیم از پنل‌های فتوولتائیک تامین شد و مقدار باقی‌مانده انرژی الکتریکی تولیدی توسط پنل‌ها به یک منبع تابشی فروسرخ جهت خشک کردن محصول انتقال یافت. بررسی‌ها نشان داد که بهترین شرایط خشک کردن در دبی ۰/۰۰۴ کیلوگرم بر ثانیه همراه با منبع تابشی است. مزیت قابل توجه این سامانه در مقایسه با سامانه‌هایی که فقط از منبع تابشی یا فقط از هوای داغ استفاده می‌کنند و همچنین سامانه‌هایی که بخشی از انرژی الکتریکی یا کل انرژی الکتریکی سامانه توسط جریان برق شهر تامین می‌شود، کاهش قابل توجه زمان فرآیند خشک شدن و انرژی مصرفی، و همچنین تامین کل انرژی مصرفی آن توسط انرژی خورشیدی است. همچنین این سامانه به صورتی طراحی شد که گرمای پنل‌های فتوولتائیک به هوای ورودی جمع‌کننده فتوولتائیک- حرارتی منتقل شود و باعث افزایش دمای هوای عبوری و کاهش دمای پنل‌ها شود تا بازده حرارتی و الکتریکی سیستم فتوولتائیک- حرارتی افزایش یابد.

**کلیدواژه‌ها:** خشک کن خورشیدی، فروسرخ، پنل فتوولتائیک، جمع‌کننده فتوولتائیک- حرارتی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۸/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۱

\*نویسنده مسئول: ameri\_mm@uk.ac.ir

### مقدمه

امروزه جوامع صنعتی و شهرهای بزرگ با مشکل آلودگی محیط زیست مواجه هستند و اثرات مخرب آلودگی‌ها در زمین، آب و هوا آشکار شده است. پایین آوردن مصرف انرژی‌های فسیلی و جایگزینی آنها با انرژی‌های پاک راه حل‌هایی برای کاهش آلودگی‌ها هستند. در این میان انرژی خورشیدی به دلیل فراوانی در دسترس بودن، پاک و ارزانی مورد توجه ویژه قرار گرفته است. یکی از فرآیندهایی که امروزه از انرژی‌های فسیلی به مقدار زیادی

استفاده می‌کند، خشک کردن محصولات است. خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های فرآوری محصولات کشاورزی محسوب می‌شود که از طریق کاهش رطوبت محصول می‌تواند سرعت واکنش‌های شیمیایی ناخواسته و حجم محصول را کاهش دهد و همچنین موجب تسهیل انتقال محصول برای بسته‌بندی و انبارداری شود. یکی از روش‌های خشک کردن محصولات، خشک کردن به وسیله امواج فروسرخ است که به ضخامت محدودی در مواد مرطوب نفوذ می‌کنند. خشک کردن مواد مرطوب به روش فروسرخ عموماً به دو صورت پیوسته و متناوب صورت می‌گیرد که روش متناوب به دلیل بازده انرژی بالاتر مزیت بیشتری نسبت به روش پیوسته دارد [1]. تاثیر ترکیب امواج فروسرخ با هوای سرد در فرآیند خشک کردن سیب‌زمینی توسط *افضل و آبه* بررسی شد [2]. آنها اثر عامل سرعت هوای ورودی را بر تاریخچه رطوبت، دما و خصوصیات خشک شدن سیب‌زمینی با استفاده از روش ترکیبی تابش فروسرخ و هوای سرد به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد که سرعت هوا تاثیری منفی بر نرخ خشک شدن گذاشته است. ضیافروری و *صفهانی* [3] با ساخت یک خشک کن خورشیدی فروسرخ متناوب مجهز به سامانه تولید برق فتوولتائیک علاوه بر کاهش زمان خشک شدن، مصرف انرژی را نیز به مقدار قابل توجهی کاهش دادند. نتایج آنها نشان داد که زمان خشک شدن در مقایسه با خشک کن خورشیدی حداقل ۷۵٪ و حداکثر ۸۳٪ و در مقایسه با خشک کن فروسرخ حداقل ۲۵٪ و حداکثر ۵۲٪ کاهش یافته است. به علاوه انرژی الکتریکی خشک کن ترکیبی حداکثر ۶۹٪ و حداقل ۴۰٪ نسبت به خشک کن فروسرخ کاهش یافته است. بهترین دمای خشک کردن سیب‌زمینی در این خشک کن در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد است و برای میوه «به» برای برش ۵ میلی‌متری، دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد بهترین حالت است. اغلب به منظور جلوگیری از سوختن و سخت شدن لایه سطحی محصولات و همچنین کاهش زمان خشک شدن از امواج فروسرخ در ترکیب با جریان هوای گرم استفاده می‌کنند که مزایای استفاده از این روش در تحقیقات گذشته مشخص شده است. هروز و همکاران [4]، با طراحی یک اجاق با قابلیت خشک کردن به وسیله هوای داغ و اشعه ماکروویو به بررسی فرآیند خشک شدن سیب در شرایط قدرت‌های ماکروویو ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ وات همراه با دمای هوای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد پرداختند. رطوبت سیب از مقدار ابتدایی ۸۶/۳٪ به ۲۰٪ رسید و زمان خشک شدن بین ۳۳۰ تا ۸۰۰ دقیقه متغیر بود. دمای قطعه‌های سیب در ۶۰ دقیقه ابتدایی به شدت زیاد شد، سپس به تعادل با دمای محیط خشک شدن رسید و در انتهای فرآیند خشک شدن دوباره زیاد شد. انرژی مصرفی مورد نیاز در حالت خشک کردن ترکیبی کاهش یافت و بازده انرژی با افزایش توان ماکروویو و افزایش دمای هوای داغ افزایش یافت. *تتاویلی و همکاران* [5]، با ترکیب یک پنل فتوولتائیک با یک کانال خشک کن خورشیدی مجهز به یک فن جریان ثابت محوری که به وسیله یک پنل فتوولتائیک تغذیه

خشک‌کن منتقل شد و در همین مسیر به وسیله یک گرم‌کن (Heater) به دمای هوای مورد نیاز رسید و مواد غذایی را خشک کرد. هوایی که شامل بخار آب محصول در حال خشک‌شدن بود به محفظه‌ای شامل رطوبت‌گیر منتقل شد و رطوبت گرفته‌شده طی مکانیزمی جهت خنک‌کردن پنل‌های فتوولتائیک استفاده شد. در ادامه هوای خشک‌شده به چرخه خشک‌کردن محصول بازگشت. پنل‌های فتوولتائیک نصف انرژی مورد نیاز این سامانه را فراهم کرد اما در این تحقیق انرژی استفاده‌شده جهت خشک‌کردن محصول بین ۶/۰ تا ۴/۱ کیلووات ساعت است که نشان‌دهنده مصرف انرژی زیاد این سامانه است. همچنین این سامانه از منبع تابشی در فرآیند خشک‌کردن استفاده نکرده است که باعث شده است زمان خشک‌کردن به مقدار زیادی افزایش یابد و زمان خشک‌شدن بین ۲۵۰ تا ۳۷۰ دقیقه متغیر است.

با وجود تمام مزایای ذکرشده در ترکیب هوای گرم و امواج فرورسرخ، استفاده هم‌زمان از این دو انرژی نیازمند مصرف انرژی بیشتری خواهد بود. در تحقیقات ذکرشده با وجود استفاده از انرژی خورشیدی در بخش‌هایی از فرآیند خشک‌شدن مواد غذایی، همچنان مصرف انرژی غیرخورشیدی و زمان خشک‌شدن مواد غذایی بالا است. قابل ذکر است که در تحقیقاتی که از پنل‌های فتوولتائیک در جهت تولید توان الکتریکی استفاده شده است به فرآیند بالارفتن دمای پنل که باعث کاهش توان تولیدی خواهد شد توجهی نشده است. در این آزمایش با ساخت یک سیستم خشک‌کننده فتوولتائیک- حرارتی که پنل‌ها به‌طور مستقیم فن دمنده و منبع تابشی را تغذیه می‌کنند، انرژی مورد نیاز برای فرآیندهای خشک‌شدن به وسیله هوای گرم و امواج فرورسرخ تماماً از انرژی خورشیدی تامین شد. در همین حال گرمای پنل‌های فتوولتائیک به هوای ورودی به سیستم فتوولتائیک- حرارتی منتقل شد و در نتیجه دمای پنل‌ها به مقدار قابل توجهی کاهش یافت که این کاهش دما باعث افزایش توان الکتریکی تولیدی توسط پنل‌ها شد.

### مشخصات خشک‌کننده

یک جمع‌کننده فتوولتائیک- حرارتی مشتمل بر بدنه اصلی (قاب) جمع‌کننده حرارتی، پنل فتوولتائیک، فن، تکیه‌گاه و سرپوش است. با این شرایط بدنه اصلی با ابعاد  $۱۹۶ \times ۵۴ \times ۳۵$  سانتی‌متر از جنس چوب ام‌دی‌اف ساخته شد که به علت وجود مواد پلاستیکی در داخل آن خصلت عایق‌بندی خوبی نیز دارد. با این وجود تمامی جوه بدنه اصلی توسط پشم شیشه به ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر عایق‌بندی شد تا اتلاف حرارت کاهش یابد. بر روی وجه داخلی بدنه جمع‌کننده فتوولتائیک- حرارتی، شیرهایی جهت قرارگرفتن پنل‌های فتوولتائیک ایجاد شد. این پنل‌ها بخشی از تشعشع رسیده را جذب می‌کنند. این بخش از تشعشع جذب‌شده توسط پنل‌ها صرف تولید الکتریسیته و بخشی صرف بالارفتن دمای پنل‌ها می‌شود. ورق آلومینیومی با رنگ سیاه کوره‌ای (ضد

می‌شد و یک کلکتور هوایی خورشیدی صفحه تخت که برای افزایش راندمان استفاده می‌شد به بررسی فرآیند خشک‌شدن چپیس سیب‌زمینی با ضخامت حدود ۵ میلی‌متر پرداختند. این آزمایش در دبی‌های هوای ۲/۸ و ۳/۱۲ و ۴/۱۸ متر مکعب بر دقیقه در دو حالت با پرده مشکی و بدون پرده مشکی که بالای تکه‌های سیب‌زمینی قرار گرفته بود در روزهای خورشیدی انجام شد. نتایج نشان داد که رنگ محصول خشک‌شده در حالت استفاده از پارچه مشکی همراه با استفاده از سدیم‌متابی‌سولفیت ۱٪ در مقایسه با سایر حالت‌های دیگر بهترین نتیجه را به همراه داشت. بالاترین بازدهی خشک‌کردن به میزان ۳۴/۲۹ و ۲۸/۴۹٪ در دبی جرمی ۰/۷۸۶ کیلوگرم بر ثانیه به ترتیب در حالت‌های با پرده و بدون پرده مشکی اتفاق افتاد و زمان خشک‌شدن در محدوده ۶ تا ۷ ساعت بود. ناتاکارناکول و همکاران<sup>[۶]</sup>، فناوری جدیدی را با ترکیب تابش فرورسرخ با هوای داغ و پمپ حرارتی برای خشک‌کردن میوه لونگان با رطوبت اولیه ۸۴ تا ۸۶٪ در دمای ۵۵ و ۶۵ درجه سانتی‌گراد با ۸۰٪ هوای بازگشتی پیشنهاد کردند. در همه حالت‌ها انرژی الکتریکی ورودی به لامپ فرورسرخ ۲۵۰، ۳۵۰ و ۴۵۰ وات بود. نتایج آنها نشان داد که این روش نرخ خشک‌شدن را با کاهش زمان خشک‌شدن افزایش می‌دهد. به علاوه افزایش توان تابشی سبب افزایش تخلخل و در نتیجه سبب کاهش چروکیدگی، بهبود آب‌گیری مجدد و کاهش سختی سطح نمونه خشک‌شده نسبت به نمونه‌های خشک‌شده با روش هوای داغ شد. تانسلی و همکاران<sup>[۷]</sup>، با مقایسه روش‌های خشک‌کردن ذرت به وسیله تابش فرورسرخ، هوای داغ و ترکیب آنها در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد نتیجه گرفتند که برای مواد با رطوبت بالای ۱۶٪، روش تابش فرورسرخ و ترکیبی بدون کاهش کیفیت به صورت قابل توجهی زمان و مصرف انرژی را کاهش می‌دهند و این روش را به عنوان یک شیوه جدید جهت خشک‌کردن ذرت پیشنهاد کردند. هبار و همکاران<sup>[۸]</sup>، با ترکیب خشک‌کردن به وسیله جابه‌جایی هوای داغ و امواج فرورسرخ برای سیب‌زمینی نشان دادند که زمان فرآیند و مصرف انرژی در روش ترکیبی در مقایسه با هوای داغ به ترتیب ۶۳ و ۴۸٪ کاهش یافته و به علاوه کیفیت محصول نیز از نظر رنگ و سختی سطح در روش ترکیبی بالاتر از روش خشک‌کردن با استفاده از امواج فرورسرخ است. ساپمون و نومهرم<sup>[۹]</sup> تاثیر استفاده توأم از جهت هوای داغ و امواج فرورسرخ را بر سینتیک خشک‌شدن و ویژگی‌های فیزیکی برش‌های سیب‌زمینی بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که ترکیب جت هوای گرم و امواج فرورسرخ نرخ خشک‌شدن بالاتری نسبت به روش خشک‌کردن با هوای گرم داشته و از نظر کیفی بر مقدار سختی و زوال رنگ تاثیر کمتری ایجاد می‌کند. دروزی و همکاران<sup>[۱۰]</sup> با ساخت یک خشک‌کن خورشیدی هوای داغ مجهز به سیستم بازیابی فتوولتائیک- حرارتی به بررسی فرآیند خشک‌شدن برش‌های گوجه‌فرنگی با ضخامت ۵ میلی‌متر پرداختند. هوای داغ به وسیله یک فن به داخل کلکتور هوایی خورشیدی دمیده شد. هوای داغ‌شده به داخل محفظه

4715KL04WB49 (شرکت NMB، چین) استفاده شد. برای تغذیه این فن به جای استفاده از شبکه برق یا باتری از پنل‌های فتوولتائیک به‌طور مستقیم استفاده شد. برای کنترل کردن مقدار الکتریسیته ورودی به فن، از یک مازول مبدل، مدل DC-DC LM2596 کاهنده خروجی (1.23V-30V 3A) با بازدهی ۹۲٪ استفاده شد، که مقدار معینی از الکتریسیته تولیدی توسط پنل‌ها را به فن داده و باقی‌مانده توان الکتریکی را به منبع تابشی منتقل می‌کرد. سرعت هوای خروجی از جمع‌کننده فتوولتائیک-حرارتی و خروجی از محفظه خشک‌کن توسط یک سرعت‌سنج پره‌ای مدل BE816A (بستون؛ چین) با دقت  $\pm 5\%$  اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری شدت تابش خورشید با یک تابش‌سنج خورشیدی مدل Cm6b 057995 (شرکت کیپ‌زون؛ هلند) انجام شد. این تابش‌سنج در کنار صفحه جمع‌کننده به‌گونه‌ای قرار داده شد که تابش عمود بر سطح را اندازه‌گیری نماید. وزن نمونه‌ها طی فرآیند خشک‌شدن به کمک دو حسگر لودسل مدل زمیک L6D (شرکت زمیک؛ هلند) با ظرفیت ۳ و دقت  $2/000$  کیلوگرم تعیین شد. این دو حسگر در محل تکیه‌گاه سینی محصول نصب شدند. حسگرها به‌صورت موازی به یک انتقال‌دهنده مدل TM-1020 (شرکت تیکا؛ ایران) متصل و خروجی انتقال‌دهنده از طریق درگاه سریال به رایانه وصل شد. نرم‌افزار مربوط به انتقال‌دهنده امکان مشاهده لحظه‌ای وزن محصول را فراهم نمود. نحوه اتصال تجهیزات در شکل ۴ نمایش داده شده است. در این سامانه فن و کنترلر به‌صورت سری قرار گرفته‌اند و دو پنل فتوولتائیک به همراه منبع تابشی و سیستم فن و کنترلر به‌صورت سری قرار گرفته‌اند.

جدول ۱) مشخصات فنی پنل‌های فتوولتائیک

| پارامتر           | مقدار                 |
|-------------------|-----------------------|
| ولتاژ مدار باز    | ۳۰/۳ ولت              |
| جریان اتصال کوتاه | ۲/۹۸ آمپر             |
| جریان حداکثر توان | ۲/۷۵۸ آمپر            |
| ولتاژ حداکثر توان | ۱۶/۳ ولت              |
| تعداد سلول‌ها     | ۳۶ عدد                |
| ابعاد             | ۹۰/۴ × ۶۰/۹ سانتی‌متر |



شکل ۱) تصویر خشک‌کن و صفحه فتوولتائیک استفاده‌شده در تحقیق حاضر

انعکاس) داخل بدنه اصلی و زیر پنل‌های فتوولتائیک قرار گرفت و نقش جاذب تشعشع خورشیدی را ایفا می‌کرد. تشعشع عبوری از پنل‌ها توسط جاذب حرارتی آلومینیومی جذب می‌شود. هوا در طی فرآیند خشک‌کردن از بالا و پایین این جاذب عبور می‌کرد. با عبور هوا از فضای بین پنل فتوولتائیک و جاذب حرارتی آلومینیومی، از بالا رفتن دمای پنل‌های فتوولتائیک جلوگیری شد و همچنین راندمان الکتریکی پنل‌ها و دمای هوای داخل جمع‌کننده نیز افزایش یافتند. همچنین تشعشع جذب‌شده توسط جاذب نیز صرف بالا رفتن دمای هوای عبوری از بالا و پایین این جاذب نیز شد. ورودی این جمع‌کننده یک حفره به قطر ۱۰ سانتی‌متر است که جهت قرارگرفتن فن دمنده در این قسمت تعبیه شده است. این حفره به‌گونه‌ای قرار گرفته است که هوای ورودی به‌طور مساوی در کانال بالا و پایین منتقل می‌شود. همچنین خروجی جمع‌کننده نیز به‌صورت یک حفره به قطر ۱۰ سانتی‌متر ساخته شده است. یک لوله پلاستیکی به قطر ۱۰ سانتی‌متر در خروجی این جمع‌کننده متصل شد تا هوای داغ خروجی را با کوتاه‌ترین طول اتصال ممکن به داخل محفظه خشک‌کن منتقل کند. محفظه خشک‌کن روی یک پایه چوبی قرار دارد و هوای داغ از طریق حفره‌ای در زیر این محفظه به داخل هدایت می‌شود و به سینی محصولات برخورد می‌کند. دیواره‌های جمع‌کننده روی یک شاسی فلزی قابل حمل تحت زاویه ۳۰ درجه برابر عرض جغرافیایی منطقه آزمایش، نصب شد. ورودی محفظه خشک‌کن و همین‌طور خروجی جمع‌کننده در فاصله ۱۰۰ سانتی‌متری از زمین قرار داشتند. در این جمع‌کننده دو پنل فتوولتائیک از نوع سیلیکونی پلی‌کریستالی با ابعاد هر یک  $11 \times 462 \times 977$  میلی‌متر استفاده شد که توان اسمی هر پنل برابر با ۴۵ وات است. مشخصات پنل فتوولتائیک استفاده‌شده در جدول ۱ ذکر شده است. تصویر خشک‌کن در شکل ۱ و ۲ و طرح‌واره خشک‌کن مورد استفاده در شکل ۳ نشان داده شده است.

ابعاد محفظه خشک‌کن  $13 \times 45 \times 60$  سانتی‌متر است. برای ورود و خروج محصولات روی سینی از محفظه خشک‌کن یکی از سطوح عمودی به‌صورت لولایی و قابل باز و بسته‌شدن ساخته شده و در همچنین برای خروج هوای ورودی روی بقیه سطوح عمودی و در گوشه‌های به دور از سطح ورود و خروج محصولات، ۴ حفره به قطر ۷ سانتی‌متر تعبیه شده است. سطح خارجی محفظه خشک‌کن به‌وسیله پشم شیشه کاملاً عایق شده است. منبع تابشی فروسرخ، یک لامپ حلقوی ۱۳۰ وات کوارتز است که در سقف محفظه در فاصله ۵ سانتی‌متری سینی محصولات نصب می‌شود. دمای هوای قسمت‌های مختلف خشک‌کن با استفاده از یک حسگر دما نوع k و مدل KFT2 (شرکت کین؛ انگلستان) و دمای مرکز نمونه سیب‌زمینی‌ها با استفاده از یک حسگر دما نوع T و مدل ۲۹/۱-MT (شرکت فیزی‌تمپ؛ ایالات متحده) با اندازه نوک  $33/0$  میلی‌متر در هر ثانیه اندازه‌گیری و توسط ثبت‌کننده دما (مدل پرووا ۸۰۰) ذخیره شد. جهت جابه‌جایی هوا داخل کانال‌های جمع‌کننده فتوولتائیک-حرارتی از یک فن DC، مدل

است. در توضیح رطوبت نسبی باید گفت که اگر در شرایطی که ماده مورد نظر هیچ گونه تبادل آب یا بخار آبی با محیط نداشته باشد رطوبت ماده را اندازه‌گیری کرد به این مقدار رطوبت، رطوبت تعادلی می‌گویند. رطوبت تعادلی به دمای هوای اطراف ماده، سرعت هوا اطراف ماده و رطوبت نسبی (RH) بستگی دارد. هر چه دما و سرعت هوای اطراف ماده بالاتر رود مقدار رطوبت تعادلی کاهش می‌یابد و هرچه رطوبت نسبی بالاتر باشد رطوبت تعادلی نیز بالاتر خواهد بود. از آن جایی که محتوای رطوبت تعادلی در مقایسه با  $M_o$  و  $M_e$  ناچیز است لذا معادله ۱، به معادله ۲ تبدیل می‌شود:

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \quad (2)$$

نسبت انرژی حرارتی خورشیدی (SHF) بیانگر سهمی از کل انرژی مصرفی است که توسط گرمایش خورشیدی تامین می‌شود و از رابطه ۳ محاسبه شده است:

$$SHF = \frac{E_{SH}}{E_T} \quad (3)$$

که در آن  $E_{SH}$  انرژی حرارتی تامین‌شده توسط جمع‌کننده خورشیدی است. یکی از مهم‌ترین عامل‌های عملکردی در هر سامانه خورشیدی- گرمایی، مقدار انرژی حرارتی تولیدشده در جمع‌کننده آن در مدت زمان انجام فرآیند است که از رابطه ۴ محاسبه می‌شود[11]:

$$E_{SH} = \int_L \dot{Q} dt \quad (4)$$

که در آن  $dt$  بازه زمانی اندازه‌گیری توان برحسب ثانیه،  $L$  مدت زمان انجام آزمایش برحسب ثانیه و  $\dot{Q}$  توان حرارتی است. مقدار  $\dot{Q}$  از رابطه ۵ به‌دست می‌آید:

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (5)$$

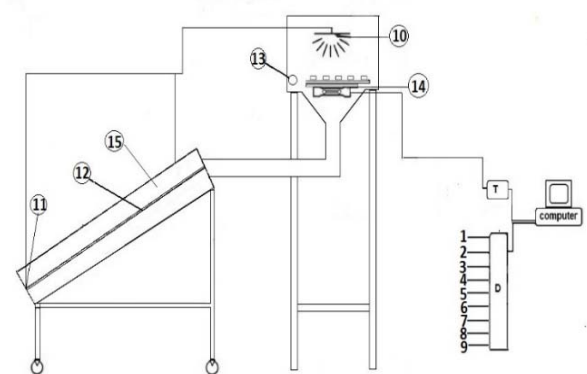
که در این رابطه  $C_p$  گرمای ویژه هوای عبوری (ژول بر کیلوگرم کلوین)،  $\dot{m}$  دبی جرمی هوای عبوری (کیلوگرم بر ثانیه) و  $\Delta T$  اختلاف دمای بین هوای ورودی و خروجی از جمع‌کننده است.

### آماده‌سازی نمونه

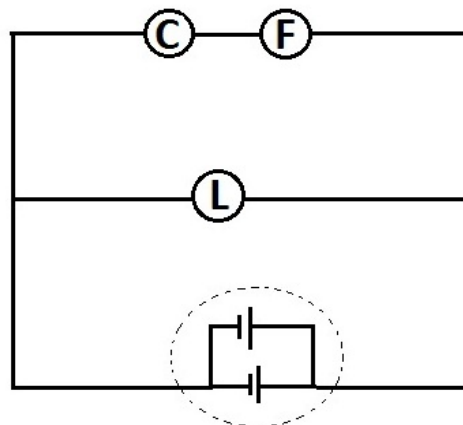
سیب‌زمینی‌های تازه قبل از فرآیند خشک‌شدن در دمای  $4 \pm 1$  درجه سانتی‌گراد در یخچال نگهداری شدند. حدود یک ساعت قبل از هر آزمایش در دمای محیط قرار داده شدند تا با محیط هم‌دما شوند. سپس نمونه‌ها به‌وسیله ابزار برش الکتریکی مدل GE300 جهت هر آزمایش در ضخامت ۳ و ۷ میلی‌متر برش زده شدند و به‌وسیله یک ابزار تیز دایره‌ای به‌صورت دایره‌هایی به قطر ۲/۴ سانتی‌متر در آمدند. رطوبت اولیه نمونه‌ها با استفاده از استاندارد AOAC<sup>[12]</sup> روش ۹۳۱/۰۴ تعیین شد. در این روش ابتدا یک ظرف خالی که خشک باشد را درون یک خشک‌کن هوای گرم قرار داده و در دمای ۱۰۵ درجه به مدت ۳ ساعت نگه می‌داریم. سپس ظرف را به یک دسیکاتور منتقل کرده تا سرد شود. جرم ظرف را اندازه می‌گیریم. ۲ گرم از ماده مورد نظر را درون ظرف قرار می‌دهیم و ظرف را درون خشک‌کن قرار داده و به مدت ۳ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه نگه می‌داریم. سپس ظرف را پوشانده و درون دسیکاتور قرار می‌دهیم



شکل ۲) ورودی و خروجی‌های خشک‌کن



شکل ۳) طرح‌واره خشک‌کن شامل: حسگرهای دما (۱ تا ۹)، منبع فرسوخ (۱۰)، فن (۱۱)، صفحه جاذب آلومینیومی (۱۲)، خروجی (۱۳)، لودسل (۱۴)، پل فتوولتائیک (۱۵)، ثبت‌کننده دما (D)، انتقال‌دهنده لودسل (T)



شکل ۴) نحوه اتصال تجهیزات مربوط؛ C: مائول میدل کاهنده خروجی، L: منبع فرسوخ، F: فن

### محاسبه عامل‌ها

برای پیش‌بینی سینتیک خشک‌شدن از منحنی‌های نسبت رطوبت برحسب زمان (MR) استفاده می‌شود که از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$MR = \frac{M_t - M_o}{M_o - M_e} \quad (1)$$

که در این رابطه  $M_t$ ،  $M_e$  و  $M_o$  به‌ترتیب محتوای رطوبت در هر لحظه، محتوای رطوبت تعادلی و محتوای رطوبت اولیه جسم مرطوب برحسب جرم ماده خشک است و MR نسبت رطوبت



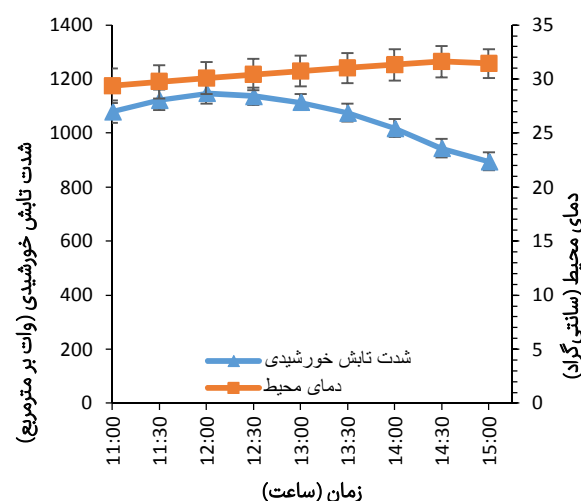
تا سرد شود. جرم ظرف با ماده را اندازه می‌گیریم. سپس از رابطه ۶ برای محاسبه درصد رطوبت استفاده می‌کنیم.

$$\text{moisture}(\%) = \frac{(w_1 - w_2) \times 100}{w_1} \quad (6)$$

که در رابطه بالا  $w_1$  جرم اولیه ماده (گرم) قبل از خشک کردن و  $w_2$  جرم نهایی ماده (گرم) بعد از خشک کردن است.

### بررسی نتایج

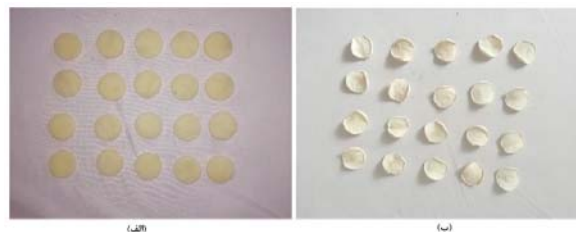
منحنی مربوط به ارزیابی عامل‌های محیطی برای ضخامت ۳ و ۷ میلی‌متر سیب‌زمینی در طول روزهای انجام آزمایش‌ها در نمودار ۱ نشان داده شده است. تغییرات میانگین شدت تابش و درجه حرارت محیط، در طول ۲۴ روز (در محدوده زمانی ۴ شهریور تا ۲۷ شهریور ۹۷ در محل انجام آزمایش) در نمودار ۱ نمایش داده شده است.



نمودار ۱) تغییرات میانگین دمای محیط و شدت تابش در طول روزهای انجام آزمایش در کرمان

همان‌گونه که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود بیشترین میانگین دما ۳۱/۵ درجه سانتی‌گراد است که در ساعت ۱۴:۳۰ ثبت شده و بیشترین میانگین تابش برابر ۱۱۴۵ وات بر مترمربع است که در ساعت ۱۲:۰۰ رخ داده است. در مجموع، میانگین دما ۳۰/۶ درجه سانتی‌گراد و میانگین شدت تابش در این مدت ۱۰۵۸ وات بر مترمربع اندازه‌گیری شد. تحت این شرایط رطوبت برش‌های سیب‌زمینی از مقدار اولیه ۸۱٪ (بر مبنای جسم مرطوب) به رطوبت نهایی ۱۰٪ کاهش یافت.

آزمایش‌ها در ۵ دبی هوایی مختلف شامل ۰، ۰/۰۰۴، ۰/۰۲۱، ۰/۰۲۷ و ۰/۰۳ کیلوگرم بر ثانیه همراه با منبع تابشی انجام شدند و عامل‌های زمان خشک‌شدن، توان الکتریکی مصرفی توسط فن و منبع تابشی، دمای محفظه خشک‌کننده، دمای مرکز برش سیب‌زمینی، دمای هوای ورود و خروج از جمع‌کننده فتوولتائیک-حرارتی اندازه‌گیری شدند. برای مقایسه تاثیر استفاده از منبع تابشی و عدم استفاده از منبع تابشی، آزمایش با دبی



شکل ۵) برش‌های ۳ میلی‌متری سیب‌زمینی در تصویر: الف) قبل از فرآیند خشک‌کردن، ب) بعد از فرآیند خشک‌کردن

در جهت تحلیل بهتر سازوکارهای انتقال حرارت و رطوبت، منحنی‌های نسبت رطوبت برای برش ۳ میلی‌متر در دبی‌های مختلف هوا در نمودار ۲ ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود کمترین زمان خشک‌کردن در حالت دبی جرمی ۰/۰۰۴ کیلوگرم بر ثانیه است و زمان خشک‌شدن برای برش ۳ میلی‌متری در این حالت ۹۵ دقیقه است. بعد از دبی ۰/۰۰۴ کیلوگرم بر ثانیه کمترین زمان خشک‌شدن مربوط به دبی ۰/۰۲۱ کیلوگرم بر ثانیه است که زمان خشک‌شدن در این حالت ۱۰۵ دقیقه است. دلیل اینکه در حالت ۰/۰۰۴ کیلوگرم بر ثانیه کمترین زمان خشک‌شدن را به خود اختصاص داد این است که هوای داغ قادر است رطوبت لایه‌های اولیه را در مدت زمان کمی از بین برده و سپس با کمک لامپ، رطوبت موجود در لایه‌های داخلی سیب‌زمینی را نیز از بین ببرد. اما عدم وجود هر کدام از حالت‌های منبع تابشی یا هوای داغ باعث از بین رفتن یکی از خاصیت‌های مهم فرآیند خشک‌شدن می‌شود. همان‌طور که ذکر شد در حالتی که لامپ فروسرخ خاموش باشد، با وجود آنکه در ابتدا سرعت خشک‌کردن بالایی دارد، اما به دلیل نفوذ کم گرمای هوای داغ به لایه‌های داخلی سیب‌زمینی بیشترین زمان خشک‌کردن به دست می‌آید. در صورتی که فقط لامپ فروسرخ وجود داشته باشد به دلیل افزایش رطوبت محفظه خشک‌کن و نبود عامل خارج‌کننده بخار آب، رطوبت هوا به سمت اشباع پیش می‌رود و نرخ خشک‌شدن را کاهش می‌دهد. همچنین در ضخامت‌های بزرگ‌تر تابش فروسرخ به‌تنهایی نمی‌تواند به لایه‌های داخلی محصول نفوذ کند [13].

در مقایسه حالت‌های دبی ۰/۰۰۴ و ۰/۰۲۱ کیلوگرم بر ثانیه در ضخامت ۳ میلی‌متر باید خاطر نشان کرد که طبق اندازه‌گیری‌های انجام‌شده دمای هوای محفظه خشک‌کن در حالت ۰/۰۰۴ کیلوگرم بر ثانیه به‌طور میانگین ۴۹ الی ۵۲ است و در حالت ۰/۰۲۱ کیلوگرم بر ثانیه در حدود ۴۴ الی ۴۶ درجه سانتی‌گراد است که یکی از دلایل سریع‌تر خشک‌شدن در حالت ۰/۰۰۴ کیلوگرم بر ثانیه است. توان الکتریکی لامپ در حالت‌های ۰/۰۰۴ و ۰/۰۲۱ کیلوگرم بر ثانیه تقریباً برابر و در حدود ۵۲ الی ۵۳ وات است. پس در حالت

تابشی به تنهایی، هم کیفیت محصول خشک شده را کاهش می دهد و هم کمترین زمان را نیز در پی نخواهد داشت. اما با ترکیب هوای داغ با اشعه فروسرخ دمای سیب زمینی کاهش یافته و سیب زمینی بدون سوختن فرآیند خشک کردن را طی می کند. همچنین آزمایش خشک کردن با دبی  $0.004 \text{ kg/s}$  بر ثانیه نسبت به سایر حالاتی که آزمایش همراه با دبی هوا انجام شد، دارای دمای محصول بالاتری در حین فرآیند خشک کردن است و این دمای بالاتر یکی از دلایل مهم در کاهش زمان خشک شدن است. در سایر حالت ها به دلیل سرعت بالای هوای ورودی و خنک بودن این هوا، دمای سیب زمینی کاهش یافته و فرآیند خشک شدن دیرتر انجام خواهد شد.

منحنی توان الکتریکی مصرفی کل سامانه در فرآیند خشک کردن برش  $3 \text{ mm}$  سیب زمینی در نمودار ۵ نمایش داده شده است. همان طور که مشخص است در بین حالت هایی که هوای داغ و منبع تابشی ترکیب می شوند کمترین توان مصرفی توسط سامانه مربوط به حالت آزمایش با دبی  $0.004 \text{ kg/s}$  بر ثانیه است. در حالتی که آزمایش فقط با فن و در دبی  $0.03 \text{ kg/s}$  بر ثانیه انجام می شود مقدار توان الکتریکی مصرفی کمترین مقدار را دارد. اما به دلیل آنکه در این حالت زمان خشک شدن از سایر حالت های آزمایش بیشتر است در نتیجه این آزمایش اهمیت کمتری نسبت به سایر حالت ها دارد.

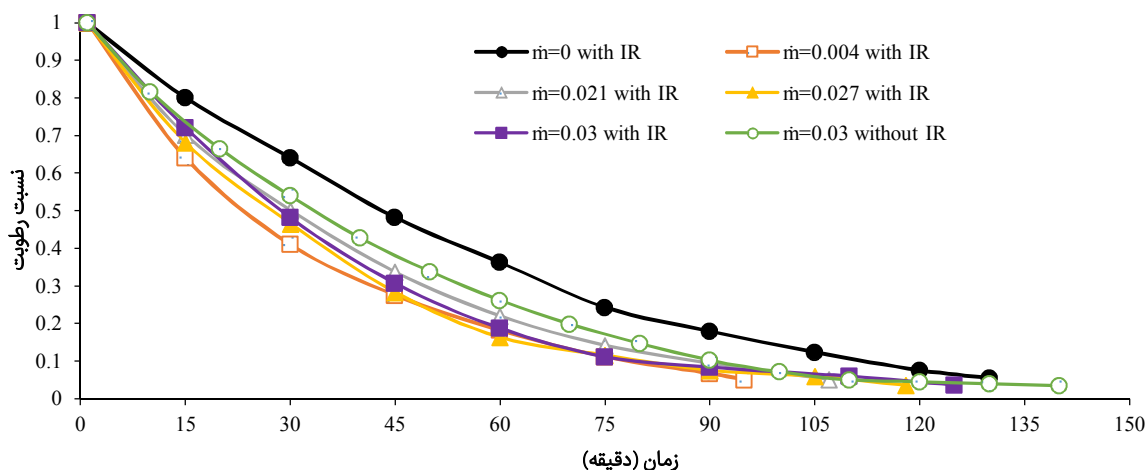
منحنی توان مصرفی منبع فروسرخ در فرآیند خشک کردن برش  $3 \text{ mm}$  سیب زمینی در نمودار ۶ نمایش داده شده است. طبق نمودار ۶ توان الکتریکی مصرفی منبع تابشی در تمام حالت ها نزدیک به هم هستند و مشخص است که توان استفاده شده توسط فن تاثیر محسوسی در مقدار توان استفاده شده توسط منبع تابشی ندارد.

هر چه ضخامت ماده مورد نظر بیشتر و دمای محفظه خشک کننده کمتر باشد زمان خشک کردن افزایش می یابد. منحنی نسبت رطوبت در فرآیند خشک شدن برش  $7 \text{ mm}$  سیب زمینی در دبی های مختلف هوا در نمودار ۷ ارایه شده است.

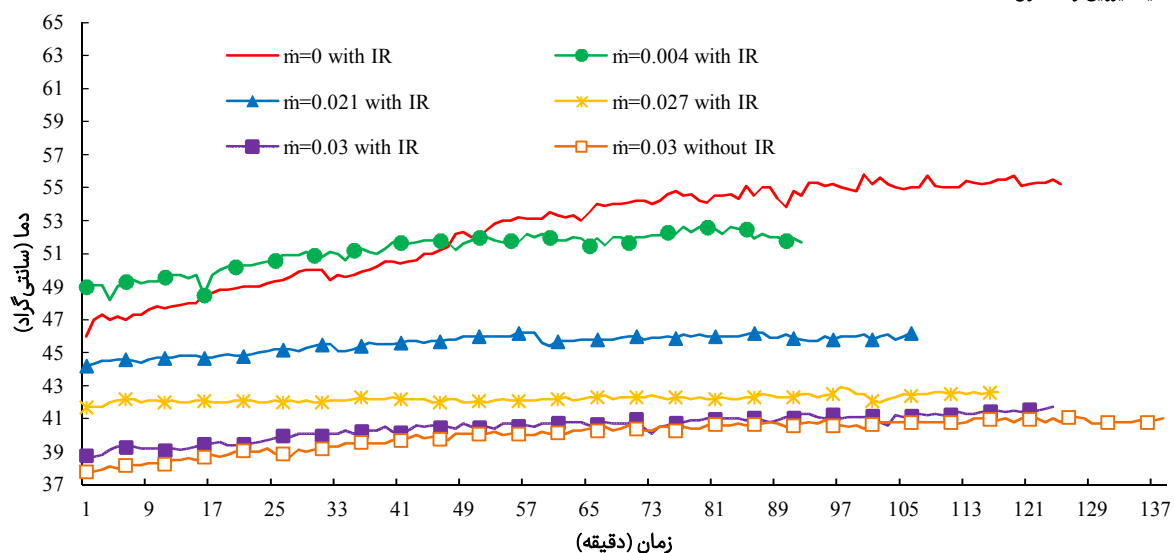
توان های تابشی برابر، حالتی که دمای هوای داغ تری را تولید کند زمان کمتری خواهد داشت. توان مصرفی منبع تابشی در فرآیند خشک کردن با دبی هوای  $0.004 \text{ kg/s}$  بر ثانیه  $0.52$  الی  $0.53$  وات است. سایر حالت هایی که آزمایش همراه با تولید هوای داغ انجام شد، تقریباً دارای مصرف توان تابشی در حدود  $0.52$  الی  $0.53$  وات هستند، اما این آزمایش ها به دلیل سرعت بالاتر فن در مقایسه با حالت خشک کردن با دبی  $0.004 \text{ kg/s}$  بر ثانیه، دارای هوای سردتری در هنگام ورود به محفظه خشک کن هستند که باعث افزایش زمان خشک شدن می شود. یکی دیگر از عامل های تاثیرگذار در فرآیند خشک شدن، دمای هوای برخوردی به لامپ و محصول است که هر چه دمای هوای برخوردی به محصول و لامپ پایین تر باشد باعث سردتر شدن لامپ و سطح سیب زمینی و در نتیجه افزایش زمان خشک شدن می شود.

منحنی دمای خشک کن بر حسب زمان فرآیند خشک کردن برای برش  $3 \text{ mm}$  سیب زمینی در نمودار ۳ نمایش داده شده است. همان طور که مشخص است دمای محفظه در حالتی که فن در فرآیند خشک کردن وجود ندارد و فقط از منبع تابشی استفاده شده است از سایر حالت های خشک کردن بالاتر است. اما همچنان که گفته شد، عدم استفاده از هوای داغ در فرآیند خشک کردن باعث می شود که بخار آبی که به دلیل خشک کردن محصول در محفظه خشک کن وجود دارد بسیار آهسته از محفظه خارج شود و در نتیجه هوای داخل خشک کن به سمت حالت اشباع پیش رفته و سرعت خشک کردن کاهش یابد. حالت دبی  $0.004 \text{ kg/s}$  بر ثانیه در بین تمام آزمایش های دیگر که دبی هوا در آزمایش وجود دارد، بیشترین دمای محفظه را دارا است که باعث می شود زمان خشک شدن در این حالت کمترین مقدار باشد.

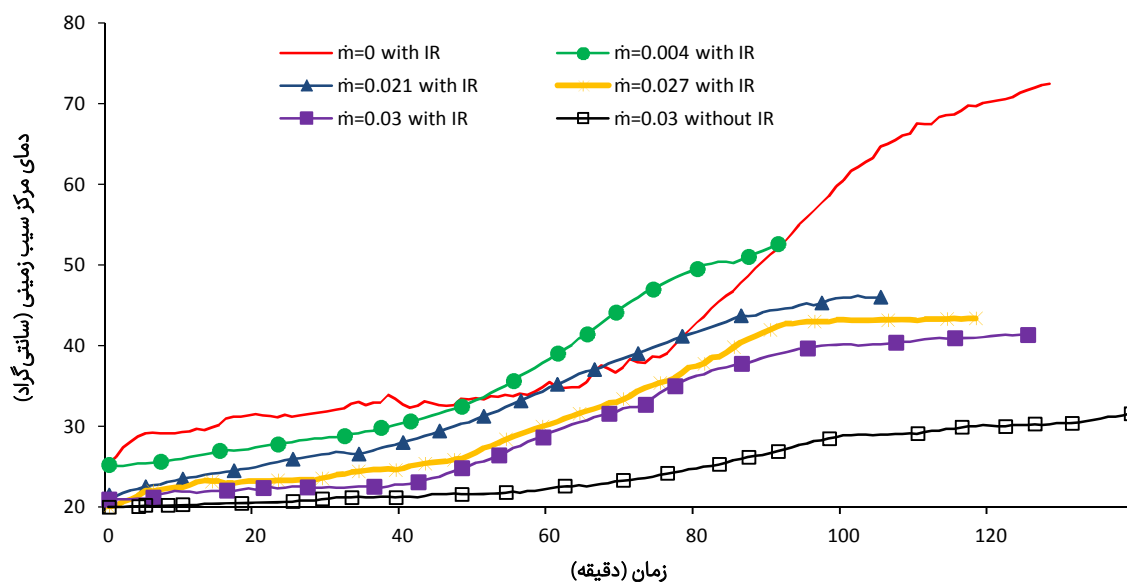
منحنی دمای مرکز برش های  $3 \text{ mm}$  سیب زمینی در نمودار ۴ نمایش داده شده است. همان طور که مشخص است دمای مرکز سیب زمینی در حالتی که فقط منبع فروسرخ وجود دارد در اواخر فرآیند خشک شدن بسیار بالا رفته و احتمال سوختن سطح سیب زمینی را بالا می برد. پس مشخص است که استفاده از منبع



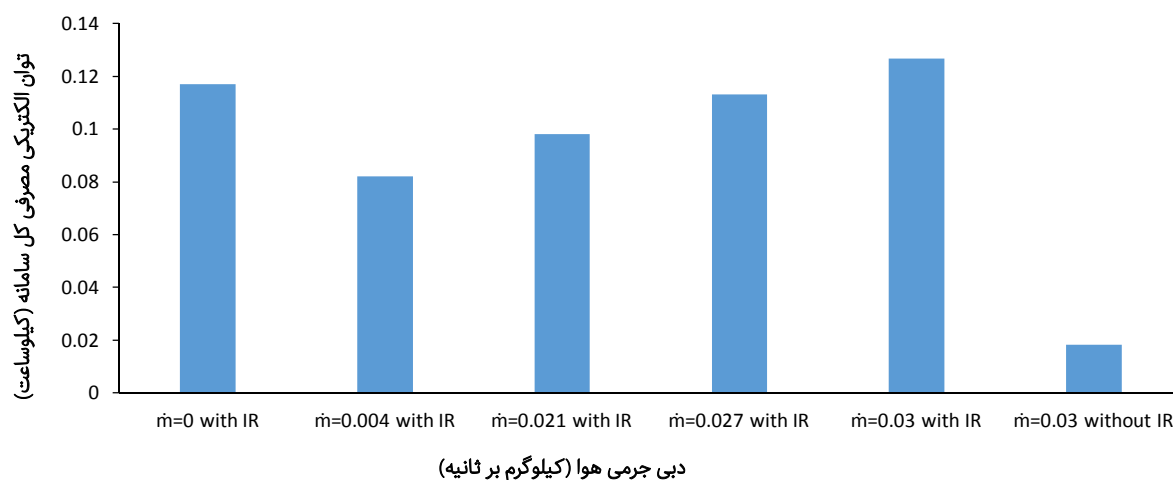
نمودار ۷) نسبت رطوبت در فرآیند خشک کردن برش  $3 \text{ mm}$  سیب زمینی در خشک کن فروسرخ- خورشیدی با سامانه فتوولتائیک- حرارتی



نمودار ۳) دمای خشک‌کن مربوط به حالت‌های مختلف در فرآیند خشک‌کردن ضخامت ۳ میلی‌متری در خشک‌کن فروسرخ- خورشیدی با سامانه فتوولتائیک- حرارتی

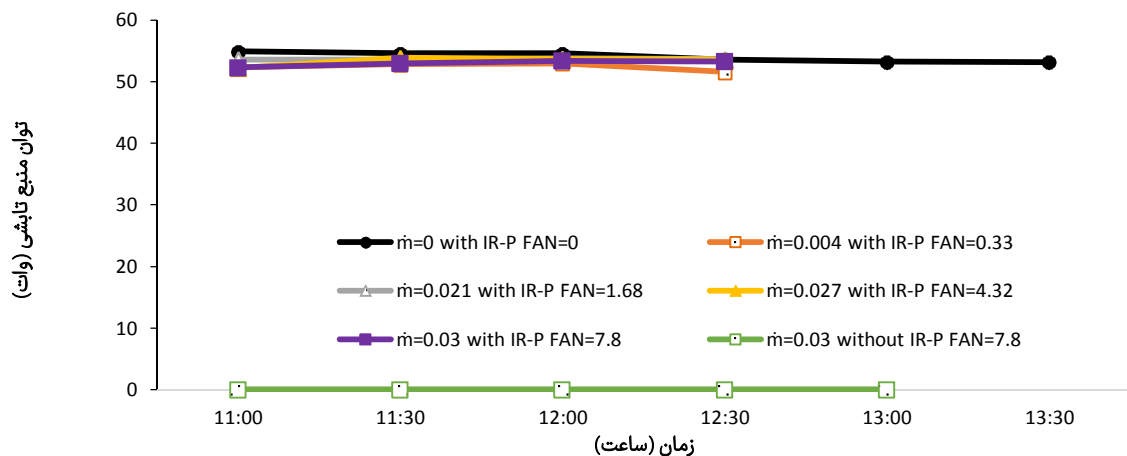


نمودار ۴) دمای مرکز سیب‌زمینی در فرآیند خشک‌کردن برش ۳ میلی‌متری سیب‌زمینی در خشک‌کن فروسرخ- خورشیدی با سامانه فتوولتائیک- حرارتی

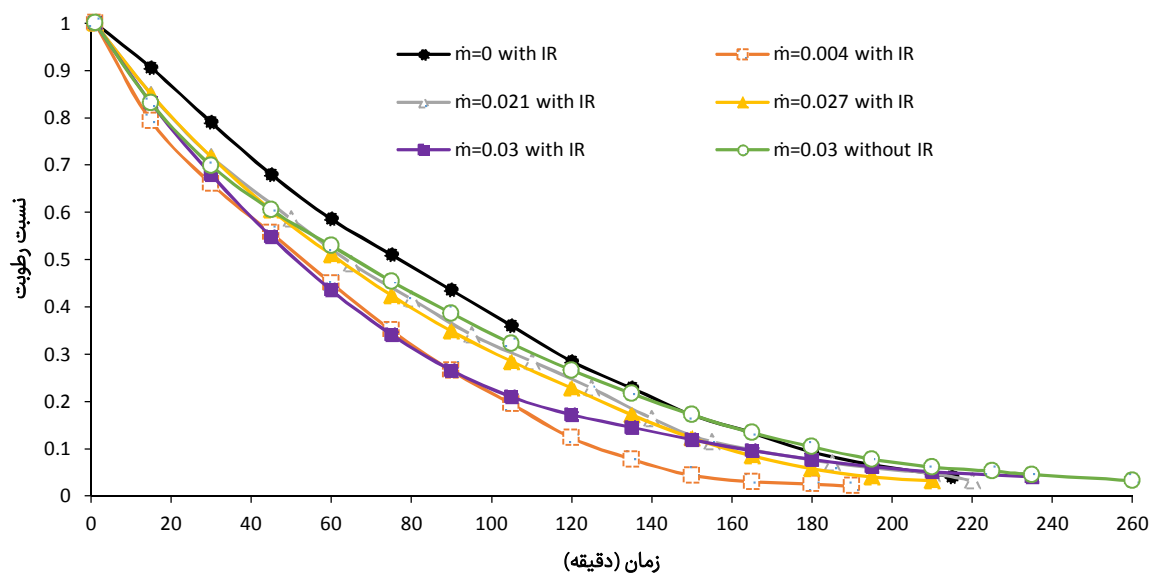


نمودار ۵) توان الکتریکی مصرفی کل سامانه در فرآیند خشک‌کردن برش ۳ میلی‌متری سیب‌زمینی در خشک‌کن فروسرخ- خورشیدی با سامانه فتوولتائیک- حرارتی





نمودار ۶) توان مصرفی منبع فروسرخ در فرآیند خشک کردن برش ۳ میلی متری سیب زمینی در خشک کن فروسرخ- خورشیدی با سامانه فتوولتائیک- حرارتی



نمودار ۷) نسبت رطوبت در فرآیند خشک کردن برش ۷ میلی متری سیب زمینی در خشک کن فروسرخ- خورشیدی با سامانه فتوولتائیک- حرارتی

به تنهایی این است که با افزایش شدید دمای سطح سیب زمینی باعث سوختن سیب زمینی و کاهش کیفیت محصول خواهد شد. منحنی دمای خشک کن مربوط به حالت های مختلف در ضخامت ۷ میلی متری را در نمودار ۸ مشاهده می کنید. دمای محفظه خشک کن در ضخامت ۷ میلی متری مشابه دما در حالت ضخامت ۳ میلی متری است اما مشخص است که به دلیل ضخامت زیاد محصول و افزایش زمان خشک شدن، در انتهای فرآیند خشک شدن به دلیل کاهش تشعشع خورشیدی و در نتیجه کاهش توان الکتریکی تولیدی، توان مصرفی منبع تابشی، شیب دمای محفظه خشک کن و دمای محفظه کاهش خواهند یافت.

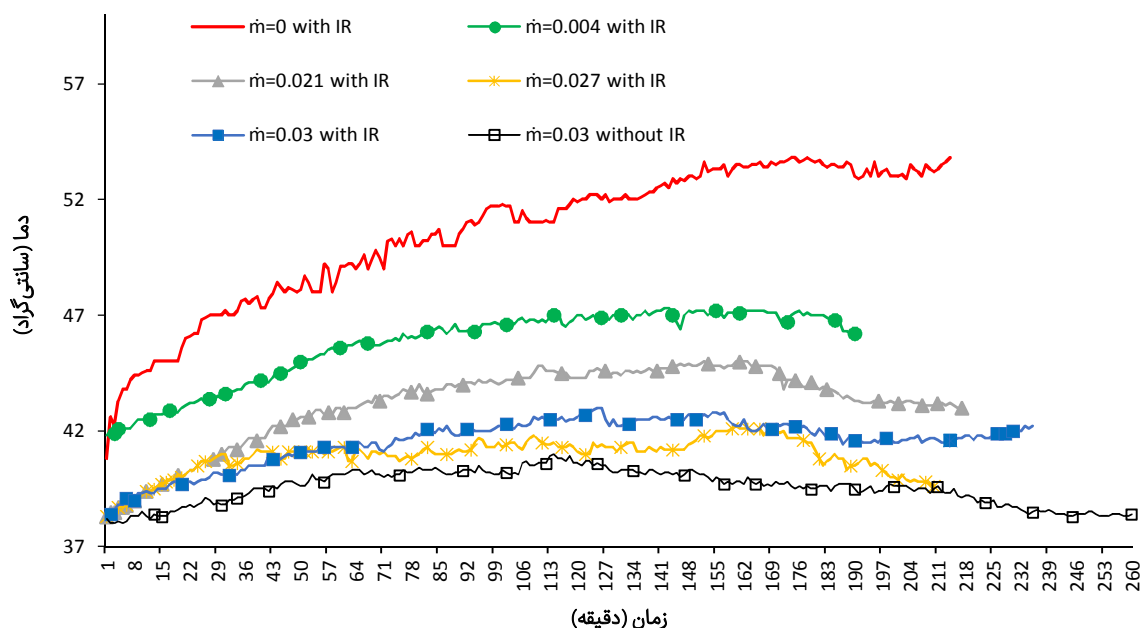
منحنی دمای مرکز برش های ۷ میلی متری سیب زمینی در نمودار ۹ نمایش داده شده است. تاثیر استفاده از هوای داغ همراه با لامپ فروسرخ در نمودار ۹ مشاهده می شود. با توجه به نمودار ۹ مشخص است که دمای مرکز محصول در محدود مجاز نگهداشته شده و کیفیت خشک کردن افزایش یافته است. همچنین

همچنان که مشاهده می شود منحنی های نرخ خشک شدن برای هر دو ضخامت کاملاً روند نزولی دارد و نرخ خشک شدن با افزایش دما محفظه خشک کن افزایش پیدا می کند. برای ضخامت ۷ میلی متر کمترین زمان خشک شدن ۱۹۰ دقیقه است، که مربوط به حالت دبی جرمی ۴/۰۰ کیلوگرم بر ثانیه هوای داغ است و طبق اندازه گیری های انجام شده سرعت هوای ورودی به هوای خشک در این حالت ۵/۰ متر بر ثانیه است. اما باز هم عامل های شدت تابش و نرخ خروج رطوبت حاصل از فرآیند خشک کردن نیز در زمان خشک شدن دخالت دارند. همچنین به دلیل افزایش ضخامت محصول، تاثیر گذاری جریان هوای داغ بر خشک شدن محصول کم می شود و هوای داغ به سختی به لایه های داخلی محصول نفوذ می کند. در این حالت اثر گذاری منبع فروسرخ بیشتر خواهد بود. در کل مشاهده شد که اگر از تابش فروسرخ یا هوای داغ به تنهایی استفاده شود زمان خشک کردن بسیار بیشتر از حالت های ترکیبی است. یکی دیگر از دلایل مناسب نبودن استفاده از لامپ فروسرخ

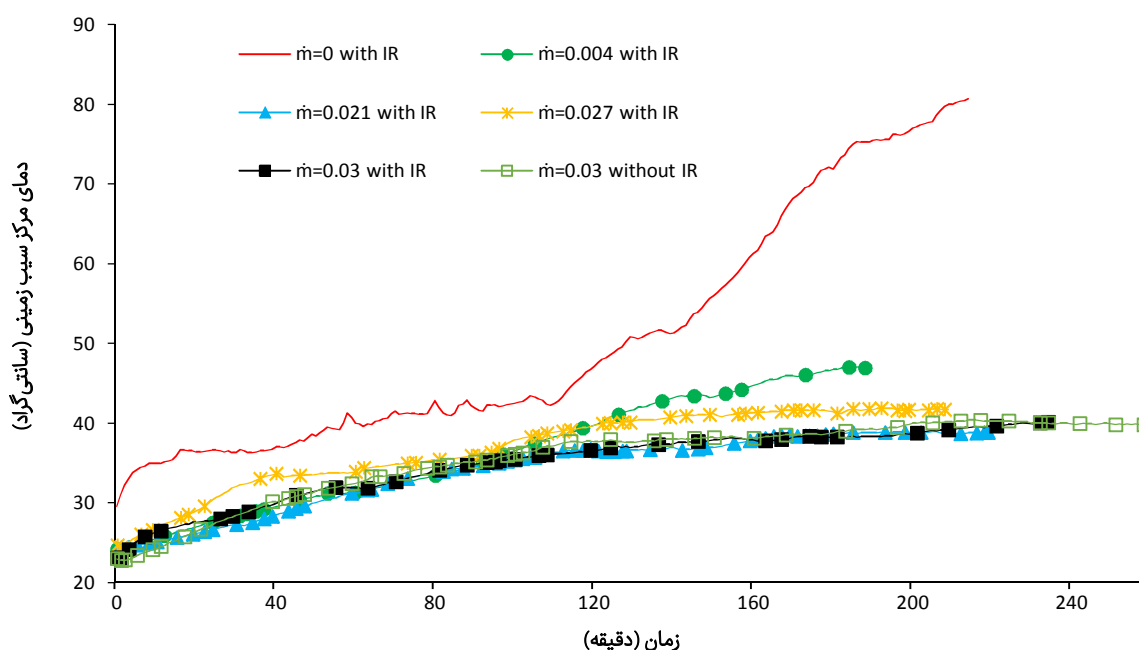
که مشخص است با ترکیب هوای داغ و منبع تابشی زمان فرآیند خشک شدن محصول کاهش پیدا می‌کند و به دلیل اینکه توان مصرفی توسط منبع تابشی تقریباً در تمام حالت‌های آزمایش با هم برابر است پس در فرآیند خشک کردن محصول، آزمایشی که کمترین زمان خشک شدن و توان مصرفی فن کمتری داشته باشد دارای توان الکتریکی کمتری توسط سامانه در نمودار ۱۰ مربوط به آزمایش با دبی ۰/۰۰۴ کیلوگرم بر ثانیه است.

به دلیل ضخامت زیاد محصول و کاهش نفوذ تشعشع تولیدی توسط منبع تابشی، در حالتی که دبی هوای داغ وجود دارد گرما به صورت یکنواخت در سیب زمینی منتشر می‌شود و در نتیجه منحنی‌های دمای مرکز سیب زمینی مشابه یکدیگر می‌شوند و فقط در انتها فرآیند خشک کردن است که تاثیر هوای داغ بر دمای مرکز سیب زمینی مشخص می‌شود.

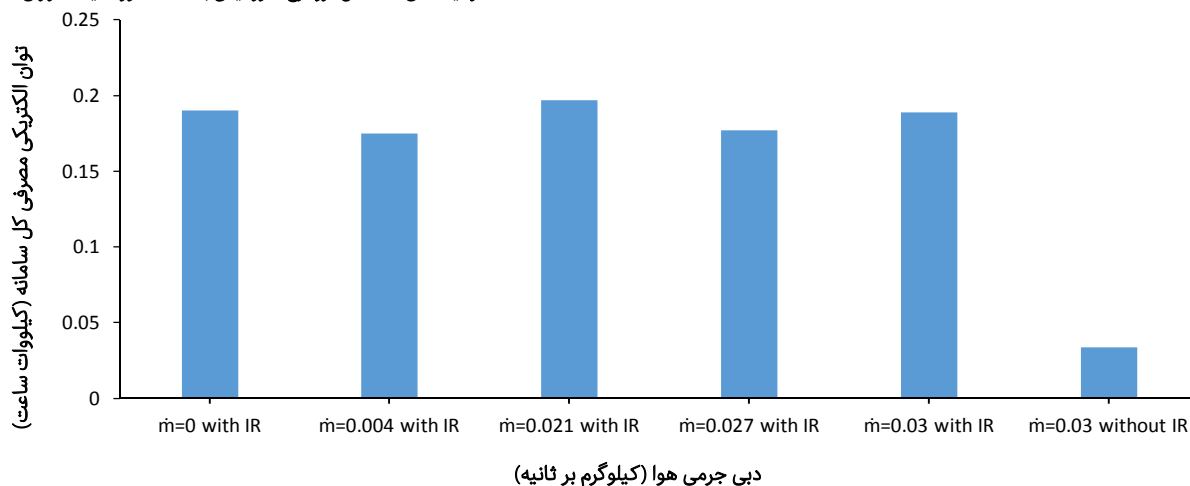
منحنی توان الکتریکی مصرفی کل سامانه در فرآیند خشک کردن برش ۷ میلی متری در نمودار ۱۰ نمایش داده شده است. همان طور



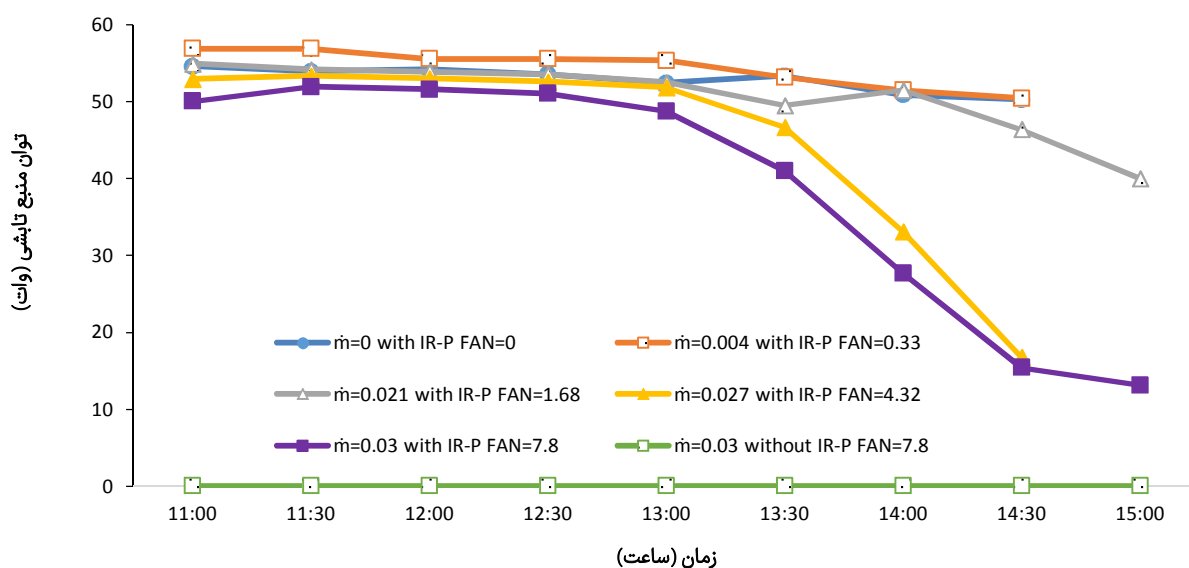
نمودار ۸) دمای خشک کن مربوط به حالت‌های مختلف در فرآیند خشک کردن ضخامت ۷ میلی متری در خشک کن فروسرخ- خورشیدی با سامانه فتوولتائیک- حرارتی



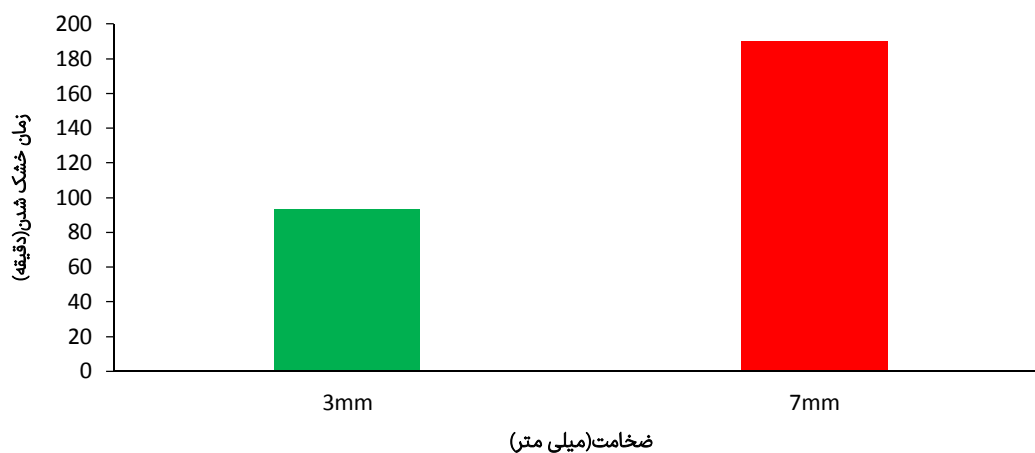
نمودار ۹) دمای مرکز سیب زمینی در فرآیند خشک کردن برش ۷ میلی متری سیب زمینی در خشک کن فروسرخ- خورشیدی با سامانه فتوولتائیک- حرارتی



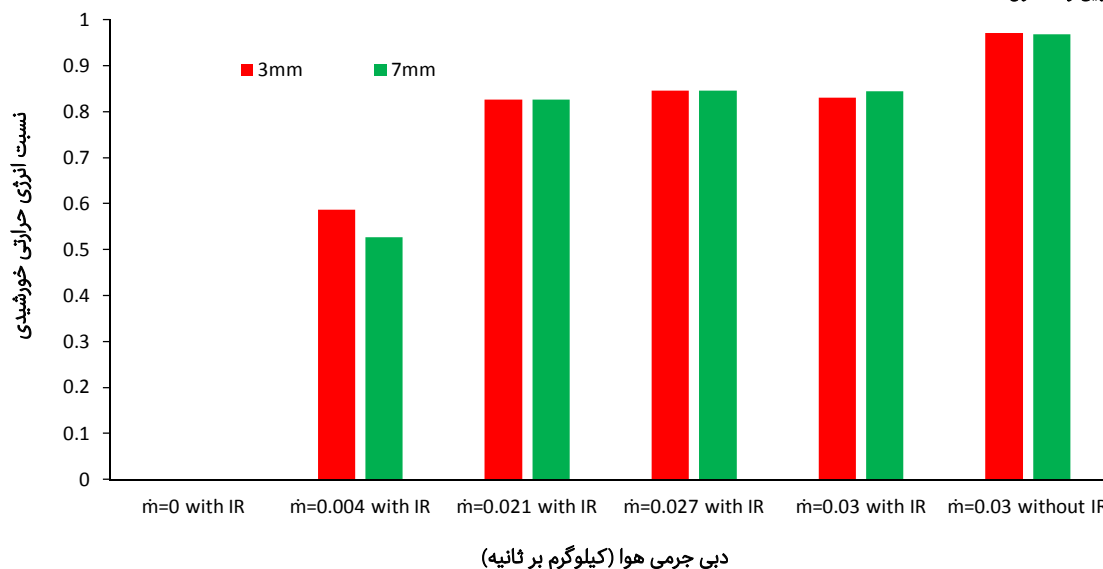
نمودار ۱۰) توان الکتریکی مصرفی کل سامانه در فرآیند خشک کردن برش ۷ میلی متری سیب زمینی در خشک کن فروسرخ- خورشیدی با سامانه فتوولتائیک- حرارتی



نمودار ۱۱) توان مصرفی منبع فروسرخ در فرآیند خشک کردن برش ۳ میلی متری سیب زمینی در خشک کن فروسرخ- خورشیدی با سامانه فتوولتائیک- حرارتی



نمودار ۱۲) کمترین زمان های خشک شدن برش های ۳ میلی متری و ۷ میلی متری سیب زمینی



**نمودار ۱۳)** مقایسه مقادیر سهم انرژی حرارتی خورشیدی در فرآیند خشک کردن برش‌های ۳ و ۷ میلی‌متری سیب‌زمینی در خشک‌کن فروسرخ- خورشیدی با سامانه فتوولتائیک- حرارتی

## نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با ساخت یک نمونه آزمایشگاهی خشک‌کن ترکیبی خورشیدی هوای داغ- فروسرخ، سینتیک خشک‌شدن، سازوکارهای انتقال جرم و مصرف انرژی در فرآیند خشک‌شدن برش‌های سیب‌زمینی با ضخامت‌های ۳ و ۷ میلی‌متر و در دبی‌های جرمی هوای ورودی ۰، ۰/۰۰۴، ۰/۰۲۱، ۰/۰۲۷ و ۰/۰۳ کیلوگرم بر ثانیه بررسی شد. بهترین شرایط خشک‌کردن برش سیب‌زمینی با توجه به زمان خشک‌شدن و انرژی الکتریکی مصرفی در ضخامت ۳ میلی‌متر و دبی ۰/۰۰۴ کیلوگرم بر ثانیه است. نتایج حاصل از این بررسی به شرح زیر است:

۱- با ساخت یک جمع‌کننده فتوولتائیک- حرارتی و استفاده از یک فن در ورودی این جمع‌کننده، دمای پنل‌های فتوولتائیک کاهش یافت و از طرفی بازده الکتریکی پنل‌ها افزایش پیدا کرد و همچنین هوای داغ مورد نیاز جهت خشک‌کردن محصول در فرآیند خشک‌کردن فراهم شد.

۲- پنل‌های فتوولتائیک به‌طور مستقیم به فن و منبع تابشی متصل شدند و توان الکتریکی مورد نیاز فن و منبع تابشی را فراهم کردند.

۳- در ضخامت ۳ و ۷ میلی‌متر کمترین زمان خشک‌شدن مربوط به دبی جرمی ۰/۰۰۴ کیلوگرم بر ثانیه و به‌ترتیب به مدت ۹۵ و ۱۹۰ دقیقه بود.

۴- در فرآیند خشک‌کردن با ترکیب امواج فروسرخ با هوای داغ، زمان و مصرف انرژی الکتریکی نسبت به استفاده از هوای داغ و یا امواج فروسرخ به‌صورت مستقل بسیار کمتر شد.

۵- کل انرژی مصرفی سامانه خشک‌کن پیشنهادی توسط انرژی خورشیدی تامین می‌شود.

۶- می‌توان با استفاده از یک باتری و ذخیره انرژی الکتریکی مازاد در هنگام فرآیند خشک‌کردن، از این سامانه در ساعات عدم وجود خورشید نیز استفاده کرد.

۷- بهتر است که دبی هوای استفاده‌شده در فرآیند خشک‌کردن کم باشد تا موجب گرم‌ترشدن هوای ورودی به محفظه خشک‌کن شود و فرآیند خشک‌کردن محصول در مدت زمان کمتری طی شود.

**تشکر و قدردانی:** مودی توسط نویسندگان ذکر نشد.

**تأییدیه اخلاقی:** تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده و همچنین جهت بررسی یا چاپ برای نشریه دیگری فرستاده نشده است

**تعارض منافع:** بدین وسیله نویسندگان اعلام می‌کنند که این اثر، حاصل یک پژوهش مستقل بوده و هیچ گونه تضاد منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگری ندارد

**سهم نویسندگان:** سعید میرزایی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۴۰٪)؛ مهران عامری (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ امین ضیافروغی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۳۰٪).

**منابع مالی:** منابع مالی این پروژه از منابع موجود در دانشگاه شهید باهنر کرمان تامین شد.

## منابع

- 1- Delgado JMPQ, Gilson Barbosa De Lima A. Drying and energy technologies. 1<sup>st</sup> Edition. London:Springer; 2016.
- 2-Afzal TM, Abe T. Some fundamental attributes of far infrared radiation drying of potato. Drying Technology. 1999;17(1-2):138-155.
- 3- Ziaforoughi A, Esfahani JA. A salient reduction of energy consumption and drying time in a novel PV-solar

Journal of Food Engineering. 2004;65(4):557-563.

9- Supmoon N, Noomhorm A. Influence of combined hot air impingement and infrared drying on drying kinetics and physical properties of potato chips. *Drying Technology*. 2013;31(1):24-31.

10- Dorouzi M, Morteza pour H, Akhavan H-R, Moghaddam AG. Tomato slices drying in a liquid desiccant-assisted solar dryer coupled with a photovoltaic-thermal regeneration system. *Solar Energy*. 2018;162:364-371.

11- Beckman WA, Duffie JA. *Solar engineering of thermal processes*. 4<sup>th</sup> Edition. Hoboken: Wiley Online Library; 2013.

12- Helrich K. *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. 15<sup>th</sup> Edition. Arlington: The Association; 1990.

13- Pan Z, Atungulu GG. *Infrared heating for food and agricultural processing (Contemporary Food Engineering Book 14)*. 1<sup>st</sup> Edition. Florida: CRC Press; 2010.

collector-assisted intermittent infrared dryer. *Solar Energy*. 2016;136:428-436.

4- Horuz E, Bozkurt H, Karataş H, Maskan M. Simultaneous application of microwave energy and hot air to whole drying process of apple slices: Drying kinetics, modeling, temperature profile and energy aspect. *Heat and Mass Transfer*. 2018;54(2):425-436.

5- Eltawil MA, Azam MM, Alghannam AO. Solar PV powered mixed-mode tunnel dryer for drying potato chips. *Renewable Energy*. 2018;116:594-605.

6- Nathakaranakule A, Jaiboon P, Soponronnarit S. Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit. *Journal of Food Engineering*. 2010;100(4):662-668.

7- Tuncel NB, Yilmaz N, Kocabiyik H, Ozturk N, Tunçel M. The effects of infrared and hot air drying on some properties of corn (*Zea mays*). *Journal of Food Agriculture & Environment*. 2010;8(1):63-68.

8- Hebbar HU, Vishwanathan K, Ramesh M. Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables.