

بررسی انرژی و زمان خشک شدن لایه نازک سیب زمینی در یک خشک کن ترکیبی خورشیدی - متناوب فروسرخ مجهز به سامانه تولید برق فتوولتائیک

امین ضیاءفروغی

دانشجو دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

جواد ابوالفضلی اصفهانی*

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

در تحقیق حاضر نمونه آزمایشگاهی یک خشک کن ترکیبی خورشیدی-متناوب فروسرخ مجهز به سامانه تولید برق فتوولتائیک ارائه شده و پارامترهای مؤثر در سیستم های خشک کن بررسی گردیده اند. بدین منظور سینتیک خشک شدن، انرژی الکتریکی مصرفی و تاریخچه دمایی ورقه های سیب زمینی به ضخامت ۳، ۵ و ۷ میلی متر در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس در خشک کن حاضر بررسی گردید. نتایج حاصل با نتایج بدست آمده از آزمایشات مشابه در یک خشک کن خورشیدی جریان طبیعی مقایسه گردید. بررسی ها حاکی از کاهش حداقل ۷۵٪ و حداکثر ۸۳٪ زمان خشک شدن نسبت به خشک کن خورشیدی می باشد. بعلاوه بیشترین و کمترین مقدار آهنگ ویژه از دست دادن رطوبت ورقه سیب زمینی به ترتیب ۰.۵۶ و ۰.۲۳ کیلوگرم بر کیلو وات ساعت انرژی مصرفی خواهد بود. در نهایت با توجه به نتایج بدست آمده، دمای ۵۰ درجه سلسیوس جهت خشک کردن سیب زمینی در خشک کن ترکیبی پیشنهاد می شود. **واژه های کلیدی:** خشک کن، خورشیدی، فروسرخ، متناوب، انرژی.

Energy and Drying Time of a Thin-layer Potato in a Combined Solar-Intermittent Infrared Drier Powered by a Photovoltaic System

A. Ziaforoughi

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

J. Abolfazli Esfahani

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

Abstract

In this study, a combined solar-intermittent infrared drier powered by a photovoltaic system was built and the drier system parameters have been considered. In fact, by combining solar and infrared drying systems, the advantages of the two systems have been used to remove their defects. Therefore, drying kinetics, electrical energy consumption and temperature history of the potato slices with a thickness of 3, 5 and 7 mm at temperatures of 50, 60 and 70 ° C in the drier have been investigated. The results were compared with a similar test results in a natural flow solar drier. Studies show that in comparison to solar drying, at least 75% up to 83% reduction in the drying times was achieved. The highest and lowest specific moisture extracted rate of sliced potatoes will be 0.56 and 0.23 kg/kWh, respectively. Finally, with regard to the specific moisture extracted rate and drying duration, the potato drying at 50 ° C in the present drier is recommended.

Keywords: Solar drier, Infrared, Intermittent, Energy, Drying time.

۱- مقدمه

امروزه بحران انرژی و راه های کاهش مصرف آن به یک چالش جهانی تبدیل شده و تعدادی زیادی از تحقیقات علمی را به خود اختصاص داده است. سیستم های خشک کن سهم زیادی از انرژی مصرفی را به دلیل کاربرد گسترده آنها در صنایع مختلف، به عهده دارند. به طور معمول انرژی خشک کن ها از سوخت های فسیلی و یا انرژی های گران قیمت دیگری مانند انرژی الکتریکی تأمین می گردد. افزایش قیمت، منابع رو به پایان و آلودگی زیست محیطی این سوخت ها، استفاده از انرژی های جایگزین و تجدیدپذیر را امری حیاتی نموده است. در این میان انرژی خورشیدی به دلیل فراوانی، در دسترس بودن، پاک و ارزانی، مورد توجه ویژه ای قرار گرفته است و استفاده از آن در سیستم های خشک کن به یکی از کاربرد های بسیار مهم آن تبدیل شده است، اما به هر حال زمان طولانی خشک شدن محصولات در سیستم های خشک کن خورشیدی از مشکلات پیش روی آنها می باشد که علاوه بر کاهش کیفیت محصول، تمایل صنعت برای استفاده از آنها را کاهش می دهد. به

عنوان مثال، زمان خشک شدن ورقه های سیب زمینی با قطر ۵ سانتی متر و ضخامت ۱۰ میلی متر در یک سامانه خشک کن خورشیدی مختلط^۱ تا رطوبت نهایی ۵۲٪ (بر مبنای جسم مرطوب) ۵ ساعت و ۳۰ دقیقه تخمین زده شده است [۱]. در تحقیق دیگری زمان خشک شدن ورقه های سیب زمینی با قطر ۵/۸ سانتی متر و ضخامت ۲/۸ میلی متر در یک سامانه خشک کن خورشیدی مستقیم^۲ تا رطوبت نهایی ۱۰٪ (بر مبنای جسم مرطوب) ۱۱ ساعت اندازه گیری شده است [۲]. جهت رفع این مشکل، سامانه های خشک کن ترکیبی خورشیدی پیشنهاد شده اند که در آنها سامانه خشک کن خورشیدی با یکی دیگر از روش های رایج خشک کردن ترکیب می شود.

از جمله روش های خشک کردن که در سال های اخیر مورد توجه ویژه ای قرار گرفته، خشک کردن با امواج فروسرخ^۳ می باشد [۳] که

^۱ mixed-mode solar dryer

^۲ direct solar dryer

^۳ Infrared Drying

تاکنون در سیستم های خشک کن ترکیبی خورشیدی با توجه به پیشینه تحقیق به کار گرفته نشده است. خشک کن های فروسرخ به عنوان روشی برای افزایش بازده انرژی، کیفیت محصول و کاهش زمان خشک شدن مورد توجه و بررسی قرار گرفته اند [۴ و ۵]. امواج فروسرخ، امواج الکترومغناطیسی با طول موج ۷۵۰ نانو متر تا ۱ میلی متر هستند که به منظور جلوگیری از سوختن و سخت شدن لایه سطحی محصولات و همچنین کاهش زمان خشک شدن، اغلب در ترکیب با جریان هوای گرم بکار گرفته می شوند. در پژوهشی تأثیر استفاده توأم از جت هوای داغ و امواج فروسرخ بر سینتیک خشک شدن و ویژگی های فیزیکی ورقه های سیب زمینی بررسی شده است [۶]. نتایج این تحقیق نشان می دهد که ترکیب جت هوای گرم و امواج فروسرخ، آهنگ خشک شدن بالاتری نسبت به روش خشک کردن با هوای گرم داشته و از نظر کیفی نیز مقدار سختی و زوال رنگ کمتری ایجاد می کند. ترکیب خشک کردن به وسیله جابه جایی هوای داغ و امواج فروسرخ برای سیب زمینی نشان داده است که زمان فرآیند و مصرف انرژی در روش ترکیبی در مقایسه با هوای داغ، به ترتیب ۴۸٪ و ۶۳٪ کاهش می یابد [۷]. هم چنین کیفیت محصول از نظر رنگ و سختی سطح، در روش ترکیبی بالاتر از روش خشک کردن با استفاده از امواج فروسرخ می باشد. بررسی متولی و همکاران [۸] نشان می دهد که استفاده از یک جریان هوای گرم با دمای حدود ۴۰ درجه سلسیوس و سرعت ۵/۰ m/s به عنوان سازوکار کمکی در خشک کردن با امواج فروسرخ کمترین مصرف انرژی را نسبت به دیگر حالت های ترکیبی داشته و بعلاوه زمان خشک کردن را نیز کوتاه تر خواهد کرد. در واقع استفاده از جریان هوای گرم به عنوان سازوکار کمکی می تواند علاوه بر کمک کردن به کاهش زمان خشک شدن، کیفیت محصول را نیز بهبود بخشد. به هر حال استفاده همزمان از امواج فروسرخ و هوای گرم، جهت خشک کردن مواد مرطوب، نیازمند مصرف انرژی بیشتری خواهد بود، اما چنانچه بتوان با استفاده از سازوکاری جریان هوای گرم را بدون صرف هزینه اضافی تأمین کرد علاوه بر بهینه سازی مصرف انرژی، زمان خشک کردن نیز کاهش پیدا خواهد کرد.

استفاده از انرژی خورشیدی در جمع کننده^۱ به عنوان تأمین کننده جریان هوای گرم می تواند بدون صرف هزینه جاری، در ترکیب با سایر روش های خشک کردن به خشک کردن مواد مرطوب کمک کند. بنابراین از آنجا که اغلب خشک کن های ترکیبی هوای گرم-فروسرخ، از فن برای ایجاد جریان هوا و از گرم کن مجزا برای گرم کردن هوا استفاده می کنند استفاده همزمان از انرژی خورشیدی و امواج فروسرخ می تواند سبب افزایش بازده و کاهش مصرف انرژی این نوع خشک کن ها شده و به علاوه می تواند به عنوان ایده ای نو در خشک کن های خورشیدی جهت کاهش زمان خشک شدن مواد مرطوب باشد.

به منظور کاهش بیشتر مصرف انرژی خشک کن های ترکیبی هوای گرم-فروسرخ می توان از الگوی متناوب^۲ روشن و خاموش شدن لامپ های فروسرخ استفاده کرد. استفاده از این روش به عنوان راه حل مناسبی جهت بهبود سینتیک خشک کردن، افزایش کیفیت محصول و کاهش انرژی مصرفی به ازای واحد جرم رطوبت ماده، پیشنهاد شده است [۹].

هر چند خشک شدن سیب زمینی با استفاده از انرژی خورشید در پژوهش های پیشین مورد بررسی قرار گرفته، اما این مطالعه، ترکیب خشک کن خورشیدی با امواج متناوب فروسرخ در مقایسه با خشک کن خورشیدی مورد بررسی قرار می دهد که در پیشینه تحقیق، گزارش قابل ذکری در خصوص آن موجود نمی باشد. در واقع هدف از تحقیق حاضر بررسی سینتیک رطوبت و دمای خشک شدن ورقه سیب زمینی در سه ضخامت ۳، ۵ و ۷ میلی متر و در سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و ارزیابی میزان مصرف انرژی و زمان فرایند خشک شدن در یک خشک کن ترکیبی خورشیدی-متناوب فروسرخ در مقایسه با یک خشک کن خورشیدی می باشد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مشخصات خشک کن

به منظور بررسی اثر انرژی خورشیدی و تابش فروسرخ بر خشکیدن سیب زمینی از یک خشک کن ترکیبی خورشیدی غیرمستقیم^۳-متناوب فروسرخ با صفحه جاذب پره دار سوراخ دار تخت استفاده گردید. این خشک کن شامل: جمع کننده خورشیدی، محفظه محصول، دودکش، سامانه کنترل دمای محصول، منبع فروسرخ، سامانه کنترل توان منبع فروسرخ و پنل فتوولتائیک می باشد. شکل ۱ و ۲ به ترتیب تصویر و طرحواره این خشک کن را نشان می دهند.

جمع کننده یک کانال چوبی عایق شده با پشم شیشه است که داخل آن صفحه ای جاذب آلومینیومی با مساحت ۱/۱ مترمربع که روی آن تعداد ۳۰۰ سوراخ با قطر ۱۲ میلی متر ایجاد شده، نصب شده است. سطح فوقانی جمع کننده پوششی از شیشه دارد. تابش خورشید صفحه جاذب را گرم کرده و جریان هوای عبوری از جمع کننده در اثر تماس با این صفحه گرم می شود. محفظه محصول به ابعاد ۶۰×۷۰×۸۰ سانتی متر از جنس چوب و با پوشش پشم شیشه ساخته شده و قسمتی از آن که سینی محصول در آن قرار دارد با فویل آلومینیومی از تابش مستقیم خورشید محافظت شده است.

به منظور تقویت جریان هوای خشک کننده، در قسمت بالای محفظه محصول، دودکش مشکی رنگی به قطر ۱۰ سانتی متر و ارتفاع ۱/۵ متر تعبیه گردید. به منظور اطمینان از عبور هوای خشک کننده از میان سینی محصول، اطراف درب محفظه با استفاده از نوارهای مخصوص به طور کامل درز بندی شد. در فاصله ۵ سانتی متری از بالای سینی محصول، یک لامپ فروسرخ (کوآرتز^۴ حلقوی، ۱-یت^۵، بیژینگ^۶، چین) که توان تابشی آن بر روی ۵/۱۷۵± وات تنظیم شده بود، نصب گردید.

³ Indirect

⁴ Quartz

⁵ Lighting Electrical Co. O-Yate

⁶ Beijing

¹ Collector

² Intermittent

توسط ثبت کننده دما^۵ (176T4)، تستو^۶، لenzkirch^۷، آلمان) بر روی کامپیوتر ذخیره شده است. بدین ترتیب زمانی که دمای ورقه سیب زمینی به سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس برسد لامپ فروسرخ توسط کنترلر دما، خاموش و زمانی که دما به کمتر از دمای معین شده رسید مجددا روشن خواهد شد. انرژی مورد نیاز منبع فروسرخ با استفاده از یک سیستم فتوولتائیک شامل پنل فتوولتائیک (STP185S-24/Ad، سان تک^۸، وکسی جیانسو^۹، چین) و باتری تأمین گردید.

۲-۲- آماده سازی نمونه

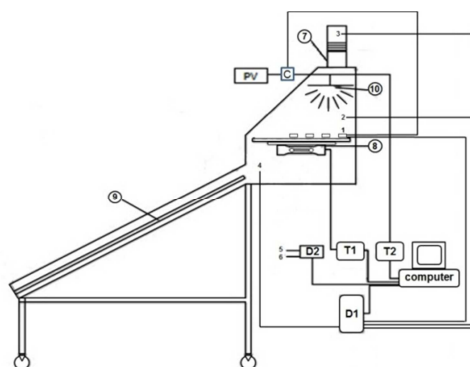
سیب زمینی های تازه، پس از خریداری از بازاری در کرمان و قبل از فرایند خشک شدن در دمای 1 ± 4 درجه سلسیوس در یخچال نگهداری شدند. حدود یک ساعت قبل از هر آزمایش، نمونه ها در دمای محیط قرار داده شده تا با محیط همدم شوند. سپس نمونه ها بوسیله یک اسلایسر برقی (GE300، سلمی^{۱۰}، میلان^{۱۱}، ایتالیا) جهت هر آزمایش در ضخامت های ۳، ۵ و ۷ میلیمتر زده شده و به وسیله یک ابزار تیز دایره ای به صورت دایره هایی با قطر ۲/۴ سانتیمتر ایجاد شدند. رطوبت اولیه نمونه ها با استفاده از یک اون هوای گرم در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس و به مدت ۴۸ ساعت، مطابق با استاندارد AOAC روش 931.04 تعیین شد^[۱۰].

۲-۳- روش انجام آزمایش

مقدار ۱۰۰ گرم از نمونه ها در هر آزمایش بر روی سینی پخش شده و فرض شده که تابش فروسرخ بر روی سطح نمونه ها بطور یکنواخت توزیع شده است. وزن نمونه ها طی فرایند خشک شدن به کمک دو حسگر لودسل^{۱۲} (L6D، زمیک^{۱۳}، اتن-لور^{۱۴}، هلند) با ظرفیت ۳ و دقت ۰/۰۰۲ کیلوگرم، تعیین گردید. این دو حسگر در محل تکیه گاه سینی محصول نصب شدند (شکل ۱). حسگرها به صورت موازی به یک ترانسمیتر (TM-1020، تیکا، تهران، ایران) متصل و خروجی ترانسمیتر از طریق درگاه سریال به رایانه وصل شد (شکل T1). نرم افزار مربوط به ترانسمیتر، امکان مشاهده لحظه ای وزن محصول را فراهم نمود. قبل از هر آزمایش، خشک کن خورشیدی به مدت یک ساعت در معرض تابش خورشید قرار داده شد تا دمای محفظه خشک کن افزایش پیدا کند. دما و رطوبت محیط، دمای خروجی از جمع کننده خورشیدی، دمای محفظه خشک کن و دمای خروجی از دودکش به ترتیب توسط ثبت کننده دما و رطوبت (TW-USB-2-LCD+، ترمو ورکس^{۱۵}، یوتا^{۱۶}، آمریکا) با دقت ۰/۳ درجه سلسیوس و سه عدد حسگر دما^{۱۷} نوع K (KFT2،



شکل ۱- تصویر خشک کن و پنل فتوولتائیک استفاده شده در تحقیق حاضر



شکل ۲- طرحواره خشک کن شامل: حسگرهای دما (۱ تا ۴)، حسگرهای دما و رطوبت (۵ و ۶)، دودکش (۷)، لودسل (۸)، صفحه جاذب آلومینیومی (۹)، منبع فروسرخ (۱۰) پنل فتوولتائیک (PV)، ثبت کننده دما (D1)، ثبت کننده دما و رطوبت (D2)، کنترلر دما (C)، ترانسمیتر لودسل (T1)، ترانسمیتر وات متر (T2)

دمای مرکز ورقه سیب زمینی مینای کنترلر لامپ مادن قرمز می باشد. بدین منظور از یک کنترلر دما (A4C -TZN4M، آتونیکس^۱، کره جنوبی، بوسان^۲، با ورودی فرمان دمای مرکز ورقه سیب زمینی و خروجی فرمان قطع و وصل جریان لامپ استفاده شد. دمای مرکز ورقه سیب زمینی با استفاده از دو عدد ترموکوپل نوع T (MT-29/1، فیزی تمپ^۳، نیوجرسی^۴، آمریکا) با اندازه نوک ۰/۳۳ میلیمتر و دقت ۰/۱ درجه سلسیوس اندازه گیری و به عنوان ورودی کنترلر استفاده شده و

⁵ Temperature Data-Logger

⁶ Testo

⁷ Lenzkirch

⁸ Suntech

⁹ Wuxi Jiangsu

¹⁰ Celme

¹¹ Milan

¹² Load cell

¹³ ZEMIC

¹⁴ Etten-Leur

¹⁵ Thermoworks

¹⁶ Utah

¹⁷ Thermocouple

¹ Autonics

² Busan

³ PHYSITEMP

⁴ New Jersey

کین^۱، ولوین گاردن^۲، انگلیس) با دقت ۰/۵ درجه سلسیوس اندازه گیری و توسط ثبت کننده دما بر روی کامپیوتر ذخیره شد. برای اندازه گیری مجموع توان مصرفی منبع فروسرخ از یک وات متر (TM-1510، تیکا، تهران، ایران) استفاده شد که از طریق درگاه RS232 به رایانه وصل گردید (در شکل ۱). نرم افزار مربوط به وات متر، امکان مشاهده لحظه ای توان مصرفی منبع فروسرخ را فراهم نمود. اندازه گیری شدت تابش خورشید با یک تابش سنج خورشیدی (1333R، تس^۳، بیژینگ، چین) انجام شد. این تابش سنج در کنار صفحه جمع کننده، به گونه ای که تابش عمود بر سطح این صفحه را اندازه گیری نماید، قرار داده شد. سرعت هوای عبوری از مرکز دودکش خشک کن با یک سرعت سنج پره ای (BE816A، بستون^۴، گوانگ دانگ^۵، چین) اندازه گیری گردید. فرایند خشک شدن نمونه ها تا رطوبت نهایی ۱۰٪ (بر مبنای جسم مرطوب) و با دو بار تکرار و در دو بخش اصلی، آزمایشهای مربوط به ارزیابی عملکرد خشک کن ترکیبی خورشیدی- متناوب فروسرخ و آزمایشهای مربوط به عملکرد خشک کن خورشیدی انجام شد. به منظور مقایسه بهتر خشک کن ترکیبی خورشیدی غیرمستقیم- متناوب فروسرخ با خشک کن خورشیدی تمامی آزمایشات در یک خشک کن خورشیدی و با حضور منبع فروسرخ و در غیاب آن انجام شد. در آزمایشهای مربوط به خشک کن خورشیدی نمونه ها پس از اتمام زمان آزمایش در پاکت های زیپ دار پلاستیکی قرار داده شده و ادامه تست در روز بعد انجام شد. آزمایشها در دانشگاه شهید باهنر کرمان و در ماههای مرداد و شهریور ۹۴، از ساعت ۱۰/۳۰ صبح تا ۴/۳۰ بعدازظهر انجام پذیرفت.

۲-۴- پارامترهای مورد ارزیابی

پارامترهای مورد ارزیابی در این تحقیق علاوه بر سینتیک خشک شدن، شامل مدت زمان خشک شدن، انرژی الکتریکی مصرفی، سهم انرژی خورشیدی جهت خشک کردن و آهنگ ویژه از دست دادن رطوبت^۶ می باشند که در ادامه نحوه محاسبه هریک آورده شده است. جهت ارزیابی منحنی سینتیک خشک شدن پارامتر نسبت رطوبت تعریف می شود که بصورت زیر بیان می شود:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

که در آن M_t ، M_0 و M_e به ترتیب محتوای رطوبت نمونه ها در هر لحظه، محتوای رطوبت اولیه و محتوای رطوبت تعادلی می باشند که به دلیل کوچک بودن محتوای رطوبت تعادلی نسبت به M_0 و M_t معمولاً از آن در محاسبات صرف نظر می شود [۱۱]. با این توصیف معادله (۱) به صورت زیر خلاصه می گردد:

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

سهم انرژی خورشیدی (SF)، بیانگر سهمی از کل انرژی مصرفی است که توسط انرژی خورشیدی تأمین می شود. به عبارت دیگر، سهم انرژی خورشیدی به نحوی نشان دهنده مقدار صرفه جویی در مصرف سوخت-

های فسیلی می باشد. از رابطه (۳) برای محاسبه سهم انرژی خورشیدی استفاده شد [۱۲].

$$SF = \frac{E_s}{E_T} \quad (3)$$

که در آن، E_s مجموع انرژی گرمایی جمع کننده و انرژی الکتریکی تأمین شده توسط سیستم فتوولتائیک می باشد و E_T کل انرژی مصرفی در فرایند خشک شدن می باشد و شامل مجموع انرژی گرمایی تولید شده در جمع کننده (E_s) و انرژی الکتریکی مصرف شده به وسیله منبع فروسرخ بر حسب کیلو وات ساعت می باشد و از انرژی ناشی از تابش مستقیم خورشید به محفظه محصول صرف نظر شده است. جهت تعیین نسبت انرژی گرمایی که توسط خورشید تأمین می شود پارامتر انرژی گرمایی خورشیدی (SHF) تعریف می شود که بیانگر سهمی از کل انرژی مصرفی است که توسط گرمایش خورشیدی تأمین می شود و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$SHF = \frac{E_s}{E_T} \quad (4)$$

که در آن، E_s انرژی گرمایی جمع کننده و E_T کل انرژی مصرفی در فرایند خشک شدن می باشد و شامل مجموع انرژی گرمایی تولید شده در جمع کننده (E_s) و انرژی الکتریکی مصرف شده به وسیله منبع فروسرخ بر حسب کیلو وات ساعت می باشد. علاوه از انرژی ناشی از تابش مستقیم خورشید به محفظه محصول صرف نظر شده است. یکی از مهمترین پارامترهای عملکردی در هر سامانه خورشیدی گرمائی، مقدار انرژی گرمایی تولید شده در جمع کننده آن در مدت زمان انجام فرایند است که از رابطه (۵) محاسبه می شود.

$$E_s = \int_L \dot{Q} dt \quad (5)$$

که در آن، dt بازه زمانی اندازه گیری توان (ثانیه)، L مدت زمان انجام آزمایش (ثانیه) و $\dot{Q}$ توان گرمایی تولید شده در جمع کننده است که از رابطه (۶) بدست می آید.

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (6)$$

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

به منظور محاسبه انرژی الکتریکی مورد نیاز برای خشک کردن هر کیلوگرم سیب زمینی در خشک کن ترکیبی حاضر، مصرف انرژی الکتریکی مخصوص ($SEEC$) که نسبت انرژی الکتریکی مصرف شده به جرم رطوبت از دست رفته (کیلو وات ساعت بر کیلوگرم) می باشد با استفاده از رابطه (۷) محاسبه شده است [۱۳].

$$SEEC = \frac{E_E}{m_{wd}} \quad (7)$$

در این رابطه m_{wd} جرم رطوبت از دست رفته در طول فرایند خشک شدن (کیلوگرم) و E_E انرژی الکتریکی مصرف شده می باشد که با استفاده از ترانس میتر وات متر بکار گرفته شده در سامانه اندازه گیری خشک کن محاسبه شده است.

۳- نتایج و بحث

تغییرات میانگین شدت تابش و دمای محیط در طول روزهای آزمایش (در محدوده زمانی ۲۵ مرداد تا ۳۱ شهریور ۹۴ در محل انجام آزمایش) در شکل ۳ نمایش داده شده است.

¹ Kane-May Ltd.

² Welwyn Garden City

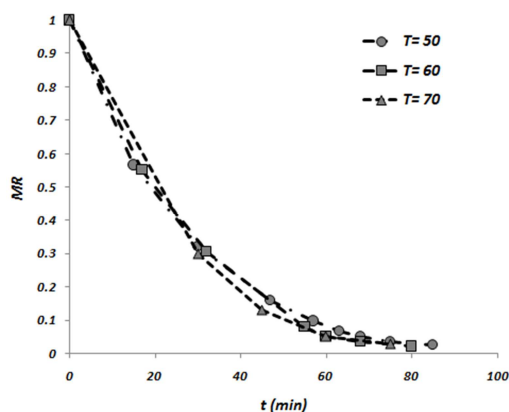
³ TES

⁴ Bestone

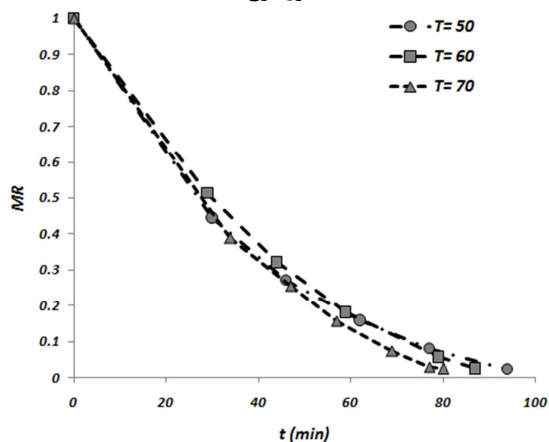
⁵ Guangdong

⁶ Specific Moisture Extracted Rate

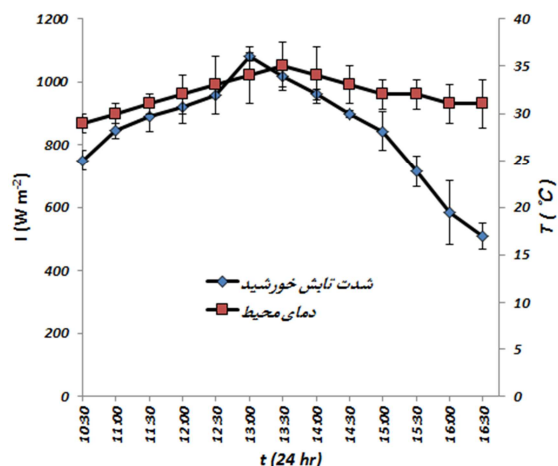
ترکیبی به مراتب بیشتر از سیستم خورشیدی می‌باشد که به علت استفاده همزمان از دو سازوکار انتقال گرمای تابشی و جابجایی طبیعی نسبت به تنها سازوکار انتقال حرارت جابجایی طبیعی خشک‌کن خورشیدی می‌باشد. این موضوع در منحنی‌های دمای مرکز ورقه سیب زمینی بهتر نشان داده شده است. شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ منحنی تاریخیچه زمانی دمای مرکز ورقه سیب زمینی به ازاء سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و سه ضخامت ۳، ۵ و ۷ میلیمتر برای خشک‌کن ترکیبی خورشیدی - متناوب فروسرخ را نشان می‌دهند.



شکل ۴- منحنی نسبت رطوبت ورقه ۳ میلیمتری سیب زمینی به ازاء سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ برای خشک‌کن ترکیبی خورشیدی - متناوب فروسرخ



شکل ۵- منحنی نسبت رطوبت ورقه ۵ میلیمتری سیب زمینی به ازاء سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ برای خشک‌کن ترکیبی خورشیدی - متناوب فروسرخ



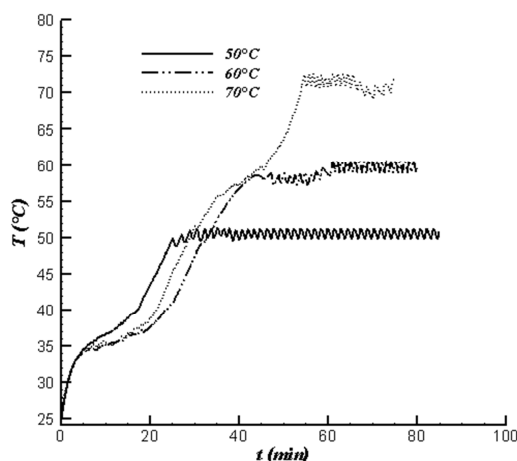
شکل ۳- تغییرات میانگین دمای محیط و شدت تابش در طول روزهای انجام آزمایش در کرمان

همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشترین میانگین دما ۳۵ درجه سلسیوس است که در ساعت ۱۳:۳۰ ثبت شده و بیشترین میانگین تابش برابر ۱۰۸۰ وات بر متر مربع بوده که در ساعت ۱۳:۰۰ ظهر رخ داده است. در مجموع میانگین دما ۳۲ درجه سلسیوس و میانگین شدت تابش در این مدت ۸۴۴ وات بر مترمربع اندازه‌گیری شد. سرعت جریان هوای ایجاد شده در لوله دودکش خشک‌کن ترکیبی با توجه به میزان تابش خورشید و شرایط جوی بین ۱/۵ تا ۲ متر بر ثانیه متغیر بود. تحت این شرایط رطوبت ورقه‌های سیب زمینی از مقدار اولیه 0.24 ± 0.01 (بر مبنای جسم مرطوب) به رطوبت نهایی ۱۰٪ کاهش داده شد.

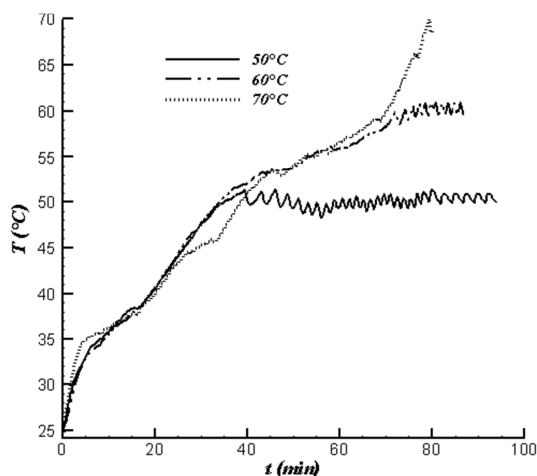
۳-۱- بررسی سینتیک رطوبت و دمای خشک شدن

یکی از پارامترهای مهمی که در سیستم‌های خشک‌کن بررسی می‌گردد منحنی از دست دادن رطوبت یا سینتیک خشک شدن ماده مرطوب می‌باشد. به همین منظور و در جهت مقایسه و تحلیل بهتر سازوکارهای انتقال گرما و رطوبت دو خشک‌کن مورد نظر، منحنی‌های رطوبت و دمای خشک شدن ورقه‌های سیب زمینی در سه دما و ضخامت ارائه شده‌اند. شکل‌های ۴، ۵ و ۶ منحنی نسبت رطوبت ورقه سیب زمینی به ازاء سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و سه ضخامت ۳، ۵ و ۷ میلیمتر برای خشک‌کن ترکیبی خورشیدی - متناوب فروسرخ و شکل ۷ منحنی نسبت رطوبت ورقه سیب زمینی به ازاء سه ضخامت ۳، ۵ و ۷ میلیمتر را برای خشک‌کن خورشیدی نشان می‌دهد. در خصوص دماهای اشاره شده ذکر این نکته قابل توجه است که در اکثر خشک‌کن‌ها معیار سنجش دمای خشک شدن دمای محفظه خشک‌کن است اما در کار حاضر مبنای کنترل دمای خشک شدن، دمای نمونه سیب زمینی می‌باشد که در واقع دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس دماهای تنظیم شده‌ای هستند که به ازای آنها منبع فروسرخ روشن و خاموش می‌شود. استفاده از این روش کنترل انرژی مصرفی را به شکل بهینه تری انجام می‌دهد. به هر حال مقایسه نمودارها کاهش چشمگیر زمان خشک شدن ورقه سیب زمینی در خشک‌کن ترکیبی نسبت به خورشیدی را نشان می‌دهد. بعلاوه بررسی منحنی‌ها نشان می‌دهد که نرخ خشک شدن و در نتیجه سرعت خشک شدن در سیستم

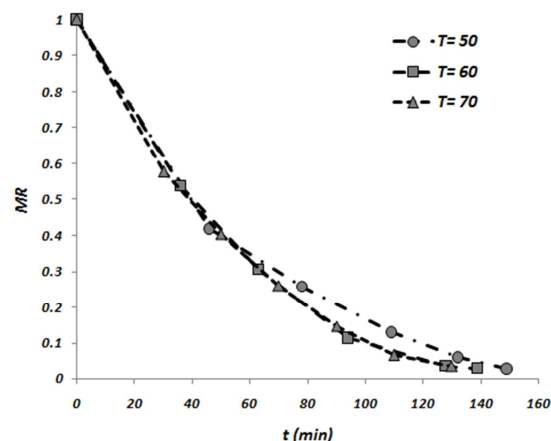
با افزایش دمای خشک شدن در سیستم ترکیبی زمان خشک شدن کاهش می یابد اما به دلیل استفاده از سیستم متناوب فروسرخ تفاوت محسوسی در منحنی های رطوبت سه دما در مقایسه با یکدیگر وجود ندارد. این موضوع به خصوص در دمای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس که قسمت عمده رطوبت ماده تا زمان های نهایی تبخیر شده است بیشتر به چشم می خورد و اختلاف منحنی ها در این دو دما به طور عمده در زمان های نهایی خشک شدن می باشد.



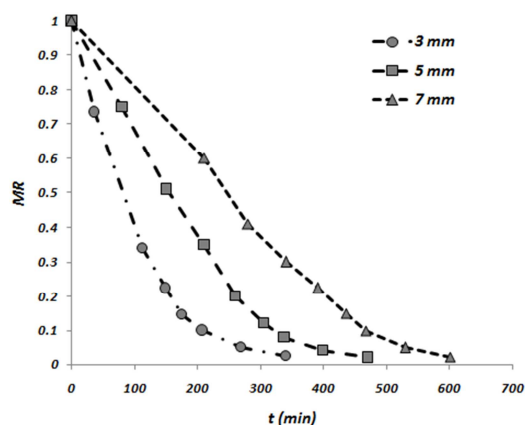
شکل ۸- منحنی تاریخچه دمایی مرکز ورقه ۳ میلیمتری سیب زمینی به ازاء سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ برای خشک کن ترکیبی خورشیدی - متناوب فروسرخ



شکل ۹- منحنی تاریخچه دمایی مرکز ورقه ۵ میلیمتری سیب زمینی به ازاء سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ برای خشک کن ترکیبی خورشیدی - متناوب فروسرخ

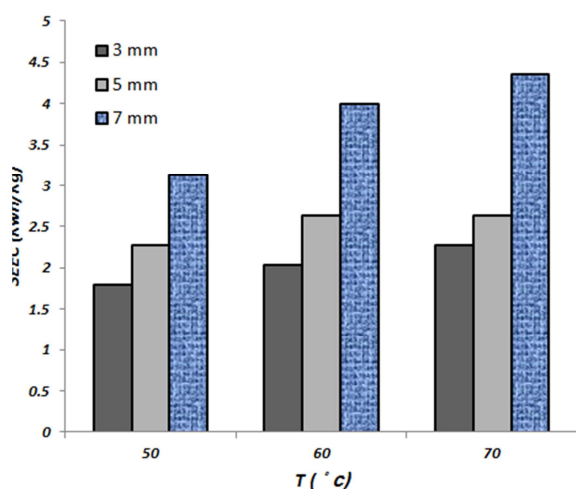


شکل ۶- منحنی نسبت رطوبت ورقه ۷ میلیمتری سیب زمینی به ازاء سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ برای خشک کن ترکیبی خورشیدی - متناوب فروسرخ



شکل ۷- منحنی نسبت رطوبت ورقه های ۳، ۵ و ۷ میلیمتری سیب زمینی برای خشک کن خورشیدی جریان طبیعی

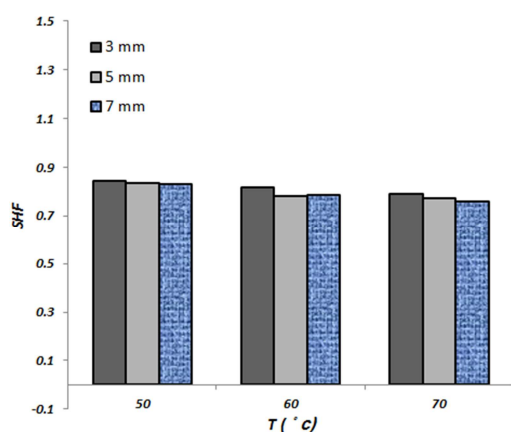
ورقه های سیب زمینی در خشک کن ترکیبی در زمان کوتاهی ابتدا در مرحله گرمایش اولیه تا دمای معینی گرم می شوند و سپس در مرحله دوم، فرایند افزایش دما همراه با تبخیر تا دماهای تنظیم شده ۵۰، ۶۰ و ۷۰ ادامه پیدا می کند و در نهایت با نوسان حول دماهای مذکور، فرایند خشک شدن تا رطوبت نهایی ۱۰٪ ادامه پیدا می کند، این در حالیکه در خشک کن خورشیدی دمای ماده قابل کنترل نبوده و تابع دمای جریان هوای اطراف خود است. بعلاوه آهنگ انتقال گرمای جابجایی طبیعی از طریق جریان هوای اطراف به ماده نسبت به انتقال گرمای ترکیبی تابشی و جابجایی طبیعی بسیار کمتر است و علت اصلی طولانی شدن زمان خشک شدن در خشک کن خورشیدی نیز همین پدیده می باشد. پدیده غیر قابل کنترل بودن دمای خشک شدن، یکی از مشکلات عمده سیستم های خشک کن خورشیدی جابجایی طبیعی می باشد که می توان توسط سیستم های ترکیبی این مشکل را مرتفع کرد. در سیستم ترکیبی حاضر با استفاده از کنترلر دما شار گرمای ورودی به نمونه به گونه ای کنترل می شود که نمونه در یک دمای مشخص تا انتهای مرحله خشک شدن باقی بماند اما در سیستم های خورشیدی جابجایی طبیعی، امکان کنترل شدت تابش خورشید و شار ورودی به سادگی امکان پذیر نمی باشد.



شکل ۱۳- مقایسه مصرف انرژی الکتریکی مخصوص ورقه های ۳، ۵ و ۷ میلیمتری سبب زمینی در خشک کن ترکیبی در سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس

یکی از مزایای بزرگ سیستم حاضر تامین کل انرژی مصرفی در فرایند خشک شدن می باشد که از طریق جمع کننده خورشیدی جریان هوای گرم تامین شده و از طریق سیستم فتوولتائیک انرژی الکتریکی لامپ فروسرخ تامین شده است و بنابراین فاکتور سهم انرژی خورشیدی (SF) سیستم حاضر با صرف نظر از تابش مستقیم خورشید به داخل محفظه خشک کن ۱ می باشد.

شکل ۱۴، سهم انرژی گرمایی خورشید را در فرایند خشک شدن در خشک کن ترکیبی به ازای سه ضخامت ۳، ۵ و ۷ میلیمتر نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود سهم عمده انرژی توسط گرمایش خورشید تامین می شود و اگر چه با افزایش دما و ضخامت این سهم کاهش می یابد ولی تفاوت محسوسی مشاهده نمی شود.



شکل ۱۴- سهم انرژی حرارتی خورشید در فرایند خشک شدن در خشک کن ترکیبی به ازای سه ضخامت ۳، ۵ و ۷ میلیمتر و سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر با ارائه نتایج خشک شدن ورقه سبب زمینی در سه ضخامت ۳، ۵ و ۷ میلیمتر و در سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس در یک خشک کن ترکیبی خورشیدی- متناوب فروسرخ، پارامترهای موثر

زمان خشک شدن با افزایش دما به دلیل افزایش نرخ خشک شدن کاهش پیدا می کند این پدیده در خشک کردن سایر محصولات نیز مشاهده شده است [۱۶و۱۵] اما در خشک کن ترکیبی این کاهش زمان محسوس نبوده و با توجه به اینکه مصرف انرژی در دماهای پایین تر کمتر می باشد لذا پیشنهاد می شود که فرایند خشک شدن در خشک کن ترکیبی حاضر در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد انجام گیرد.

نتایج تحقیقات گذشته نشان می دهد که خشک کردن مواد با استفاده از انرژی خورشیدی مدت زمان زیادی را نیاز دارد [۲۱]، در حالیکه مدت زمان خشک شدن ورقه سبب زمینی در خشک کن حاضر حداکثر بین ۷۵ تا ۱۵۰ دقیقه برای ضخامت های ۳ تا ۷ میلیمتر می باشد که مزیت بزرگ سیستم حاضر می باشد.

عوامل متعددی در خشک کن ترکیبی سبب مصرف انرژی و زمان خشک شدن می باشند که عبارتند از: ۱- در خشک کن ترکیبی وجود یک جریان هوای طبیعی سبب کاهش رطوبت نسبی هوا روی سطح ماده شده و در نتیجه فشار جزئی بخار آب هوای خشک کننده کاهش مییابد. کاهش فشار جزئی بخار آب هوای خشک کننده، سبب افزایش سرعت انتقال رطوبت از محصول به هوا و خشک شدن محصول میگردد، که این مطابق با نتایج به دست آمده در سایر پژوهشها میباشد [۱۷]، ۲- استفاده از دو سازوکار انتقال حرارت تشعشعی و جابجایی طبیعی جهت افزایش دمای ماده در مرحله گرمایش اولیه و مرحله نهایی خشک شدن، ۳- گرم نگه داشتن محیط اطراف ماده با استفاده از تابش خورشید که سبب کاهش مصرف انرژی الکتریکی در مرحله نهایی خشک شدن می شود.

۳-۲- مقایسه مصرف انرژی الکتریکی مخصوص و سهم انرژی خورشیدی

به منظور تعیین مقدار انرژی الکتریکی مصرفی خشک شدن ورقه سبب زمینی در یک خشک کن ترکیبی با مقیاس بزرگتر و یا کوچکتر، مقادیر مصرف انرژی الکتریکی مخصوص (SEEC) در شکل ۱۳ به ازای سه ضخامت ۳، ۵ و ۷ میلیمتر در سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ با یکدیگر مقایسه شده اند. بیشترین و کمترین مقدار مصرف انرژی الکتریکی جهت خشک کردن ورقه سبب زمینی به ترتیب ۴/۳۵ و ۱/۷۹ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم و متعلق به ضخامت ۷ میلیمتر در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد و ۳ میلیمتر در دمای ۵۰ درجه سلسیوس می باشد. شکل ۱۳ نشان می دهد که با افزایش ضخامت و دمای خشک شدن، مصرف انرژی الکتریکی مخصوص افزایش می یابد. بنابراین به نظر می رسد بهترین شرایط خشک کردن سبب زمینی در خشک کن حاضر با توجه به مقادیر مصرف انرژی الکتریکی مخصوص، ضخامت ۳ میلیمتر و دمای ۵۰ درجه سلسیوس می باشد.

- [2] Tefera A., Endalew W., Fikiru B., Evaluation and demonstration of direct solar potato dryer, *Livest Res Rural Dev*, Vol. 25, 2013.
- [3] Pan Z., Atungulu G. G., *Infrared Heating for Food and Agricultural Processing*, pp. 89-100: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011.
- [4] Wang J., Sheng K., Far-infrared and microwave drying of peach, *LWT - Food Science and Technology*, Vol. 39, No. 3, pp. 247-255, 2006.
- [5] Shi J., Pan Z., McHugh T.H., Wood D., Hirschberg E., Olson D., Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating, *LWT-Food Science and Technology*, Vol. 41, pp. 1962-1972, 2008.
- [6] Supmoon N., Noomhorm A., Influence of combined hot air impingement of combined infrared and hot air dryer for physical properties of potato chips. , , *Drying Technology*, Vol. 31, pp. 24-31, 2013.
- [7] Hebbar H.U., Vishwanathan K.H., Ramesh M.N., Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables, *Journal of Food Engineering*, Vol. 65, pp. 557-563, 2004.
- [8] Motevali A., Minaei S., Khoshtaghaza M.H., Amirnejat H., Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices, *Energy Conversion and Management*, Vol. 36, pp. 6433-6441, 2011.
- [9] Kumar CKarim., M. A., Joardder M.U.H., Intermittent drying of food products: A critical review, *Journal of Food Engineering*, Vol. 121, pp. 48-57, 2014.
- [10] AOAC, Official methods of analysis, Association of Official Analytical Chemists Washington, 1990.
- [11] Balbay A., Şahin Ö., Microwave Drying Kinetics of a Thin-Layer Liquorice Root, *Drying Technology*, Vol. 30, No. 8, pp. 859-864, 2012/06/15, 2012.
- [12] Duffie J.A., Beckman W.A., *Solar engineering of thermal processes*: John Wiley & Sons, 2013.
- [13] Delgado J.M.P.Q., Gilson Barbosa de Lima A. *Drying and Energy Technologies*. Switzerland: Springer International; 2016.
- [14] Sadin R., Chegini G.-R., Sadin H., The effect of temperature and slice thickness on drying kinetics tomato in the infrared dryer, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 4, pp. 501-507, 2014/04/01, 2014. English
- [15] Chen D., Li M., Zhu X., Drying Characteristics of Powdered Wheat Straw and Its Mathematical Modeling, *Journal of Agricultural Science and Technology*, Vol. 15, pp. 869-877, 2013.
- [16] Niamnuy C., Nachaisin M., Poomsa-ad N., Devahastin S., Kinetic modelling of drying and conversion/degradation of isoflavones during infrared drying of soybean, *Food Chemistry*, Vol. 133, pp. 946-952, 2012.
- [17] Shanmugam V., Natarajan E., Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 1543-1551, 2007.

در سیستم‌های خشک‌کن بررسی گردید. بدین منظور سینتیک رطوبت و دمای خشک شدن در مقایسه با یک خشک کن خورشیدی جریان طبیعی ارائه گردید. بعلاوه مدت زمان خشک شدن در هر دو خشک کن با یکدیگر مقایسه و میزان مصرف انرژی الکتریکی خشک کن ترکیبی بررسی گردید. با بررسی های انجام شده مشخص گردید که:

۱- با ترکیب دو سیستم خورشیدی و فروسرخ در خشک کن حاضر از مزیت دو سیستم جهت برطرف کردن عیوب دو سیستم استفاده شد. در واقع از سیستم های تابش فروسرخ جهت کاهش زمان خشک شدن استفاده می شود که ضعف این سیستم‌ها مصرف بالای انرژی آنها می باشد، اما از سیستم های خشک کن خورشیدی به دلیل امتیاز انرژی رایگان و دسترس بودن آن استفاده می شود منتهی زمان طولانی خشک شدن عیب بزرگ این سیستم ها می باشد، لذا با ترکیب آنها در سیستم حاضر، علاوه بر بهره بردن از مزایای آنها، عیوب این سیستم ها نیز تا مقدار بسیار زیادی کاسته شده است.

۲- زمان خشک شدن در مقایسه با خشک‌کن خورشیدی حداقل ۷۵٪ و حداکثر ۸۳٪ کاهش یافت.

۳- افزایش دما در خشک کن ترکیبی تاثیر محسوسی در کاهش زمان خشک شدن نداشت.

۴- بیشترین و کمترین مقدار مصرف انرژی الکتریکی مخصوص جهت خشک کردن ورقه سیب زمینی به ترتیب ۴/۳۵ و ۱/۷۹ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم و متعلق به ضخامت ۷ میلیمتر در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و ۳ میلیمتر در دمای ۵۰ درجه سلسیوس می باشد.

۵- بهترین شرایط خشک کردن سیب زمینی در خشک کن حاضر با توجه به مقادیر مصرف انرژی الکتریکی مخصوص، ضخامت ۳ میلیمتر و دمای ۵۰ درجه سلسیوس می‌باشد. بعلاوه با توجه به اینکه افزایش دما منجر به مصرف انرژی بیشتری می‌شود و تاثیر محسوسی در کاهش زمان خشک شدن خشک‌کن ترکیبی نداشته دمای ۵۰ درجه سلسیوس جهت خشک شدن سیب زمینی در خشک‌کن ترکیبی پیشنهاد می شود.

۶- کل انرژی مصرفی سیستم خشک‌کن پیشنهادی توسط انرژی خورشیدی تامین می‌گردد.

با توجه به نتایج به دست آمده و انرژی کم هزینه خورشیدی، و مصرف پایین انرژی الکتریکی که می تواند بوسیله یک سیستم فتوولتائیک تامین گردد، خشک‌کن ارائه شده می تواند به عنوان یک پتانسیل بالقوه جهت استفاده در صنایع خشک کن پیشنهاد و به عنوان جایگزینی برای خشک‌کن‌های فروسرخ و خورشیدی استفاده شود.

۵- تقدیر و تشکر

بدینوسیله نویسندگان از بخش بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه باهنر کرمان به خصوص دکتر حمید مرتضی‌پور که با ارائه امکانات آزمایشگاهی و دانشگاهی از تحقیق حاضر پشتیبانی نموده‌اند تشکر می‌نمایند.

۶- مراجع

- [1] Tripathy P. P., Kumar S., Determination of temperature dependent drying parameters for potato cylinders and slices during solar drying, *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, No. 11, pp. 2941-2948, 2008.