مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران
سال دهم، شماره 4، زمستان 1394، صفحات 102-93

مقایسه تأثیر روش‌خشک کردن با کمک خشک‌کن خورشیدی در حالت بازگردش هوا با روش سنتی در معرض تابش مستقیم آفتاب بر روی خصوصیات کیفی پسته

محسن مختاریان[1]، حمید توکلی پور[2]، احمد کلباسی اشتری[3]

1- نویسنده مسئول: گروه علوم و صنایع غذایی، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران، پست الکترونیکی: mokhtarian.mo@gmail.com
2- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران
3- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه تهران، دانشکده کشاورزی، کرج، ایران

تاریخ دریافت: 94/2/15 تاریخ پذیرش: 94/5/16

چکیده

سابقه و هدف: پسته یکی از مهم‌ترین اقلام صادرات غیرنفتی کشورمان است. با توجه به اهمیت روش خشک‌کردن در حفظ خصوصیات کیفی محصولات تولیدشده از مغز پسته و همچنین بهره‌گیری از منابع انرژی تجدید پذیر، یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به سیستم بازگردش هوا طراحی و ساخته شد و نتایج آن با روش خشک‌کردن سنتی در معرض تابش مستقیم آفتاب مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها: پسته رقم کله قوچی به‌صورت روزانه از یکی از باغات شهرستان سبزوار جمع‌آوری گردید. به‌منظور ارزیابی خشک‌کن خورشیدی، عمل داده‌برداری به‌صورت روزانه از ساعت 9 صبح تا ساعت 15 بعد از ظهر انجام گردید. برخی خصوصیات کیفی محصول تولید نظیر چروکیدگی، میزان رطوبت، شاخص‌های رنگ و خصوصیات حسی پسته تولیدی مورد اندازه‌گیری و ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که روش خشک کردن خورشیدی پسته سبب کاهش 31/57 % در زمان خشک کردن نسبت به روش سنتی در معرض تابش آفتاب گردید. بررسی خصوصیات کیفی پسته تولیدی نشان داد که پسته‌های خشک شده به روش خورشیدی در حالت بازگردش هوا کمترین میزان چروکیدگی، میزان رطوبت و تغییرات رنگ را داشت. همچنین نتایج نشان داد که روش خشک کردن سنتی در معرض تابش مستقیم آفتاب از لحاظ برشته بودن، بیشترین امتیاز را داشت.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی با توجه به پتانسیل بالای ایران در زمینه انرژی خورشیدی، به‌کارگیری انرژی خورشیدی در خشک کردن محصولات کشاورزی به‌ویژه در زمینه خشک کردن پسته توصیه و تأکید می‌گردد.

واژگان کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، پسته، خصوصیات کیفی، ارزیابی حسی

• مقدمه

طبق آماری رسمی سازمان خوار و بار کشاورزی سازمان ملل متحد (FAO) در سال 2012 تولید پسته جهانی، 1005145 متریک تن (MT) گزارش گردید(1).

مهم‌ترین مرحله در فرآیند پس از برداشت پسته، خشک کردن محصول است. در صورتی که پسته از طریق پهن کردن در معرض آفتاب (Open sun drying) به‌صورت سنتی خشک گردد، زمان لازم جهت خشک شدن آن طولانی است، از طرفی حمله حشرات و پرندگان، همچنین گرد و غبار و ریزش باران در این روش از عواملی هستند که باعث کاهش کیفیت پسته خشک شده می‌گردند. خشک‌کن‌های صنعتی نیز به دلیل هزینه اولیه بالا و مصرف انرژی زیاد، مقرون به‌صرفه نبوده و مورد توجه باغداران و پایانه‌های ضبط پسته قرار نگرفته‌اند. انرژی مورد نیاز برای خشک کردن به روش صنعتی به‌طور معمول از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌گردد. به دلیل افزایش قیمت جهانی سوخت‌های فسیلی و تجمع گازهای گلخانه‌ای در جو و به دنبال آن افزایش دمای کره زمین و آلودگی‌های زیست‌محیطی آن‌ها، توجه زیادی به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان جایگزین یا مکمل برای سوخت‌های

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-17]

فسیلی شده است. در این راستا استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی به‌عنوان یک راه حل جدید مورد توجه قرار گرفته و به‌صورت فزاینده‌ای در حال رشد است. این نوع خشک‌کن در مقایسه با خشک‌کن‌های صنعتی دارای بازده انرژی قابل مقایسه بوده و در مناطقی که دارای ساعات تابش بالا در فصل برداشت پسته می‌باشند، به سادگی می‌تواند جانشین خشک کردن به روش سنتی و صنعتی گردد (2). خشک‌کن‌های خورشیدی بر اساس عبور هوای گرم شده در جمع‌کننده خورشیدی (Solar collector) از روی محصول فعالیت می‌کنند. Tavakolipour در مطالعه‌ای عملیات پس از برداشت پسته را مطالعه نمود. این محقق اظهار داشت که عملیات پس از برداشتِ پسته شامل حمل و نقل، حذف پوست سبز، خشک کردن، انبارکردن به‌صورت توده‌ای و بسته‌بندی می‌باشد. نتایج نشان داد که دمای هوا تأثیر چشمگیر روی زمان خشک کردن داشت و سرعت خشک کردن تأثیر معنی‌داری بر زمان خشک کردن نداشت (3). Tavakolipour و Mokhtarian روش شبکه عصبی مصنوعی را برای پیش‌بینی سینتیک خشک کردن پسته مطالعه نمودند. آنها فرآیند خشک کردن پسته را در دامنه‌ی دمایی 70-40 درجه سانتی‌گراد با سرعت جریان هوای 2 متر بر ثانیه انجام داده و منحنی خشک کردن پسته را با بهره‌گیری از مدل‌های خشک کردن تجربی برازش و سرانجام نتایج پیش‌بینی شده این مدل‌ها را با مدل شبکه عصبی مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که شبکه عصبی پرسپترون با تابع فعال‌سازی لگاریتم سیگموئیدی با 7 نرون در اولین و دومین لایه پنهان توانست نسبت رطوبت پسته را در هر زمان از خشک کردن با ضریب تبیین 0/994 پیش‌بینی نماید(4). Tavakolipour و همکاران اثر پارامترهای خشک کردن بر شاخص‌های کیفی پسته دامغان و تعیین ضرایب نفوذ مؤثر در شرایط بهینه این فرآیند را بررسی نمودند. آنها اثرات پارامترهای دما (40، 50، 60 و 70 درجه سانتی‌گراد) و سرعت جابجایی هوا (1 و 2 متر بر ثانیه) و همچنین ضخامت بستر (تک لایه، 3 و 5 سانتی‌متر) بر سرعت کاهش رطوبت و شاخص‌های کیفی فرآورده نهایی، شامل عدد پراکسید و درصد اسیدهای چرب آزاد روغن پسته با استفاده از خشک‌کن‌های آزمایشگاهی با جریان متقاطع بررسی و شرایط بهینه خشک کردن تعیین گردید(5). Gazor و Minaei تأثیر دما و سرعت هوا را روی زمان خشک کردن و پارامترهای کیفی پسته بررسی نمودند. نتایج نشان داد که افزایش دمای تا 90°C، زمان خشک کردن را تا 37% کاهش داد و منجر به تغییر طعم پسته شد. آزمون حسی طعم و مزه نشان داد که مصرف کنندگان پسته خشک شده در دمای 75°C را ترجیح می‌دهند. همچنین نتایج نشان داد که افزایش سرعت جریان هوا از 1/5 متر بر ثانیه به 2/5 متر بر ثانیه سبب کاهش زمان خشک کردن تا 10 درصد شد. تأثیر دما و سرعت جریان هوا روی پروتئین و مقدار چربی معنی‌دار نبود اما افزایش دمای خشک کردن تا 90°C سبب افزایش اندیس پراکسید به 0/55 meq/kg می‌شود که هنوز در محدوده قابل قبول برای پسته فرآوری شده می‌باشد (6). Midilli رفتار خشک کردن پسته پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده در یک سامانه خشک‌کن خورشیدی را مطالعه نمود. نتایج نشان داد که پسته‌های خشک شده در خشک‌کن خورشیدی با کمک جابجایی هوای اجباری در دمای 50°C، در مدت زمان 6 ساعت خشک شدند، در حالی که، نمونه‌های خشک شده در هوای آزاد (دمای 28°C)، رضایت بخش نبودند. این محقق دلیل عدم رضایت بخش بودن روش خشک کردن آفتابی را به دلیل طولانی بودن زمان خشک کردن، خاک، گرد و غبار و حشرات مضر اعلام نمودند (7).

هدف از این پژوهش، طراحی، ساخت و ارزیابی نوع جدیدی از خشک‌کن‌های خورشیدی مجهز به سامانه‌ی گردش هوای بسته جهت خشک کردن پسته و برازش منحنی خشک کردن پسته توسط مدل‌های تجربی می‌باشد.

• مواد و روش‌ها

آماده‌سازی ماده خام: پسته (*Pistacia Vera L.*) رقم کله قوچی که یکی از ارقام تجاری پسته کشور می‌باشد به‌عنوان ماده خام اولیه به‌صورت روزانه از یکی از باغات روستای کیذور (توابع بخش ششتمد، واقع در شهرستان سبزوار، استان خراسان رضوی) جمع‌آوری گردید. قبل از خشک کردن، پوست نرم پسته (پوست سبز) جدا و جهت جلوگیری از خشک شدن رطوبت سطحی، پسته‌ها به‌محض پوست شدن در ظرف پلاستیکی درب‌دار نگهداری و درب آن بسته شد. سپس پسته‌ها تا زمان شروع آزمایش در یخچال در دمای 3°C± نگهداری شدند.

طراحی و ساخت سامانه خورشیدی: خشک‌کن طراحی شده در این پژوهش شامل جمع‌کننده صفحه مسطح متخلخل، واحد خشک‌کن، فن سانتریفوژ (Centrifugal fan)، دریچه (Vent Damper) کنترل رطوبت نسبی، اتصالات و لوله‌های رابط، گرم‌کن الکتریکی کمکی (Ancillary electrical heater) و سامانه کنترل الکترونیکی می‌باشد. بخش‌های یاد

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-17]

شده در شکل 2 نمایش داده شده است. بدنه جمع‌کننده خورشیدی اولیه از جنس ورق گالوانیزه سفید به ضخامت 0/5 میلی‌متر، به‌صورت یک ناودانی با ابعاد مفید خارجی 1/98×1×0/22متر (به ترتیب طول، عرض و ارتفاع) طراحی و ساخته شد. جهت جلوگیری از اتلاف حرارتی، بدنه جمع‌کننده خورشیدی با پوششی از جنس پشم شیشه (با مشخصات ضریب هدایت حرارتی 0/038 (وات بر متر در درجه سانتی‌گراد) و چگالی 24 کیلوگرم بر متر مکعب) به ضخامت 3 سانتی‌متر عایق‌بندی گردید. سطح خارجی آن (سطح در معرض تابش خورشید) از یک لایه پوشش‌دهنده از جنس شیشه به ضخامت 4 میلی‌متر پوشانده شد. در حد فاصل بین کف جمع‌کننده و سطح شیشه، یک صفحه جاذب متخلخل از جنس ورق آلومینیوم به ضخامت 1/1 میلی‌متر، با شیب ملایم (تقریباً 4/5 درجه) از قسمت وروی هوا به جمع‌کننده به سمت خروجی هوا از جمع‌کننده نصب گردید و سطح بیرونی آن جهت بهبود جذب تابش خورشید توسط رنگ مشکی مات رنگ شد. در اثر تابش نور خورشید ورق آلومینیوم گرم و حرارت آن به هوایی که در مجاورت آن جریان داشت، منتقل شد. هوای گرم شده از طریق کانال‌های رابط به محفظه خشک‌کن منتقل گردید. قطر سوراخ‌های صفحه جاذب 2 میلی‌متر و فاصله سوراخ‌ها (گام) 1 سانتی‌متر بود. آرایش سوراخ‌ها در صفحات جاذب از نوع مربعی بود. جمع‌کننده خورشیدی ثانویه دقیقاً از لحاظ شکل ظاهری و عملکرد مشابه جمع‌کننده اولیه، ولی در ابعاد کوچکتر، طراحی و ساخته شد (ابعاد مفید خارجی 0/805×0/55×0/22متر (به ترتیب طول، عرض و ارتفاع) و ابعاد مفید داخلی 0/80×0/50×0/15متر (به ترتیب طول، عرض و ارتفاع)). شیب جمع‌کننده خورشیدی و نحوه قرارگیری آن از رابطه (1) تعیین گردید (9، 8):

$$\beta = (\Phi - \delta) = (\Phi - 23.45\sin\left[\frac{360}{365}(284+N)\right]) \qquad (1)$$

در این معادله، N تعداد روز (در 1 ژانویه N=1 و در 31 دسامبر N=365) می‌باشد. بدین ترتیب، برای دریافت حداکثر تابش خورشیدی، جمع‌کننده به‌صورت زاویه‌دار با شیب 40 درجه (با توجه به فصل برداشت پسته تعیین شد) رو به سمت جنوب قرار گرفت.

بدنه دستگاه از جنس ورق آهن سیاه با ضخامت 3 میلی‌متر، به‌صورت یک مکعب مربع با ابعاد مفید خارجی 1متر×1متر×1متر (به ترتیب طول، عرض و ارتفاع) که در دو انتها بالایی و پایینی به دو مخلوط ناقص متصل است، طراحی و ساخته شد. همچنین جداره داخلی دستگاه توسط ورق گالوانیزه سفید به ضخامت 0/6 میلی‌متر پوشش‌دهی شد. درون گرمخانه دو سینی مشبک به ابعاد 0/88×0/84×0/04 متر (به ترتیب طول، عرض و ارتفاع) تعبیه شد که پسته‌ها روی این سینی‌ها قرار گرفته و خشک شدند. جهت جلوگیری از اتلاف حرارتی، محفظه خشک‌کن با پشم شیشه عایق‌بندی گردید. جهت استفاده از دستگاه در ساعات ابری در طول روز و همچنین بهره‌برداری از واحد خشک‌کن در طول شب، در سیستم یک گرم‌کن الکتریکی کمکی پره‌دار 700 واتی نصب گردید. گرم‌کن الکتریکی در انتهای مسیر هوای ورودی به خشک‌کن نصب شد. این واحد از طریق یک کنتاکتور 9 آمپر به واحد کنترل الکترونیکی متصل و توسط برنامه کامپیوتری نوشته شده قابل کنترل بود. جریان هوا در داخل خشک‌کن از طریق فن سانتریفوژی نوع پروانه بسته (Hermetic impeller) و پره پس‌خور (Backward curved impeller) نصب شده روی دستگاه تأمین گردید. مشخصات فن سانتریفوژ مورد استفاده شامل: ولتاژ 220 ولت، فرکانس 50 هرتز، توان 1 اسب بخار و تک فاز، دور موتور 2800 دور در دقیقه، قطر و عرض پروانه به ترتیب 25 و 8/5 سانتیمتر و سرعت 36/63 متر بر ثانیه بود. به‌منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های ترمودینامیک (دما و رطوبت نسبی) خشک‌کن خورشیدی مورد پژوهش از ماژول دما و رطوبت AM2303 استفاده گردید. خصوصیات عملکردی (Performance characteristics) ماژول AM2303 شامل محدوده‌ی رطوبت نسبی 0/1% تا 99/9% با دقت متداول (Typical accuracy) ±2%RH و محدوده‌ی دمایی 125 تا -40 با دقت متداول ±0/3°C می‌باشد.



شکل 1. سامانه خشک‌کن خورشیدی فعال غیر مستقیم و اجزای آن

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-17]

روش اجرای آزمایش: آزمایشات مربوط به ارزیابی دستگاه، در محوطه‌ی آفتاب‌گیر در شهرستان سبزوار، انجام گرفت. محل مورد آزمایش دارای عرض جغرافیایی شمالی (Latitude °N) 36 درجه و 13 دقیقه، طول جغرافیایی (Longitude °E) 57 درجه و 37 دقیقه بود. عمل داده‌برداری به‌صورت روزانه از ساعت 9 صبح تا ساعت 15 بعد از ظهر از تاریخ 1393/06/27 شروع و تا 1393/06/31 پایان یافت. بعد از مستقر کردن دستگاه، حسگرها جهت ثبت دما و رطوبت نسبی در بخش‌های مختلف سامانه نصب گردید. محل نصب حسگرها در بخش‌های هوای ورودی و خروجی به جمع‌کننده اولیه و ثانویه و در ورودی و خروجی محفظه خشک‌کن و یک حسگر نیز بین دو سینی خشک‌کن نصب گردید. داده‌برداری در فواصل زمانی 30 ثانیه یک بار انجام گرفت. جهت تعیین شدت تابش خورشید از پیرانومتر (Theodor Friedrichs & Co, Typ 6006.0000, S/N 0408, Germany) نصب شده در ایستگاه هواشناسی این منطقه استفاده گردید. همچنین سرعت باد توسط بادسنج نصب شده در ایستگاه هواشناسی سبزوار تعیین گردید. حالت‌های مورد مطالعه به‌صورت زیر بود:

خشک کردن پسته به روش سنتی در معرض تابش خورشید (Open sun drying): در این روش 4 کیلوگرم پسته بر روی یک پارچه نخی به‌صورت تک لایه پهن و در معرض تابش خورشید قرار گرفته و تا رسیدن به وزن ثابت خشک شد. میانگین شدت تابش خورشید طی دوره خشک کردن طبق گزارشات ایستگاه هواشناسی منطقه 752/23 وات بر متر مربع گزارش شد.

خشک کردن پسته در دستگاه خشک‌کن خورشیدی فعال غیر مستقیم در حالت بازگردش هوا (With recycle): در این حالت 4 کیلوگرم پسته به‌صورت تک لایه در دو سینی دستگاه توزیع (در هر سینی 2 کیلوگرم) و درب دستگاه بسته و فرآیند خشک کردن آغاز گردید. برنامه رایانه‌ای دستگاه جهت کنترل دریچه در رطوبت نسبی کمتر یا مساوی 15 درصد تنظیم گردید (RH≤15). میانگین شدت تابش خورشید در این حالت خشک کردن، طبق گزارشات ایستگاه هواشناسی منطقه 745/49 وات بر متر مربع ثبت شد.

در کلیه روش‌های خشک کردن مورد مطالعه، فرآیند خشک کردن پسته تا رسیدن به رطوبت نهایی حدوداً کمتر از 5 درصد مطابق استاندارد ملی ایران به شماره 15 (پسته طبیعی خندان-ویژگی‌ها) ادامه یافت.

تعیین ویژگی‌های کیفی: محتوای رطوبت بر پایه‌تر به روش وزن‌سنجی مطابق دستورالعمل AOAC به شماره 967/21 از طریق آون‌گذاری در دمای 105°C به مدت 24 ساعت انجام گرفت (10). چروکیدگی پسته خشک شده به روش جابجایی سیال تولوئن تعیین شد (11).

$$S_a = \frac{V_i - V_f}{V_i} \times 100 \qquad (2)$$

در این معادله، S_a میزان چروکیدگی (درصد)، V_i حجم محصول تر قبل از خشک کردن (m^3) و V_f حجم محصول خشک بعد از خشک کردن (m^3) است.

به‌منظور اندازه‌گیری رنگ پسته خشک شده کامل و مغز پسته، از نرم افزار گرافیکی ایمیج جی (Image J) استفاده شد. جهت تأمین نور مورد نیاز برای عکس‌برداری از یک عدد لامپ فلورسنت 12 واتی (Master، ساخت چین) استفاده شد. بعد از تهیه عکس‌های مورد نیاز، عکس‌ها به کامپیوتر منتقل و در نرم‌افزار مربوطه جهت اندازه‌گیری رنگ، بارگذاری و سپس مقادیر L، a و b تعیین گردید(12). تغییرات کلی رنگ پسته خشک شده (ΔE) توسط رابطه زیر محاسبه شد.

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \qquad (3)$$

در این رابطه، مقادیر L_0، a_0 و b_0 مقادیر نمونه مرجع (یعنی نمونه پسته تازه) می‌باشند(13).

ارزیابی حسی: آزمون ارزیابی حسی به وسیله‌ی یک گروه ارزیاب حسی آموزش دیده متشکل از 5 نفر در محدوده سنی 20 تا 30 سال (مرد و زن) انجام گرفت. کلیه‌ی ارزیابی‌ها به روش امتیازبندی هدونیک (Hedonic) پنج نقطه‌ای (عدد 1 مربوط به نمونه با کمترین امتیاز حسی و عدد 5 مربوط به نمونه با بیشترین امتیاز حسی) صورت گرفت. بدین ترتیب که پرسشنامه‌هایی تهیه و بین تیم ارزیاب توزیع گردید. برای هر سؤال 5 گزینه به‌عنوان پاسخ در نظر گرفته شد. سؤالات مطرح شده عبارتند از: وضعیت ظاهری، میزان خندان بودن، سفتی بافت، ارزیابی بیرون آمدن مغز توسط انگشتان، شیرینی، برشته بودن، رنگ، پذیرش کلی.

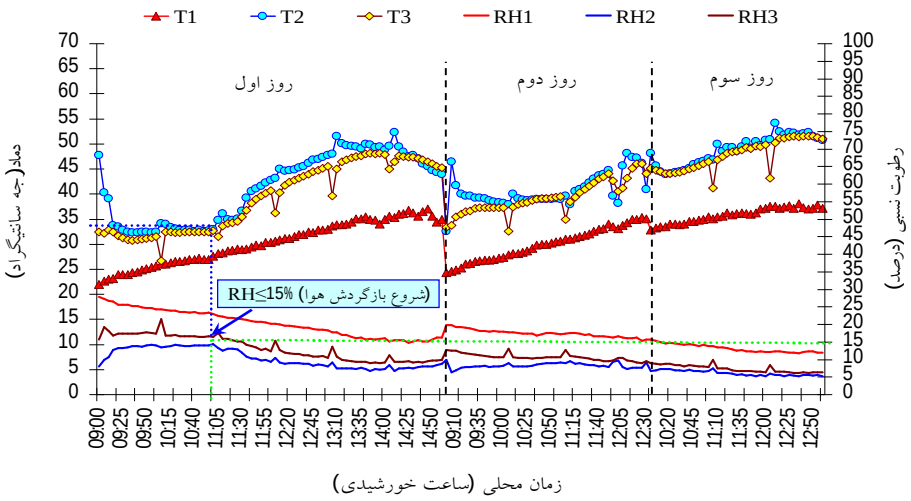
تجزیه و تحلیل آماری: در این بررسی از آزمون t جفت نشده برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شد. قبل از انجام آزمون، آزمودن برابری واریانس‌ها انجام و سپس نتایج گزارش شد (در صورت مساوی بودن واریانس‌ها آزمون تی جفت نشده به‌صورت واریانس برابر گزارش می‌شود). مقادیر p کمتر از 0/05 معنی‌دار در نظر گرفته شد. جهت آنالیز آماری از نرم‌افزار SAS نسخه 9.1.3 استفاده گردید. کلیه صفات کیفی به‌جز رطوبت در 5 تکرار انجام گردید (میزان رطوبت در 4 تکرار انجام شد).

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-17]

• یافته‌ها

تغییرات دما و رطوبت نسبی هوا: با استفاده از حسگرهای دما و رطوبت نسبی نصب شده در ورودی به جمع‌کننده خورشیدی (دمای هوای محیط)، خروجی از جمع‌کننده (ورودی به محفظه خشک‌کن) و خروجی از محفظه خشک‌کن، تغییرات دما و رطوبت نسبی هوا در دوره خشک کردن پسته کامل پایش گردید. حسگرهای نصب شده قادر به ثبت داده‌ها در هر 30 ثانیه بودند. با توجه به شکل 3 بیشترین افزایش دمای هوا بین ساعت 12:30 تا 14:30 ثبت گردید که این حالت نتیجه کمتر بودن زاویه سمت خورشید و بازتابش کمتر از سطح جمع‌کننده خورشیدی در طول این ساعت بود. در آزمایش‌ها حداکثر، حداقل و میانگین دمای هوای محیط در حالت‌های خشک کردن پسته به روش سنتی در آفتاب و خشک کردن خورشیدی در حالت بازگردش هوا (RH≤15%) به ترتیب 33/11، 19/91 و 28/89 درجه سانتی‌گراد و 38/10، 22/00 و 31/52 درجه سانتی‌گراد ثبت شد. حداکثر، حداقل و میانگین دمای هوای خروجی از جمع‌کننده خورشیدی اولیه و محفظه خشک‌کن در روش خشک کردن خورشیدی پسته به ترتیب 54/20، 32/30 و 42/99 درجه سانتی‌گراد و 51/60، 26/70 و 41/28 درجه سانتی‌گراد ثبت گردید. مقایسه میانگین دمای هوای ورودی به جمع‌کننده خورشیدی و هوای داخل محفظه خشک‌کن (ورودی به محفظه خشک‌کن) نشان داد که در روش خشک کردن خورشیدی پسته، صفحه جمع‌کننده خورشیدی قادر بود به‌طور میانگین دمای محیط را به میزان 11/47 درجه سانتی‌گراد افزایش دهد. لازم به توضیح است که در حالت خشک کردن پسته توسط خشک کن خورشیدی در حالت بازگردش هوا، تا زمانی که رطوبت نسبی هوای خروجی از محفظه خشک‌کن بالاتر از 15% بود، وضعیت دریچه در حالت باز بوده و هیچ بازگردش هوا صورت نگرفته (این حالت در مراحل اولیه‌ی خشک شدن به‌مراتب بیشتر از مراحل انتهایی است) و به‌محض کاهش رطوبت نسبی به کمتر از مقدار تعیین شده، دریچه با فرمان واحد کنترل الکترونیکی، بسته شده و بازگردش هوا آغاز می‌شود. این حالت در شکل 2 نشان داده شده است.

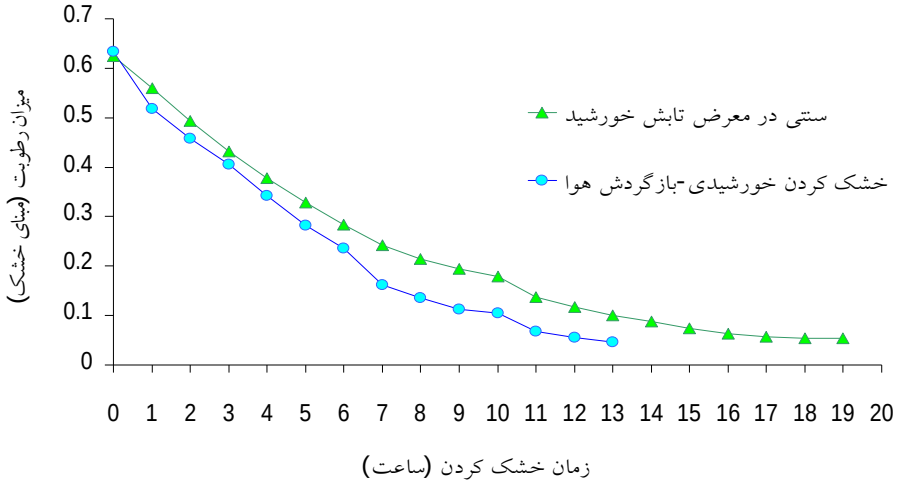
سینتیک خشک کردن: منحنی سینتیک خشک کردن پسته کامل در روش‌های مختلف فراورش در شکل 4 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در کلیه روش‌های خشک کردن، روند تغییرات میزان رطوبت پسته کامل بر حسب زمان خشک کردن نزولی است. بیشترین و کمترین زمان خشک کردن پسته کامل به ترتیب در روش‌های سنتی در معرض تابش مستقیم آفتاب (19 ساعت) و خشک کردن خورشیدی در حالت بازگردش هوا (13 ساعت) به دست آمد.



شکل 2. تغییرات دما و رطوبت نسبی هوا در روش خشک کردن خورشیدی پسته

T_1 دمای هوای ورودی به جمع‌کننده خورشیدی، T_2 دمای هوای خروجی از جمع‌کننده خورشیدی یا ورودی به محفظه خشک‌کن، T_3 دمای هوای خروجی از محفظه خشک‌کن، RH_1 رطوبت نسبی هوای ورودی به جمع‌کننده خورشیدی، RH_2 رطوبت نسبی هوای خروجی از جمع‌کننده خورشیدی و RH_3 رطوبت نسبی هوای خروجی از محفظه خشک‌کن.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-17]



شکل 3. تأثیر روش‌های مختلف خشک کردن روی سینتیک خشک کردن پسته کامل

ویژگی‌های کیفی: نتایج نشان داد که در روش‌های خشک کردن مورد بررسی بیشترین مقدار رطوبت در پسته‌های خشک شده با روش سنتی در معرض تابش مستقیم آفتاب مشاهده شد که اختلاف آماری معنی‌دار ($p<0/05$) با پسته‌های خشک شده با خشک‌کن خورشیدی در حالت بازگردش هوا ($RH\leq15\%$) نداشت (جدول 1). نتایج نشان داد که پسته‌های خشک شده به روش خورشیدی در حالت بازگردش هوا کمترین میزان چروکیدگی و پسته‌های خشک شده به روش سنتی در معرض تابش مستقیم آفتاب در رده بعدی قرار گرفت. اگرچه اختلاف آماری معنی‌دار بین آنها مشاهده نشد ($p>0/51$) (جدول 1). در مورد شاخص روشنایی (شاخص L)، بیشترین روشنایی در روش خشک کردن پسته به روش سنتی در معرض تابش مستقیم آفتاب مشاهده گردید که اختلاف آماری معنی‌دار با روش خورشیدی در حالت بازگردش هوا نداشت. همچنین نتایج نشان داد که بین میزان شاخص قرمزی (شاخص a) روش‌های مختلف خشک کردن پسته اختلاف معنی‌دار مشاهده شد و بیشترین میزان شاخص قرمز مربوط به روش سنتی خشک کردن در معرض تابش مستقیم آفتاب بود. از لحاظ شاخص زردی (شاخص b) اختلاف آماری معنی‌دار بین روش‌های مختلف خشک کردن پسته مشاهده گردید به‌طوری که بیشترین مقدار شاخص زردی در نمونه‌های خشک شده به روش خورشیدی در حالت بازگردش هوا مشاهده شد. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار تغییرات رنگ (ΔE) در روش سنتی خشک کردن پسته در آفتاب مشاهده شد که اختلاف آماری معنی‌دار با روش خشک کردن خورشیدی نداشت (جدول 1). تصاویر پسته خشک شده در روش‌های مختلف فراورش در شکل 5 نشان داده شده است.

جدول 1. مقایسه میانگین ویژگی‌های کیفی پسته تحت تأثیر روش مختلف خشک کردن

روش خشک کردن	خطای معیار ± میانگین					
	میزان رطوبت (% w.b)	چروکیدگی (درصد)	L	a	b	ΔE
روش 1	4/519±0/329	34/021±2/736	59/97±0/496	1/697±0/057	2/468±0/112	2/409±0/493
روش 2	4/146±0/140	31/717±1/997	59/90±0/389	1/071±0/092	2/824±0/076	2/342±0/398
مقادیر P *	0/3374 n.s	0/5155 n.s	0/9137 n.s	0/0004 **	0/0308 **	0/9177 n.s

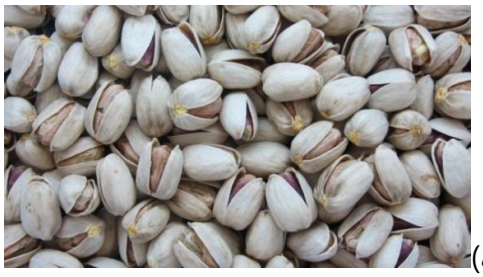
روش 1: سنتی در معرض تابش مستقیم آفتاب و روش 2: خشک‌کن خورشیدی در حالت بازگردش هوا ($RH\leq15\%$).

L: شاخص روشنایی، a: شاخص قرمزی، b: شاخص زردی و ΔE: تغییرات کلی رنگ.

*مقادیر P، نتایج به دست آمده از آزمون t جفت نشده به‌صورت واریانس برابر می‌باشد (با توجه به مساوی بودن واریانس‌ها آزمون t جفت نشده به‌صورت واریانس برابر در نتایج گزارش شد).

**معنی‌دار در سطح احتمال 95%، n.s غیرمعنی‌دار.

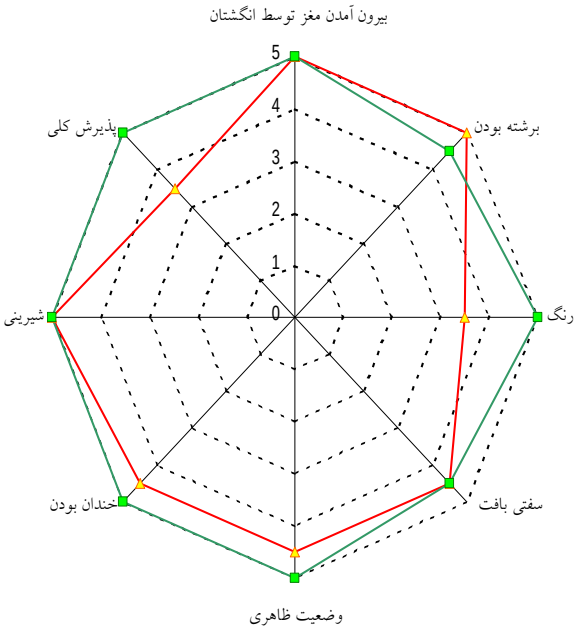
[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-17]


(الف)


(ب)

شکل 4. تصاویر پسته، (الف) خشک کردن در سامانه خشک‌کن خورشیدی در حالت بازگردش هوا و (ب) خشک کردن به روش سنتی در معرض آفتاب

نتایج ارزیابی حسی پسته خشک شده در نمودار رادار (Radar chart) شکل 5 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، روش خشک کردن سنتی در معرض تابش مستقیم آفتاب از لحاظ برشته بودن، بیشترین امتیاز را داشت، در حالی که از لحاظ رنگ، پذیرش کلی، وضعیت ظاهری و خندان بودن امتیاز آماری کمتری نسبت به روش خشک کردن خورشیدی پسته داشت. همچنین نتایج نشان داد که پسته‌های خشک شده به‌صورت سنتی و خورشیدی از لحاظ شاخص‌های حسی بیرون آمدن مغز توسط انگشتان، سفتی بافت و شیرینی اختلاف آماری معنی‌دار با یکدیگر نداشتند (شکل 5).



شکل 5. ارزیابی حسی پسته خشک در روش‌های مختلف خشک کردن Δ، سنتی در معرض تابش آفتاب و □، خشک کردن خورشیدی در حالت بازگردش هوا (شاخص آماری ترسیم نمودار رادار، میانگین است)

• بحث

در خصوص تغییرات دما و رطوبت نسبی هوا در خشک‌کن‌های خورشیدی، پژوهش‌های بسیاری در مورد محصولات کشاورزی مختلف صورت گرفته است که در ادامه به برخی از این پژوهش‌های اشاره می‌گردد. Elkhadraoui و همکاران یک نوع خشک‌کن خورشیدی گلخانه‌ای حالت مختلط را برای خشک کردن فلفل قرمز و انگور در سپتامبر 2013 مورد مطالعه قرار دادند. آنها دمای هوای محیط را در دامنه 21/25-35/71 درجه سانتی‌گراد ثبت نمودند. دمای هوای خشک کردن در خروجی جمع‌کننده خورشیدی و درون گلخانه به ترتیب در دامنه 27/87-54/68 درجه سانتی‌گراد و 29/21-49/88 درجه سانتی‌گراد ثبت شد(14). Fudholi و همکاران تحلیل عملکرد سامانه خشک‌کن خورشیدی برای فلفل چیلی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج ثبت داده‌های آنها نشان داد که مقادیر میانگین دما و رطوبت نسبی هوای محفظه خشک‌کن در دامنه 55-28 درجه سانتی‌گراد و 74-18 درصد متغیر بود(15). Montero و همکاران طراحی، ساخت و ارزیابی یک خشک‌کن خورشیدی جهت خشک کردن محصولات جانبی کشاورزی را مورد مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که در حالت خشک کردن جابجایی طبیعی (غیر فعال) و مختلط، افزایش بیش از 15°C و کاهش بیش از 27% در رطوبت نسبی در هوای خروجی از جمع‌کننده نسبت به هوای محیط حاصل شد، در حالی که، در حالت خشک کردن جابجایی طبیعی و غیر مستقیم، افزایش بیش از 6°C و کاهش بیش از 8% در رطوبت نسبی در هوای خروجی از جمع‌کننده نسبت به هوای محیط حاصل شد. از طرف دیگر

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-17]

در حالت خشک کردن جابجایی اجباری، افزایش بیش از 5°C و کاهش بیش از 10% در رطوبت نسبی در هوای خروجی از جمع‌کننده نسبت به هوای محیط حاصل شد(16). Midilli رفتار خشک کردن پسته در یک خشک‌کن خورشیدی جابجایی اجباری را مطالعه نمود. نتایج نشان داد که دمای هوای خشک کردن و دمای محیط به ترتیب در دامنه 50°C و 32-21 درجه سانتی‌گراد ثبت گردید (7).

نتایج پژوهش حاضر نشان داد، بیشترین و کمترین زمان خشک کردن پسته کامل به ترتیب در روش‌های سنتی در معرض تابش مستقیم آفتاب (19 ساعت) و خشک کردن خورشیدی در حالت بازگردش هوا (13 ساعت) مشاهده شد. Tavakolipour مدت زمان لازم برای خشک کردن پسته رقم کرمانی به‌صورت تک لایه در دمای 50°C و سرعت جریان هوای 1 متر بر ثانیه را 275 دقیقه گزارش نمود(3). Kouchakzadeh تأثیر انرژی خورشیدی و صوتی را روی فرآیند خشک کردن پسته مطالعه نمودند. آنها گزارش نمودند که استفاده از انرژی صوتی توانست زمان خشک کردن پسته را تا 4 ساعت کاهش دهد(17). Midilli و Kucuk خشک کردن لایه‌ای نازک پسته را توسط خشک‌کن خورشیدی مورد مطالعه قرار دادند. آنها زمان خشک کردن پسته کامل را 6 ساعت گزارش نمودند (میزان رطوبت اولیه پسته کامل 26/95 درصد در مبنای مرطوب تعیین شد)(18). Gazor و Minaei در پژوهش خود زمان خشک کردن پسته رقم کله قوچی در دمای 60°C را 350 دقیقه گزارش نمودند (میزان رطوبت اولیه پسته در دامنه 36/30-38/27 درصد در مبنای مرطوب تعیین شد) (6). Kashaninejad و همکاران مدت زمان لازم برای خشک کردن پسته رقم اوحدی در دمای 55°C را 670 دقیقه گزارش نمودند (میزان رطوبت اولیه پسته در دامنه 37/00-36/00 درصد در مبنای مرطوب تعیین شد)(19).

نتایج نشان داد که کمترین میزان رطوبت در روش خشک کردن خورشیدی در حالت بازگردش هوا مشاهده شد. این حالت به دلیل بیشتر بودن تنش حرارتی ایجاد شده نسبت به حالت سنتی خشک کردن و خروج سریع‌تر آب از محصول و کاهش رطوبت آن می‌باشد. همچنین در روش سنتی خشک کردن پسته به دلیل طولانی بودن زمان خشک شدن، بیشترین میزان چروکیدگی و در پسته‌های خشک شده به روش خورشیدی به دلیل ایجاد تنش حرارتی و کاهش زمان خشک کردن، کمترین میزان چروکیدگی اندازه‌گیری شد.

• References

1. FAO. FaoStat Database. Available from http://faostat.fao.org; 2012.
2. Pangavhane DR, Sawhney RL, Sarsavadia PN. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. Energy 2002; 27(6): 579-590.
3. Tavakolipour H. Postharvest operations of pistachio nuts. J Food Sci Technol 2013; 52(2): 1124-1130.
4. Tavakolipour H, Mokhtarian M. Neural network approaches for prediction of pistachio drying kinetics. Int J Food Eng 2012; 8(3): Article 42.
5. Tavakolipour H, Kalbasi Ashtari A, Bassiri AR. Effect of drying parameters on quality indicators of Damghan pistachio nuts (Pistacia vera L.) and determining effective diffusion coefficient in optimum conditions. J Food Sci Technol 2008; 5(4): 47-56 [in Persian].
6. Gazor HR, Minaei S. Influence of temperature and air velocity on drying time and quality parameters of pistachio (Pistacia vera L.). Drying Technol 2005; 23: 2463-2475.
7. Midilli A. Determination of pistachio drying behaviour and conditions in a solar drying system. Int J Energ Res 2001; 25: 715-725.
8. Brenndorfer B, Kennedy L, Oswin Bateman CO, Trim DS, Mrema GC, Wereko-Brobby C. Solar dryers their role in post-harvest processing. Marlborough House, Pall Mall, London SW1Y 5HX, pp. 49.
9. Duffie JA, Beckman WA. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons, New York 1991; 918p.
10. AOAC. Official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemists, 17thedn. AOAC Press; Arlington; 1990.
11. Kaveh M, Amiri Chayjan R. Prediction of some physical and drying properties of terebinth fruit (pistacia atlantica L.) using artificial neural networks. ACTA Scientiarum Polonorum, Technologia Alimentaria 2014; 13(1): 65-78.
12. Fernandez L, Castillero C, Aguilera JM. An application of image analysis to dehydration of apple discs. J Food Eng 2005; 67: 185-193.
13. Yam KL, Papadakis SE. Asimple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. J Food Eng 2004; 61: 137-142.
14. Elkhadraoui A, Kooli S, Hamdi I, Farhat A. Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape. Renew Energ 2015; 77: 1-8.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-17]

15. Fudholi A, Sopian K, Yazdi MH, Ruslan MH, Gabbasa M, Kazem HA. Performance analysis of solar drying system for red chili. Sol Energ 2014; 99: 47-54.

16. Montero I, Blanco J, Miranda T, Rojas S, Celma AR. Design, construction and performance testing of a solar dryer for agro industrial by-products. Energ Convers Manage 2010; 51: 1510-1521.

17. Kouchakzadeh A. The effect of acoustic and solar energy on drying process of pistachios. Energ Conver Manage 2013; 67: 351-356.

18. Midilli A, Kucuk H. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. Energ Conver Manage 2003; 44: 1111-1122.

19. Kashaninejad M, Mortazavi A, Safekordi A, Tabil LG. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. J Food Eng 2007; 78: 98-108.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-17]

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

Mokhtarian M[1], Tavakolipour H[2], Ahmad Kalbasi Ashtari[3]*

*1- * Corresponding author: Department of Food Science and Technology, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran. Email: mokhtarian.mo@gmail.com*

2- Associate Prof, Department of Food Science and Technology, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran

3- Associate Prof, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Technology and Engineering, Tehran University, Karaj, Iran

Received 5 May, 2015 **Accepted 7 Aug, 2015**

Background and Objectives: Pistachio nut is one of the main Iranian non-oil exporting goods. Due to the importance of drying method to prevent of the quality properties of product from pistachio kernel and also utilizing renewable sources of energy, a solar dryer equipped with air recycle system was designed and fabricated, and its results were compared with traditional drying method (exposing to direct sunlight).

Materials and Methods: Fresh Kalle-Ghuchi variety whole Pistachio was purchased daily from one of the gardens of Sabzevar County. To test the solar dryer, daily data recording was conducted from 9:00 AM to 15:00 PM. Some quality properties of dried pistachio such as shrinkage, moisture content, color indexes and sensory attribute were measured and evaluated.

Results: The results indicated that the solar drying method reduced the drying time by 31.57% compared to the traditional method. Investigation of quality properties showed that solar dried pistachio nut in air recycle mode had the lowest shrinkage, moisture content and color change. Also the results illustrated that the traditional method had the highest score in roasting index.

Conclusion: Overall, according to Iran's high potential of solar energy, using it for drying agriculture crops, especially pistachio nut, is recommended and emphasized.

Keywords: Renewable energy, Pistachio nut, Quality properties, Sensory evaluation

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-17]