

## بررسی انرژی مصرفی و زمان خشک شدن پسته در یک خشک کن ترکیبی خورشیدی- مادون قرمز

مهدی رکابی<sup>۱</sup>، محمد حسین عباسپور فرد<sup>۲</sup> و حمید مرتضی پور<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیو سیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
- ۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیو سیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
- ۳- استادیار بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۰۴ پذیرش نهایی: ۱۳۹۵/۰۲/۱۲	در این مطالعه انرژی مصرفی و زمان خشک شدن پسته در یک خشک-کن ترکیبی خورشیدی- مادون قرمز، مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها در یک طرح کاملاً تصادفی در قالب فاکتوریل و با سه تکرار انجام شدند. تأثیر فاکتورهای دمای هوای خشک‌کننده در سه سطح ۴۵، ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس و شدت تابش مادون قرمز در سه سطح صفر، ۰/۰۷ و ۰/۱۴ وات بر سانتی‌مترمربع بر صفات مجموع انرژی مصرفی، سهم انرژی خورشیدی و زمان خشک شدن، در هر یک از تیمارهای آزمایش محاسبه و مقایسه گردیدند. نتایج نشان داد که افزایش شدت مادون قرمز مجموع انرژی مصرفی را به طور متوسط ۳۶ درصد کاهش می‌دهد. همچنین کمترین مقدار مجموع انرژی مصرفی در تیمار با دمای هوای خشک‌کننده ۵۵ درجه سلسیوس و با شدت مادون قرمز ۰/۱۴ وات بر سانتی‌مترمربع به دست آمد. کمترین زمان خشک شدن در تیمار با دمای هوای خشک‌کننده ۶۵ درجه سلسیوس و شدت مادون قرمز ۰/۱۴ وات بر سانتی‌مترمربع واقع گردید. به طور کلی افزایش دمای هوای خشک‌کننده از ۴۵ به ۶۵ درجه سلسیوس، زمان خشک شدن پسته را ۳۰ درصد افزایش، و شدت مادون قرمز را از صفر به ۰/۱۴ وات بر سانتی‌مترمربع، و این زمان را ۵۰ درصد کاهش داد. با توجه به سهم انرژی خورشیدی و کمتر بودن مجموع انرژی مصرفی، تیمار ۵۵ درجه سلسیوس با شدت مادون قرمز ۰/۱۴ وات بر سانتی‌مترمربع توصیه می‌شود.
* عهده دار مکاتبات Email: abaspour@um.ac.ir	

است که قسمت خوراکی، لایه درونی یعنی هسته آن است (۱).

صادرات پسته، از منابع قابل توجه تأمین ارز کشور می‌باشد. مطابق آخرین آمار منتشر شده سازمان خواروبار

### مقدمه

پسته از نظر گیاه‌شناسی جزء میوه‌های هسته‌دار مانند هلو و زردآلو است که از سه لایه‌ی هسته، گوشت و پوست تشکیل شده‌اند. تفاوت پسته با این میوه‌ها آن

ترکیبات معطر، کاهش زمان نگهداری، کاهش قدرت جوانه زنی، تغییر رنگ و گاهی حتی سوختن محصول می‌شود (۱۰).

انرژی خشک شدن به طور معمول از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌گردد. افزایش قیمت، منابع رو به پایان و آلودگی زیست محیطی این سوخت‌ها، استفاده از انرژی-های جایگزین و تجدیدپذیر را امری حیاتی نموده است. در این میان انرژی خورشیدی به دلیل فراوانی، در دسترس بودن، پاکی و ارزانی، مورد توجه ویژه قرار گرفته است. برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی، استفاده مستقل و یا ترکیبی از انرژی خورشیدی، از روش‌های توصیه شده در خشک کردن محصولات کشاورزی می‌باشد (۳).

مطالعات زیادی در مورد فرایند خشک شدن پسته با استفاده از انرژی خورشیدی و سایر منابع انرژی و مدل‌سازی خشک شدن آن صورت گرفته است. در پژوهشی شرایط خشک شدن پسته پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده در یک سامانه خشک‌کن خورشیدی با خشک شدن سنتی پسته مقایسه گردیده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که خشک‌کن خورشیدی با دمای  $50 \pm 10$  درجه سلسیوس در مدت ۶ ساعت فرایند خشک شدن را به طور کامل انجام می‌دهد، در حالی که خشک شدن در فضای باز که در دمای  $28 \pm 4$  درجه سلسیوس انجام می‌گیرد، ضمن داشتن تأثیرات بد محیطی و جوی، نیازمند مدت زمان به مراتب بیشتری برای خشک شدن می‌باشد (۱۷).

در تحقیق دیگری با تغییر دما، سرعت و رطوبت نسبی هوای خشک‌کننده، مشخصات خشک شدن لایه نازک و مدل‌سازی خشک شدن دانه‌های پسته در یک خشک‌کن خورشیدی بررسی و مدل Page، مناسب‌ترین مدل برای توصیف خشک شدن اعلام گردید. به علاوه دمای هوای خشک‌کننده بیشترین و سرعت و رطوبت نسبی آن کمترین اثر را بر سینتیک خشک شدن پسته داشته‌اند (۱۲).

ملل متحد در سال ۲۰۱۲، ایران با ۴۷۲۰۹۷ تن جایگاه اول دنیا در تولید این محصول را به خود اختصاص داده است. بیشترین میزان صادرات نیز در سال ۲۰۱۱، با ۱۳۰۱۳۷ تن و به ارزش ۱۰۱۰۸۷۳ هزار دلار متعلق به ایران بوده است (۶).

برداشت پسته در ایران از اواخر شهریور ماه شروع و در مدت ۴ تا ۶ هفته انجام می‌شود. پس از برداشت، فرایند فرآوری ظرف ۱۲ تا ۲۴ ساعت در کارگاه‌های فرآوری و به کمک ماشین‌های مختلف، از پوست‌گیری تا خشک کردن به صورت مکانیزه اجرا می‌شود (۱۱). بسته به زمان برداشت و شرایط آب و هوایی منطقه، رطوبت پسته هنگام برداشت ۴۰ تا ۵۰ درصد وزن خشک آن است. کاهش این رطوبت به ۵ تا ۷ درصد وزن خشک، برای نگهداری محصول ضروری می‌باشد. در روش سنتی خشک کردن، پسته‌ها روی محوطه‌ای وسیع با ضخامت کم، در مقابل آفتاب پهن و خشک می‌شوند. به دلیل نرخ پایین خشک شدن، این فرایند ۲ تا ۳ روز طول می‌کشد. رطوبت بالای محصول و زمان طولانی خشک شدن در این روش می‌تواند شرایط رشد قارچ افلاتوکسین و در نتیجه آلودگی پسته را در پی داشته باشد. تأثیر گرد و خاک و آلودگی‌های محیطی، زیان حشرات و عوامل جوی از دیگر معایب خشک کردن میدانی می‌باشد (۱۳). نیاز به تسریع فرایند خشک شدن، استفاده از خشک‌کن‌ها را، که اغلب خشک‌کن-های هوای داغ هستند، ناگزیر ساخته است. در این خشک‌کن‌ها هوای داغ با دمای ۵۰ تا ۹۳ درجه سلسیوس به مدت ۳ تا ۸ ساعت به توده‌ی پسته موجود در محفظه‌ی دستگاه اعمال شده و آن را خشک می‌کند. به کارگیری این خشک‌کن‌ها، مصرف سالیانه نزدیک به ۱۰ میلیون لیتر سوخت را در پی دارد (۱۴).

امکان‌پذیر نبودن کنترل دمای هوای خشک‌کننده در خشک‌کن‌های صنعتی با سوخت فسیلی و بالا رفتن دمای خشک‌کنی، علاوه بر مصرف انرژی بیشتر، باعث ایجاد ترک روی پوست سخت پسته، سخت شدن مغز، فرار

از دیگر مزایای استفاده از مادون قرمز به حداقل رساندن ضایعات و جلوگیری از افت ویژگی‌های کیفی محصول به دلیل کاهش زمان خشک شدن می‌باشد. مادون قرمز سبب ایجاد حرارت سریع و مستقیم در محصول می‌شود و سرعت خشک‌کنی آن را در مقایسه با خشک‌کنی همرفتی که در آنها بخشی از حرارت با خروج هوا از خشک‌کن به هدر می‌رود سریع‌تر بوده و بازده انرژی بالاتری دارد (۱۵).

مطالعات زیادی در مورد خشک شدن محصولات کشاورزی با این امواج صورت گرفته است. در پژوهشی تأثیر استفاده توام از هوای داغ و مادون قرمز بر سینتیک خشک شدن و ویژگی‌های فیزیکی ورقه‌های سیب‌زمینی بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ترکیب هوای گرم و مادون قرمز، نرخ خشک شدن بالاتری نسبت به استفاده از هوای گرم به تنهایی داشته و از نظر کیفی نیز مقدار سختی و زوال رنگ کمتری ایجاد می‌کند؛ به علاوه افزایش سرعت هوای خشک‌کننده در هر یک از شدت‌های تابشی مادون قرمز، نرخ مصرف انرژی کل را کاهش می‌دهد (۲۹).

در مطالعه دیگری مدل مناسب خشک شدن زعفران در یک خشک‌کن مادون قرمز آزمایشگاهی تعیین گردید. افزایش دمای خشک‌کنی در این خشک‌کن از ۶۰ تا ۱۱۰ درجه سلسیوس، زمان خشک شدن را از ۹۰ به ۳۵ دقیقه کاهش داد (۴).

فرایند خشک شدن مادون قرمز پسماندهای صنعتی گوجه‌فرنگی نیز در یک خشک‌کن آزمایشگاهی مدل-سازی شده است. تغییرات دمای خشک‌کن در این مطالعه از ۱۰۰ تا ۱۶۰ درجه سلسیوس، زمان خشک شدن را تا یک سوم کم کرد (۲۴).

مدل‌سازی ریاضی خشک شدن مادون قرمز در مورد محصولات دیگری نیز با موفقیت انجام گردید که از جمله می‌توان به مدل‌سازی ریاضی خشک شدن مادون قرمز پوست زیتون (۲۵)، هویج (۳۳)، ورقه‌های پیاز (۲۷) و سیب (۲۱) اشاره نمود.

در یک مطالعه تحلیل انرژی و اکسرژی فرایند خشک شدن خورشیدی پسته در یک خشک‌کن کابینتی بررسی شده است. این خشک‌کن شامل محفظه، جمع‌کننده، گرم‌کن کمکی و دمنده می‌باشد. نتایج خشک شدن پسته‌های پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده در این خشک‌کن نشان می‌دهد که دمای هوای خشک‌کننده در فاصله‌ی ۴۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس با سرعت ۱/۲۳ متر بر ثانیه و تابش بین ۲۰۰ تا ۸۰۸ وات بر متر مربع، در مدت ۶ ساعت به خوبی پسته را خشک نموده است. همچنین در فاصله زمانی یاد شده، انرژی مصرفی خشک‌کنی پسته‌های پوست‌گیری نشده نسبت به پوست‌گیری شده بیشتر بوده است (۱۶).

حرارت، امواج الکترومغناطیسی و سردکردن سریع، از جمله روش‌های دیگر خشک کردن محصولات کشاورزی می‌باشند. خشک‌کن‌های مادون قرمز به عنوان روشی برای افزایش بازده انرژی، کیفیت محصول و کاهش زمان خشک شدن مورد توجه و بررسی قرار گرفته‌اند (۲۸ و ۳۴). مادون قرمز امواج الکترومغناطیسی با طول موج ۷۰۰ نانو متر تا ۱ میلی متر هستند که به منظور جلوگیری از سوختن و سخت شدن لایه سطحی محصولات، اغلب در ترکیب با جریان هوای گرم به کار گرفته می‌شوند. در خشک کردن محصولات با جریان هوای گرم، خشک شدن ابتدا در لایه‌ی خارجی محصول صورت می‌گیرد. این امر موجب خشک شدن سطح محصول و کاهش نفوذپذیری آن می‌شود. لایه سخت شده‌ی سطحی، مانعی در مقابل انتشار رطوبت به سطح است و خروج رطوبت از محصول را طولانی می‌نماید. با استفاده از مادون قرمز گرما در درون محصول تولید می‌شود و در نقاطی که رطوبت بیشتری وجود دارد متمرکز می‌گردد و با افزایش فشار بخار، موجب انتشار رطوبت از این نقاط به سمت لایه‌های خارجی می‌شود؛ بنابراین با استفاده ترکیبی از هوای گرم و مادون قرمز مشکلات مربوط به خشک شدن لایه سطحی محصول کاهش می‌یابد (۲).

کردن پسته، ابتدا استفاده از یک خشک کن خورشیدی مورد نظر قرار گرفت. در ادامه، با توجه به مزایای گزارش شده در مورد اثر مادون قرمز بر کاهش انرژی مصرفی و زمان فرایند خشک شدن برخی محصولات، ترکیب مادون قرمز با خشک کن خورشیدی، انجام شد. هر چند خشک شدن خورشیدی پسته در پژوهش‌های پیشین مورد بررسی قرار گرفته، اما این مطالعه ترکیب خشک کن خورشیدی با مادون قرمز و تاثیر آن بر انرژی مصرفی و زمان فرایند خشک شدن را مورد بررسی قرار داده است. رقم پسته آزمایش شده در این خشک کن، پسته‌ی اکبری است که از ارقام مهم تولیدی و صادراتی ایران می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### مشخصات خشک کن

به منظور بررسی اثر انرژی خورشیدی و شدت تابش مادون قرمز بر خشک شدن پسته از یک خشک کن ترکیبی خورشیدی-مادون قرمز با صفحه جاذب تخت استفاده گردید. این خشک کن شامل: جمع کننده خورشیدی، محفظه محصول، مکنده، سامانه کنترل دمای هوای خشک کننده و منبع مادون قرمز می‌باشد. شکل ۱ تصویر و طرح‌واره این خشک کن را نشان می‌دهد.

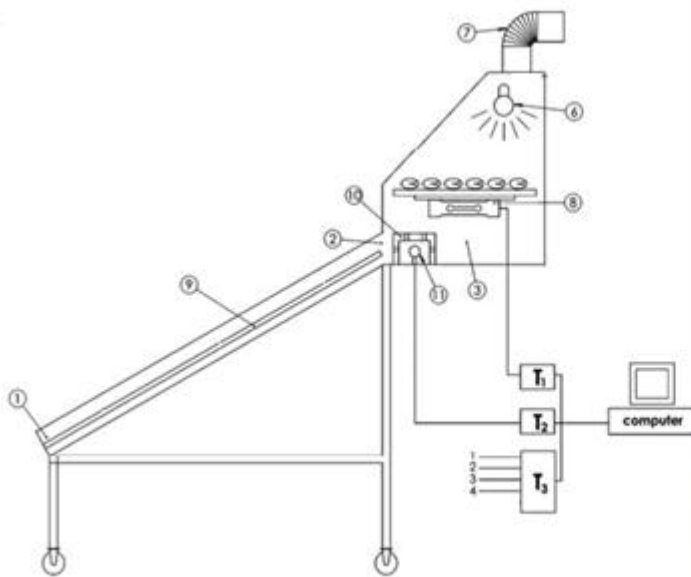
جمع کننده یک کانال چوبی عایق شده با پشم شیشه است که صفحه‌ی جاذب آلومینیومی با مساحت ۱/۱ متر-مربع داخل آن نصب شده است. سطح رویی جمع کننده پوششی از شیشه دارد. تابش خورشید صفحه جاذب را گرم می‌کند و جریان هوای عبوری از جمع کننده در اثر تماس با این صفحه گرم می‌شود. محفظه محصول به ابعاد ۶۰×۷۰×۸۰ سانتی متر از جنس چوب و با پوشش پشم شیشه ساخته شد.

در تحقیقی دیگر استفاده توام از مادون قرمز و خلاء در خشک شدن پسته در یک خشک کن آزمایشگاهی بررسی شد. این خشک کن یک آون خلأیی با قابلیت تابش مادون قرمز بود. نتایج نشان داد زمان خشک شدن پسته در ترکیب خلاء و مادون قرمز، ۸ تا ۱۰ برابر نسبت به خشک کنی معمول کمتر می‌شود. همچنین به دلیل وجود خلاء و نیاز به دمای پایین تر خشک کنی، کیفیت محصول افزایش می‌یابد (۱۳).

در پژوهش دیگری خشک شدن قارچ دکمه‌ای در یک خشک کن ترکیبی خورشیدی-مادون قرمز بررسی شده است. سطوح مادون قرمز در این مطالعه ۱۵۰، ۲۰۰ و ۳۷۵ وات و دمای هوای خشک کننده ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس با سرعت ۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که با افزایش دمای خشک کنی از ۵۰ به ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای خشک کننده از ۱ به ۳ متر بر ثانیه، مقدار کاهش وزن بترتیب ۱۰/۳ و ۱۳/۹ درصد کاهش می‌یابد. افزایش توان مادون قرمز از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات نیز ۲۸/۴ درصد مقدار کاهش وزن را افزایش می‌دهد (۲۶).

مقایسه تاثیر امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز بر پارامترهای خشک شدن ورقه‌های هلو در شرایط خلاء، مطالعه دیگری است که انجام شده است. نتایج حاکی از کمتر بودن ۴ تا ۲۰ دقیقه‌ای زمان خشک شدن در امواج متوسط نسبت به امواج کوتاه است. همچنین تغییرات کلی رنگ و درصد چروکیدگی تحت تاثیر امواج کوتاه نسبت به امواج متوسط مادون قرمز در شرایط مختلف خشک کردن بترتیب بین ۶/۶ تا ۸/۷ و ۷/۸ تا ۹/۷ درصد کمتر می‌باشد (۵).

در تحقیق حاضر با توجه به تولید پسته در مناطق گرم و خشک و بیابانی و پتانسیل بالای این مناطق در استفاده از انرژی خورشیدی در فصل فرآوری، به منظور کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی در فرایند خشک-



شکل (۱) تصویر و طرحواره خشک کن شامل: حسگرهای دما (۱ تا ۴)، منبع مادون قرمز (۶)، لوله ورودی مکعبه (۷)، لودسل (۸)، صفحه جاذب آلومینیومی (۹)، ذخیره کننده گرمایی (۱۰)، گرم کن کمکی (۱۱)

Figure (1) Photograph and Schematic view of the dryer including: temperature sensors (1 to 4), IR resource (6), fan input tube (7), aluminum absorber plate (9), thermal capacitor and (10) assistant heater (11)

ساعت برای خشک شدن پسته، دبی حجمی ۰/۰۳۵ متر مکعب بر ثانیه به دست آمد.

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 قسمت بالای سینی محصول منبع مادون قرمز Philips مدل BRI25، با توان ۲۵۰ و ۵۰۰ وات، ساخت کره و در فاصله ۱۰ سانتی متری از محصول نصب گردید. در دهانه‌ی خروجی جمع کننده از یک گرم کن کمکی به منظور تأمین دمای هوای خشک کننده در هنگام نیاز، استفاده شد. انرژی مورد نیاز مکعبه، منبع مادون قرمز و گرم کن کمکی از برق شهری تأمین گردید. گرم کن کمکی در صورت عدم تأمین دمای هوای خشک کننده از سوی جمع کننده خورشیدی، وصل و در هنگام تأمین دمای لازم، قطع می شود. برای بهبود بهره گیری از انرژی گرمایی این گرم کن و به حداقل رساندن تأثیر تابش مستقیم آن روی محصول و حسگر موجود در محفظه محصول، از یک ذخیره کننده گرمایی استفاده شد. این

برای ایجاد جریان هوای خشک کننده، قسمت بالای محفظه محصول یک مکعبه گریز از مرکز تعبیه گردید تا بر اساس طراحی انجام شده، هوا را با دبی حجمی ۰/۰۳۵ متر مکعب بر ثانیه از روی محصول عبور دهد. برای محاسبه حجم هوای مورد نیاز از معادله‌ی تراز انرژی فرایند خشک شدن استفاده گردید:

$$W_w \times \lambda = W_a \times C_a \times (T_i - T_f) \quad (1)$$

که در آن  $W_w$  جرم آب بخار شده از نمونه (کیلوگرم)،  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر آب (مگاژول بر کیلوگرم)،  $W_a$  جرم هوای مورد نیاز برای آبیگری (کیلوگرم)،  $C_a$  ظرفیت گرمایی ویژه هوا (کیلوژول بر کیلوگرم کلونین) و  $T_i$  و  $T_f$  به ترتیب دمای اولیه و نهایی هوای خشک می باشند. حجم هوای مورد نیاز برای آبیگری از رابطه زیر به دست آمد:

$$V_a = \frac{W_a \times R \times T_f}{P} \quad (2)$$

که در آن  $P$  فشار اتمسفر (پاسکال) و  $R$  ثابت هوا (ژول بر کیلوگرم کلونین) می باشد. با توجه به مدت زمان ۴

رکابی و همکاران: بررسی انرژی مصرفی و زمان خشک شدن ...

منظور ثابت نگهداشتن دمای هوای خشک کننده، استفاده گردید ( $T_3$  در شکل ۱). میکروکنترلر این سامانه به گونه‌ای برنامه‌ریزی شد که دمای حسگر زیر سینی محصول را به عنوان دمای مرجع اخذ و با توجه به این دما، رله مربوط به مدار گرم‌کن کمکی را باز و بسته نماید. با کمتر شدن دمای حسگر زیر سینی محصول از دمای مرجع، رله‌ی مدار گرم‌کن وصل و در صورت بیشتر شدن دما، رله قطع می‌شود.

برای اندازه‌گیری جرم و تعیین محتوای رطوبت اولیه نمونه‌ها، به ترتیب از یک ترازوی دیجیتال مدل A&D با دقت ۰/۱ گرم و آون مدل U630 استفاده گردید.

### صفات مورد ارزیابی

صفات مورد ارزیابی در این تحقیق علاوه بر مدت زمان خشک شدن، شامل انرژی حرارتی تولیدی در جمع‌کننده، انرژی مصرفی برای خشک کردن، سهم انرژی خورشیدی و نرخ ویژه تبخیر بودند که در ادامه نحوه محاسبه هر یک آورده شده است.

یکی از مهم‌ترین عوامل عملکرد هر سامانه خورشیدی گرمایی، مقدار انرژی حرارتی تولید شده در جمع‌کننده‌ی آن در مدت زمان انجام فرایند است که از رابطه ۳ محاسبه شد (۸).

$$E_s = \int_L \dot{Q}.dt \quad (۳)$$

که در آن،  $E_s$  انرژی حرارتی جمع‌کننده (ژول)،  $dt$  بازه زمانی اندازه‌گیری توان (ثانیه)،  $L$  مدت زمان انجام آزمایش (ثانیه) و  $\dot{Q}$  توان حرارتی تولید شده در جمع‌کننده است که از رابطه ۴ بدست آمد.

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T \quad (۴)$$

در این رابطه،  $C_p$ ، گرمای ویژه هوای عبوری (ژول بر کیلوگرم کلونین)،  $\dot{m}$  دبی جرمی هوای عبوری (کیلوگرم بر ثانیه) و  $\Delta T$  اختلاف دمای بین هوای

ذخیره‌کننده از گل رس و به صورت مشبک است و به عنوان پوششی روی گرم‌کن کمکی قرار گرفت.

### ابزار اندازه‌گیری

چهار حسگر دما از نوع LM35، قبل و بعد از جمع‌کننده، قبل از سینی محصول و در محیط نصب شدند تا دما را در این نقاط اندازه‌گیری نمایند. برای محافظت حسگر زیر سینی محصول از تابش مستقیم منبع مادون قرمز، این حسگر در فاصله‌ای مناسب نصب گردید، ضمن این که سینی و ضخامت پسته‌های پهن شده روی آن نیز مانع رسیدن تابش مستقیم به این حسگر می‌شود.

به کمک دو حسگر لودسل (ZEMIC مدل L6D، ظرفیت ۳ و دقت ۰/۰۰۰۲ کیلوگرم) وزن محصول طی خشک شدن، تعیین گردید (۱۹). این دو حسگر در محل تکیه‌گاه سینی محصول نصب شدند (شکل ۱). حسگرها به صورت موازی به یک ترانسیمتر مدل TM-1020 (شرکت تیکا، ایران) متصل و خروجی ترانسیمتر از طریق درگاه سریال به رایانه وصل شد ( $T_1$  شکل ۱). نرم‌افزار مربوط به ترانسیمتر، امکان مشاهده لحظه‌ای و ثبت وزن محصول در بازه‌های زمانی دلخواه را فراهم نمود.

برای اندازه‌گیری توان مصرفی مکنده، گرم‌کن کمکی و منبع مادون قرمز از سه وات‌متر مدل TM-1510 (شرکت تیکا، ایران) استفاده شد. وات‌مترها از طریق درگاه RS232 به رایانه وصل گردیدند ( $T_2$  در شکل ۱). نرم‌افزار مربوط به وات‌مترها، امکان مشاهده لحظه‌ای و ثبت توان مصرفی مکنده، گرم‌کن و منبع مادون قرمز در بازه‌های زمانی دلخواه را فراهم نمود.

اندازه‌گیری شدت تابش خورشید با یک تابش سنج خورشیدی (مدل TES 1333R) انجام شد. این تابش سنج در کنار صفحه جمع‌کننده، به گونه‌ای که تابش عمود بر سطح این صفحه را اندازه‌گیری نماید، قرار داده شد.

با توجه به تغییرات تابش و دمای محیط در طول روز، از یک سامانه‌ی کنترل دما با کنترل‌کننده AVR، به

گردید. نمونه‌های پسته به صورت روزانه تهیه و قبل از قرار دادن در آون، پوست سبز آنها جدا گردید. دما و مدت زمان خشک شدن نمونه‌ها در آون، براساس استاندارد ASABE به ترتیب ۱۳۰ درجه سلسیوس و ۶ ساعت در نظر گرفته شد (۷).

برای جلوگیری از خشک شدن رطوبت سطحی، نمونه‌ها قبل از آزمایش آنها در خشک‌کن، از ظروف پلاستیکی دردار استفاده شد. این ظروف در دمای  $\pm 3$  درجه سلسیوس در یخچال نگهداری شدند (۱۸).

آزمایش‌ها در قالب طرح فاکتوریل و به صورت کاملاً تصادفی و در سه تکرار انجام شدند. در هر آزمایش مقدار یک کیلوگرم پسته پوست‌گیری شده تازه، به صورت یک لایه، در سینی محصول پهن و خشک گردید.

در منابع متعددی اثر دمای هوای خشک‌کننده در خشک کردن پسته، در بازه‌ی دمایی ۴۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس بررسی شده است (۱۲؛ ۱۶؛ ۱۰؛ ۳۰؛ ۳۲ و ۱۷). بر این اساس اثر دمای هوای خشک‌کننده در سه سطح ۴۵، ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس بر صفات عملکرد خشک‌کن شامل: مدت زمان خشک شدن، انرژی مصرفی و سهم انرژی خورشیدی بررسی شد. اثر توان مادون قرمز در خشک کردن محصولات مختلف در بسیاری از منابع در بازه‌ی توانی ۱۰۰ تا ۱۳۰۰ وات و با فاصله ۵ تا ۲۰ سانتی‌متری منبع مادون قرمز از محصول، بررسی شده است (۲۶؛ ۲۰؛ ۲۵ و ۲۷). بر این اساس و با توجه به آزمایش‌های آغازین انجام شده قبل از آزمایش‌های اصلی، سطوح بدون مادون قرمز، با توان ۲۵۰ و ۵۰۰ وات انتخاب گردیدند. این سطوح توان، بر اساس شدت تابش با سه سطح صفر، ۰/۰۷ و ۰/۱۴ وات بر سانتی‌متر مربع معادل شدند. بنابراین اثر توان مادون قرمز در سه سطح صفر، ۰/۰۷ و ۰/۱۴ وات بر سانتی‌متر مربع بر صفات عملکرد یاد شده بررسی شد.

وزن لحظه‌ای محصول، توان مصرفی مکند، گرم‌کن کمکی و منبع مادون قرمز، دمای هوای قبل و بعد از

ورودی و خروجی از جمع‌کننده (درجه سلسیوس) است. با توجه به متغیر بودن گرمای ویژه هوا با دما، از مقدار متوسط ۱/۰۰۵ (ژول بر کیلوگرم درجه کلونین) استفاده گردید.

کل انرژی مصرفی در فرایند خشک شدن ( $E_T$ ) شامل مجموع انرژی حرارتی تولید شده در جمع‌کننده ( $E_s$ ) و انرژی الکتریکی مصرف شده به وسیله مکند، گرم‌کن کمکی و منبع مادون قرمز بر حسب ژول می‌باشد. انرژی الکتریکی مصرفی به وسیله ترانس‌میترووات-مترهای به کار رفته در سامانه اندازه‌گیری خشک‌کن محاسبه شد.

سهم انرژی خورشیدی (SF)، بیانگر سهمی از کل انرژی مصرفی است که توسط خورشید تأمین می‌شود. به عبارت دیگر، سهم انرژی خورشیدی به نحوی نشان-دهنده‌ی مقدار صرفه جوئی در مصرف سوخت‌های فسیلی می‌باشد. از رابطه ۵ برای محاسبه سهم انرژی خورشیدی استفاده شد (۱۹ و ۸).

$$SF = \frac{E_s}{E_T} \quad (5)$$

نرخ ویژه از دست دادن رطوبت<sup>۱</sup> (SMER) که نسبت جرم رطوبت از دست رفته به انرژی مصرف شده (کیلوگرم بر کیلووات ساعت) را نشان می‌دهد، از رابطه (۶) بدست می‌آید (۲۲).

$$SMER = \frac{m_{wd}}{E_T} \quad (6)$$

در این رابطه  $m_{wd}$  جرم رطوبت از دست رفته در طول فرایند خشک شدن (کیلوگرم) است.

### روش انجام آزمایش

آزمایش‌های مربوط به خشک‌کن ترکیبی خورشیدی-مادون قرمز در دانشگاه شهید باهنر کرمان و در ماه‌های مهر و آبان ۹۳، از ساعت ۹ صبح تا ۳ بعد-ازظهر انجام پذیرفت. پیش از هر آزمایش ابتدا محتوای رطوبت اولیه هر یک از نمونه‌ها با استفاده از آون تعیین

رکابی و همکاران: بررسی انرژی مصرفی و زمان خشک شدن ...

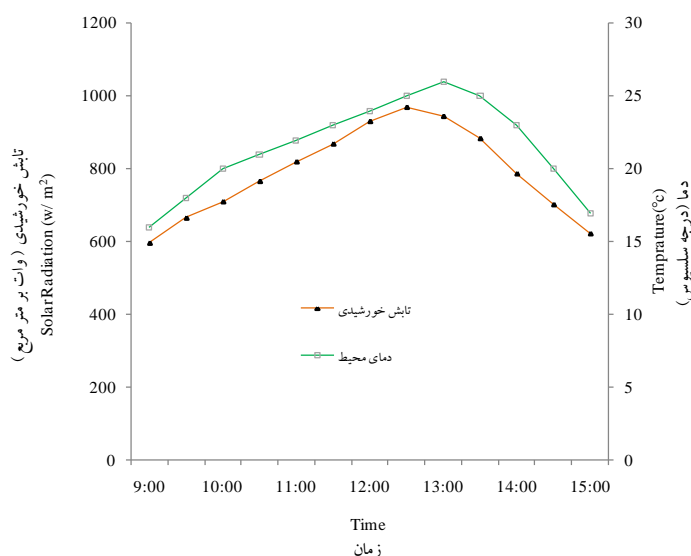
که در ساعت ۱۲:۳۰ ظهر رخ داده است. در مجموع میانگین دما ۲۲ درجه سلسیوس و میانگین شدت تابش در این مدت ۷۹۰ وات بر مترمربع اندازه گیری شد.

نتایج تجزیه واریانس اثر فاکتورهای مختلف آزمایش و اثر متقابل آن‌ها بر مجموع انرژی مصرفی، زمان خشک شدن و سهم انرژی خورشیدی، در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به این جدول، تغییرات دمای هوای خشک کننده، اثر معنی داری بر مجموع انرژی مصرفی، زمان خشک شدن و سهم انرژی خورشیدی داشت. نتایج همچنین نشان می‌دهد که اثر سطوح شدت مادون قرمز و اثر متقابل دما و شدت مادون قرمز نیز بر همه صفات یاد شده معنی دار بود.

جمع کننده خورشیدی و قبل از سینی محصول در فاصله- های زمانی یک ثانیه‌ای اندازه‌گیری شدند. با توجه به خاموش و روشن شدن لحظه‌ای گرم کن و عدم امکان پیش بینی زمان روشن و خاموش شدن آن، بازه‌ی زمانی ثبت توان الکتریکی مصرفی که توسط وات متر اندازه- گیری شد یک ثانیه‌ای انتخاب گردید (۱۹). دمای محیط و شدت تابش خورشید نیز در هر آزمایش در بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه‌ای اندازه‌گیری و ثبت گردیدند.

### نتایج و بحث

شکل ۲، تغییرات میانگین شدت تابش و درجه حرارت محیط را در طول روز (در محدوده زمانی اول مهر تا ۲۸ آبان ۹۳ در محل انجام آزمایش) نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود بیشترین میانگین دما ۲۶ درجه سلسیوس است که در ساعت ۱۳:۰۰ ثبت شده و بیشترین میانگین تابش برابر ۹۷۰ وات بر متر مربع بوده



شکل (۲) تغییرات میانگین دمای محیط و شدت تابش در طول روزهای انجام آزمایش در کرمان

Figure (2) Variations of average solar radiation and ambient temperature of the days during the tests in Kerman

و به طور کلی با افزایش دما از ۴۵ به ۶۵ درجه سلسیوس به دلیل افزایش نرخ تبخیر، زمان خشک شدن پسته ۳۰ درصد کاهش یافته است.

شکل ۳، تغییرات زمان خشک شدن را در سطوح مختلف دمای هوای خشک کننده و شدت مادون قرمز، نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، افزایش دمای هوای خشک کننده در زمان خشک شدن، اثر معنی داری داشته



انرژی امواج مادون قرمز بر روی محصول متمرکز شده است و با بیشتر شدن شدت تابش، دمای محصول نیز افزایش می‌یابد. افزایش دمای محصول فعالیت آبی درون آن را تشدید کرده و منجر به زیاد شدن فشار بخار درون محصول می‌شود. هر چه اختلاف فشار بخار درون محصول با هوای اطراف بیشتر شود، نرخ انتقال جرم از محصول به هوای اطراف نیز بیشتر می‌شود؛ بدین ترتیب سطوح بالاتر تابش مادون قرمز موجب افزایش نرخ انتقال جرم و کاهش زمان خشک شدن محصول می‌گردد.

در واقع افزایش دما از یک طرف باعث بالا رفتن ظرفیت جذب رطوبت هوا به دلیل زیاد شدن اختلاف دمای بین هوا و پسته شده و از طرف دیگر سبب گرم شدن سریع تر پسته و تبخیر بهتر رطوبت از آن می‌شود. در این مورد کاهش ۵۰ درصدی در زمان خشک شدن با افزایش دما تا ۷۰ و ۹۰ درجه سلسیوس نیز گزارش گردیده است، اما به دلیل بالا بودن دمای خشک کنی، پسته خشک شده از نظر کیفی تغییر مزه یافته و مزه برشتهگی بالایی دارد (۹ و ۳۱).

تغییرات زمان خشک شدن بین سطوح شدت مادون قرمز نیز معنی دار بوده و به طور کلی با افزایش شدت مادون قرمز از صفر به ۰/۱۴ وات بر سانتی متر مربع، زمان خشک شدن ۵۰ درصد کاهش داشته است. در واقع

جدول (۱) نتایج تجزیه واریانس اثر فاکتورهای آزمایش بر زمان خشک شدن، مجموع انرژی مصرفی و سهم انرژی خورشیدی

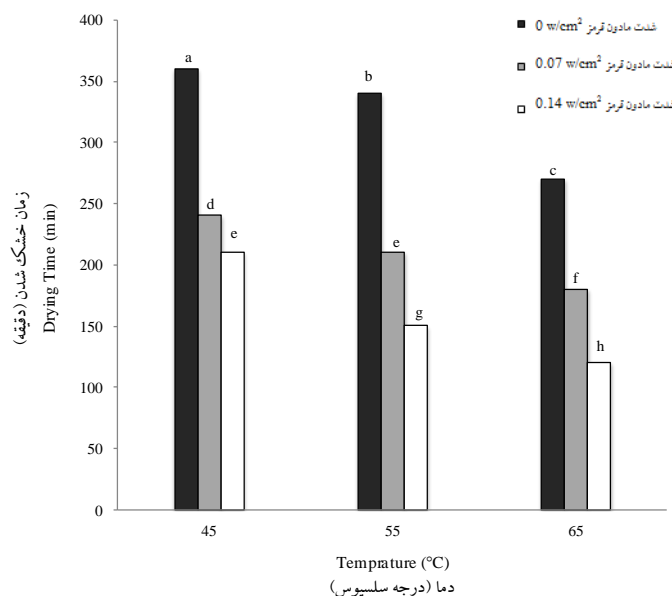
Table (1) Analysis of variance of the factors effect on drying time, total energy consumption and solar fraction

میانگین مربعات Mean of Squares			درجه آزادی Degree of Freedom	متغیر Variable
سهم انرژی خورشیدی Solar Fraction	مجموع انرژی مصرفی Total Energy Consumption	زمان خشک شدن Drying Time		
0.0435**	1.14**	14433.3 3**	2	دما Temperature
0.0136**	2.29**	63033.3 3**	2	شدت مادون قرمز IR Power
0.0016**	1.41**	633.33**	4	دما × شدت مادون قرمز IR × Temperature Power
0.000014	0.13	25.00	18	خطا Error

\*\* معنی داری در سطح ۱ درصد

\*\* Significant, P<0.01

رکابی و همکاران: بررسی انرژی مصرفی و زمان خشک شدن ...



شکل (۳) تغییرات زمان خشک شدن در سطوح مختلف دمای هوای خشک کننده و شدت مادون قرمز (میانگین‌های با حروف مشابه دارای اختلاف معنی دار در سطح ۱ درصد نمی باشند)

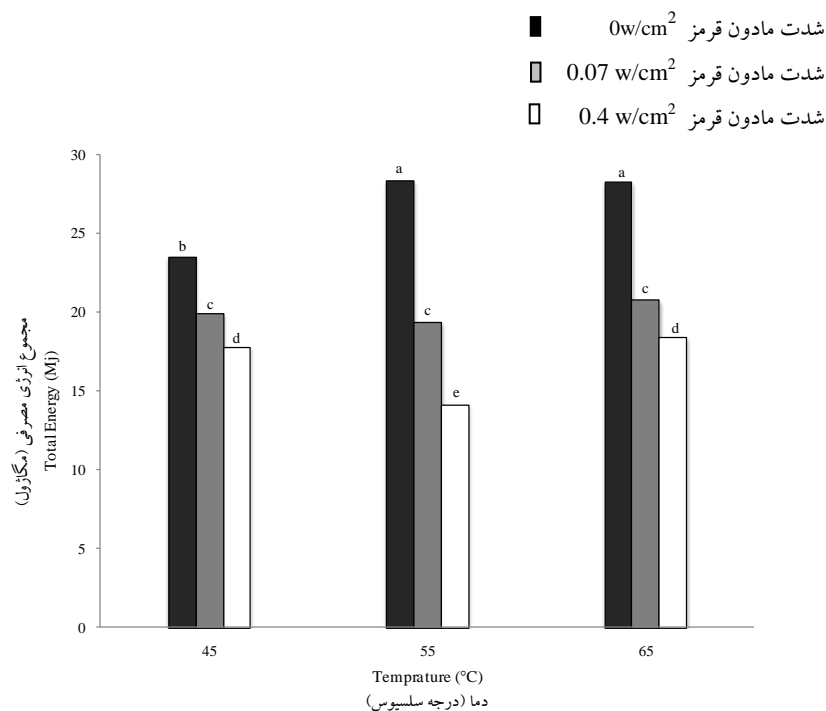
Figure (3) Variation of drying time at different levels of drying air temperature and IR power (Means with the same letters are not significantly different at 1% level)

محصول متمرکز شده و جذب کمی را در هوای اطراف دارد. در واقع انتقال انرژی از طریق مادون قرمز، بهینه تر است و با افزایش سهم آن در مجموع، انرژی مصرفی کمتر می گردد. افزایش شدت مادون قرمز در خشک کردن سایر محصولات نیز مجموع انرژی مصرفی را کاهش داده است (۲؛ ۳۴ و ۲۹).

بدون استفاده از مادون قرمز، تغییرات دما از ۴۵ به ۵۵ درجه سلسیوس موجب افزایش معنی دار در مجموع انرژی مصرفی شده است. دلیل این امر ورود گرم کن کمکی به مدار برای تأمین دمای خشک کنی است که انرژی مصرفی آن به مجموع انرژی مصرفی اضافه شده است. به علاوه کاهش زمان خشک شدن در دمای ۵۵ نسبت به ۴۵ درجه سلسیوس آنقدر نبوده است که اثر مصرف انرژی گرم کن برقی را خنثی نماید.

کمترین زمان خشک شدن پسته در دمای ۶۵ درجه سلسیوس با شدت ۰/۱۴ وات بر سانتی متر مربع مادون قرمز و به مقدار ۱۲۰ دقیقه اندازه گیری شد. خشک کنی مادون قرمز به دلایل ذکر شده، زمان خشک شدن را در برخی محصولات ۱۳ تا ۵۰ درصد کاهش داده است (۲۱؛ ۲۷ و ۲۳).

شکل ۴، تغییرات مجموع انرژی مصرفی را در سطوح مختلف دمای هوای خشک کننده و شدت مادون قرمز، نشان می دهد. با توجه به این شکل افزایش شدت مادون قرمز از صفر تا ۰/۱۴ وات بر سانتی متر مربع، مجموع انرژی مصرفی را به طور متوسط ۳۶ درصد کاهش داده است. دلیل این امر به ساختار امواج مادون قرمز مربوط می شود. این امواج بطور مستقیم گرمای فرایند خشک کنی را تأمین می نمایند. انرژی امواج مادون قرمز بر روی



شکل (۴) تغییرات مجموع انرژی مصرفی در سطوح مختلف دمای هوای خشک کننده و شدت مادون قرمز (میانگین‌های با حروف مشابه دارای اختلاف معنی دار در سطح ۱ درصد نمی باشند)

Figure (4) Variation of total energy consumption at different levels of drying air temperature and IR power  
(Means with the same letters are not significantly different at the 1% level)

است. با توجه به شکل ۴، کمترین مقدار مجموع انرژی مصرفی در دمای هوای خشک کننده ۵۵ درجه سلسیوس و با شدت مادون قرمز ۰/۱۴ وات بر سانتی متر مربع بوده است.

شکل ۵، تغییرات سهم انرژی خورشیدی را در سطوح مختلف دمای هوای خشک کننده و شدت مادون قرمز نشان می‌دهد. با توجه به این شکل به طور کلی افزایش دمای هوای خشک کننده و شدت مادون قرمز به دلیل کاهش زمان خشک شدن، سهم انرژی خورشیدی را کاهش داده است؛ افزایش شدت مادون قرمز از ۰/۰۷ به ۰/۱۴ وات بر سانتی متر مربع در دماهای ۴۵ و ۵۵ درجه سلسیوس اختلاف معنی‌داری را در سهم انرژی خورشیدی در خشک شدن ایجاد نموده است. در واقع اگر چه افزایش شدت مادون قرمز زمان خشک شدن را کاهش داده و باعث کاهش سهم انرژی خورشیدی شده است، اما انرژی مصرفی کل نیز کاهش یافته و در

از دمای ۵۵ به ۶۵ درجه سلسیوس کاهش مصرف انرژی ناشی از کاهش زمان خشک شدن باعث عدم ایجاد اختلاف معنی‌دار در مجموع انرژی مصرفی بین این دو دما شده است. این مطلب در حالت استفاده از ۰/۰۷ وات بر سانتی متر مربع شدت مادون قرمز بین هر سه دمای هوای خشک کننده نیز برقرار است. به عبارت دیگر کاهش زمان خشک شدن، از دیاد مصرف انرژی ناشی از افزایش دمای هوای خشک کننده را خنثی نموده است.

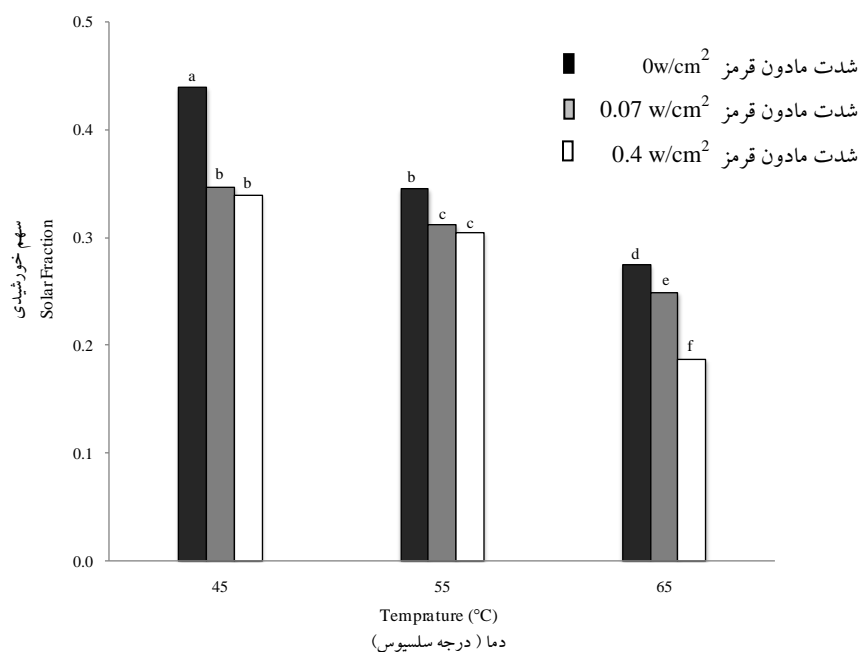
در حالت استفاده از مادون قرمز با شدت ۰/۱۴ وات بر سانتی متر مربع، تغییرات مجموع انرژی مصرفی از ۴۵ به ۵۵ درجه سلسیوس بدلیل کاهش زمان خشک شدن، مجموع انرژی مصرفی را کاهش داده است. اما از دمای ۵۵ به ۶۵ درجه سلسیوس هر چند زمان خشک شدن کاهش یافته ولی افزایش انرژی الکتریکی مصرفی گرم-کن و مادون قرمز مجموع انرژی مصرفی را افزایش داده

رکابی و همکاران: بررسی انرژی مصرفی و زمان خشک شدن ...

نشان می دهد. با توجه به این شکل، به طور کلی افزایش شدت مادون قرمز نرخ ویژه از دست دادن رطوبت را افزایش داده است. بیشترین مقدار نرخ ویژه تبخیر برابر ۱/۱۴ کیلوگرم بر کیلو وات ساعت، در دمای هوای خشک کننده ۵۵ درجه سلسیوس و با شدت مادون قرمز ۰/۱۴ وات بر سانتی متر مربع است که به دلیل کمترین مقدار مجموع انرژی مصرفی در این تیمار افتاده است.

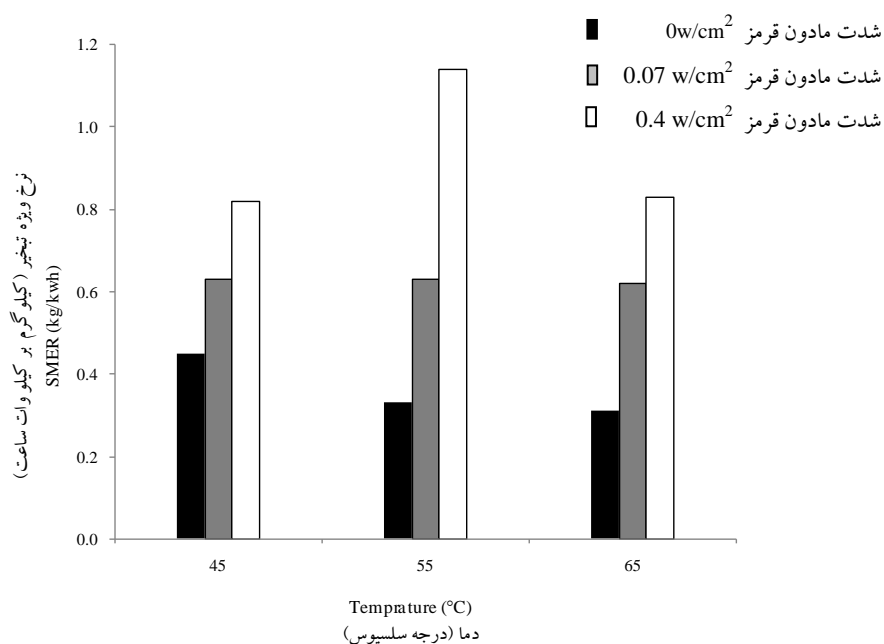
مجموع سهم انرژی خورشیدی تغییر معنی داری نداشته است. تیمار دمای هوای خشک کننده ۵۵ درجه سلسیوس با شدت مادون قرمز ۰/۱۴ وات بر سانتی متر مربع، که در آن کمترین مقدار مجموع انرژی مصرفی حاصل شده است، سهم انرژی خورشیدی بالاتری را نسبت به تیمار ۶۵ درجه سلسیوس با شدت مادون قرمز ۰/۱۴ وات بر سانتی متر مربع، که در آن کمترین زمان خشک شدن اتفاق افتاده است، دارد.

شکل ۶، تغییرات نرخ ویژه تبخیر در سطوح مختلف دمای هوای خشک کننده و شدت مادون قرمز را



شکل (۵) تغییرات سهم انرژی خورشیدی در سطوح مختلف دمای هوای خشک کننده و شدت مادون قرمز (میانگین های با حروف مشابه دارای اختلاف معنی دار در سطح ۱٪ نمی باشند)

Figure (5) Variation of solar fraction at different levels of drying air temperature and IR power (Means with the same letters are not significantly different at 1% level)



شکل (۶) تغییرات نرخ ویژه از دست دادن رطوبت در سطوح مختلف دمای هوای خشک کننده و شدت مادون قرمز  
 Figure (6) Variation of specific moisture extraction rate at different levels of drying air temperature and IR power

دمای هوای خشک کننده و با شدت مادون قرمز ۰/۱۴ وات بر سانتی متر مربع (تیمار کمترین مقدار مجموع انرژی مصرفی) سهم انرژی خورشیدی بالاتری را نسبت به تیمار ۶۵ درجه سلسیوس و با شدت مادون قرمز ۰/۱۴ وات بر سانتی متر مربع (تیمار کمترین زمان خشک شدن) دارد. بنابراین با توجه به بالاتر بودن سهم انرژی خورشیدی و کمترین میزان مجموع انرژی مصرفی، تیمار ۵۵ درجه سلسیوس دمای هوای خشک کننده با ترکیب ۰/۱۴ وات بر سانتی متر مربع شدت مادون قرمز، توصیه می شود.

### سپاس‌گزاری

بدینوسیله نویسندگان از سازمان بسیج علمی، پژوهشی و فناوری استان کرمان بدلیل حمایت‌های مالی از تحقیق حاضر تشکر بعمل می‌آورند.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه انرژی مصرفی و زمان خشک شدن پسته در یک خشک کن ترکیبی خورشیدی-مادون قرمز با صفحه جمع کننده تخت مورد بررسی قرار گرفته است. بطور کلی با افزایش دمای هوای خشک کننده از ۴۵ به ۶۵ درجه سلسیوس، زمان خشک شدن ۳۰ درصد و با افزایش شدت مادون قرمز از صفر به ۰/۱۴ وات بر سانتی متر مربع، این زمان ۵۰ درصد کاهش یافته است. کمترین زمان خشک شدن در تیماری با دمای هوای خشک کننده ۶۵ درجه سلسیوس و با شدت مادون قرمز ۰/۱۴ وات بر سانتی متر مربع، به مقدار ۱۲۰ دقیقه حاصل شد. افزایش شدت مادون قرمز، مجموع انرژی مصرفی را به طور متوسط ۳۶ درصد کاهش داده است. سهم انرژی خورشیدی نیز در مجموع با افزایش دما و شدت مادون قرمز، کاهش پیدا نموده است. تیمار ۵۵ درجه سلسیوس

## منابع

1. Abrishami, M. 1994. Persian Pistachio: A Comprehensive History. Iran University Press. Tehran, p:669 (In Persian).
2. Afzal, T., Abe, T., Hikida, Y., 1999. Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley. *Journal of Food Engineering*, 42:177-182.
3. Aghkhani, M.H., Abasspour-Fard, M.H., Bayati, M.R., Morteza pour, H., Saedi, S.I., and Moghimi, A. 2013. Performance Analysis of a Solar Dryer Equipped with a Recycling Air System and Desiccant Chamber. *Journal of Agricultural Machinery* 3: 92-103. (In Persian with English abstract).
4. Akhondi, E., Kazemi, A., and Maghsoodi, V. 2011. Determination of a suitable thin layer drying curve model for saffron (*Crocus sativus* L) stigmas in an infrared dryer. *Scientia Iranica*, 18:1397-1401.
5. Amiri Chayjan, R., and Alaei, B. 2016. Comparison of short and medium infrared radiation on drying parameters of peach slices under vacuum conditions. *JFST* 13(58):107-116. (In Persian with English abstract).
6. Anonymous, 2012. <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>.
7. ASABE, 2005. Standard for measurement of moisture in grain and seed. *Agricultural Engineers Yearbook*.
8. Duffie, J.A., and Beckman, W.A., 2013. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley and Sons.
9. Gazor, H.R., and Minaei, S., 2005. Influence of temperature and air velocity on drying time and quality parameters of pistachio (*Pistacia vera* L.). *Drying Technology*, 23:2463-2475.
10. Ghazanfari, A., Tabil Jr, L., and Sokhansanj, S. 2003. Evaluating a solar dryer for in-shell drying of split pistachio nuts. *Drying Technology*, 21:1357-1368.
11. Kashaninejad, M., and Tabil, L. 2009. Resistance of bulk pistachio nuts (Ohadi variety) to airflow. *Journal of Food Engineering*, 90:104-109.
12. Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A., and Tabil, L. 2007. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, 78:98-108.
13. Kouchakzadeh, A., and Haghghi, K. 2011. Modeling of vacuum-infrared drying of pistachios. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 13: 1-6.
14. Kouchakzadeh, A., and Tavakoli, T. 2009. The effect of moisture and temperature on thermophysical properties of Iranian pistachios. *World Applied Sciences Journal*, 7:1552-1558.

15. Meeso, N., Nathakaranakule, A., Midhiyonon, T., and Soponronnarit S. 2004. Influence of FIR irradiation on paddy moisture reduction and milling quality after fluidized bed drying. *Journal of Food Engineering*, 65: 293-301.
16. Midilli, A., and Kucuk, H. 2003. Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio. *Energy*, 28: 539-556.
17. Midilli, A. 2001. Determination of pistachio drying behaviour and conditions in a solar drying system. *International Journal of Energy Research*, 25:715-725.
18. Mokhtarian, M., Tavakolipour, H., and Kalbasi Ashtari, A. 2016. The Effect of Solar Drying Method in Air Recycle Mode Comparing with Traditional Method (Exposing to Direct Sunlight) on the Quality Properties of Pistachio Nut. *Iranian Journal of Nutrition Sciences and Food Technology*, 10 (4):93-102.
19. Mortezapour, H., Ghobadian, B., Minaei, S., and Khoshtaghaza, M.H. 2012. Saffron drying with a heat pump–assisted hybrid photovoltaic–thermal solar dryer. *Drying Technology*, 30:560-566.
20. Mousavi Bayegi, S.F., Farahmand, A., Taghizadeh, M., and Ziafoughi, M.A. 2016. Modeling on hot air and infrared thin layers drying of persimmon slices. *Iranian Journal Of Food Science and Technology*, 13(53):161-171. (In Persian with English abstract).
21. Nowak, D., and Lewicki, P.P. 2004. Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5: 353-360.
22. Pal, U., Khan, M., and Mohanty, S. 2008. Heat pump drying of green sweet pepper. *Drying Technology*, 26: 1584-1590.
23. Pathare, P.B., and Sharma, G., 2006. Effective moisture diffusivity of onion slices undergoing infrared convective drying. *Biosystems Engineering*, 93:285-291.
24. Ruiz Celma, A., Cuadros, F., and López-Rodríguez, F. 2009. Characterisation of industrial tomato by-products from infrared drying process. *Food and Bioprocess Processing*, 87: 282-291.
25. Ruiz Celma, A., Rojas, S., and Lopez-Rodriguez, F. 2008. Mathematical modelling of thin-layer infrared drying of wet olive husk. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47: 1810-1818.
26. Salehi, F., Kashaninejad, M., Mahoonak, A.R., and Ziaifar, A.M. 2016. Drying of Button Mushroom by Infrared-Hot Air System. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 13(59): 151-159. (In Persian with English abstract).
27. Sharma, G., Verma, R., and Pathare, P. 2005. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 71: 282-286.

28. Shi, J., Pan, Z., McHugh, T.H., Wood, D., Hirschberg, E., and Olson, D. 2008. Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating. *LWT-Food Science and Technology*, 41: 1962-1972.
29. Supmoon, N., and Noomhorm, A. 2013. Influence of combined hot air impingement and infrared drying on drying kinetics and physical properties of potato chips. *Drying Technology*, 31: 24-31.
30. Tavakolipour, H., and Mokhtarian, M. 2012. Neural network approaches for prediction of pistachio drying kinetics. *International Journal of Food Engineering*, 8(3). DOI: <https://doi.org/10.1515/1556-3758.2481>,
31. Tavakolipour, H. 2011. Drying kinetics of pistachio nuts (*Pistacia vera* L.). *World Applied Sciences Journal*, 12:1639-1646.
32. Tavakolipour, H., Kalbasi Ashtari, A., Bassiri, A.R. 2008. Effect of drying parameters on quality indicators of Damghan pistachio nuts (*Pistacia vera* L.) and determining effective diffusion coefficient in optimum conditions. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 5(4):47-56 (In Persian with English abstract).
33. Toğrul, H. 2006. Suitable drying model for infrared drying of carrot. *Journal of Food Engineering*, 77: 610-619.
34. Wang, J., and Sheng, K. 2006. Far-infrared and microwave drying of peach. *LWT-Food Science and Technology*, 39: 247-255.