

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

محسن مختاریان¹، حمید توکلی پور²، احمد کلباسی اشتری³

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 مهم ترین اقلام صادرات غیرنفتی کشورمان است. با توجه به اهمیت روش خشک کردن در حفظ خصوصیات کیفی محصولات تولیدشده از مغز پسته و همچنین بهره گیری از منابع انرژی تجدید پذیر، یک خشک کن خورشیدی مجهز به سیستم بازگردش هوا طراحی و ساخته شد و نتایج آن با روش خشک کردن سنتی در معرض تابش مستقیم آفتاب مقایسه گردید.

مواد و روش ها: پسته رقم کله قوچی به صورت روزانه از یکی از باغات شهرستان سبزوار جمع آوری گردید. به منظور ارزیابی خشک کن خورشیدی، عمل داده برداری به صورت روزانه از ساعت 9 صبح تا ساعت 15 بعد از ظهر انجام گردید. برخی خصوصیات کیفی محصول تولید نظیر چروکیدگی، میزان رطوبت، شاخص های رنگ و خصوصیات حسی پسته تولیدی مورد اندازه گیری و ارزیابی قرار گرفت.

یافته ها: 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 پسته های 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.

نتیجه گیری: به طور کلی با توجه به پتانسیل بالای ایران در زمینه انرژی خورشیدی، به کارگیری انرژی خورشیدی در خشک کردن محصولات کشاورزی به ویژه در زمینه خشک کردن پسته توصیه و تأکید می گردد.

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

• مقدمه

خشک شده می گردند. خشک کن های صنعتی نیز به دلیل هزینه اولیه بالا و مصرف انرژی زیاد، مقرون به صرفه نبوده و مورد توجه باغداران و پایانه های ضبط پسته قرار نگرفته اند. انرژی مورد نیاز برای خشک کردن به روش صنعتی به طور معمول از سوخت های فسیلی تأمین می گردد. به دلیل افزایش قیمت جهانی سوخت های فسیلی و تجمع گازهای گلخانه ای در جو و به دنبال آن افزایش دمای کره زمین و آلودگی های زیست محیطی آنها، توجه زیادی به استفاده از انرژی های تجدیدپذیر به عنوان جایگزین یا مکمل برای سوخت های

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). مهم ترین 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) به صورت 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

پسته شد. آزمون حسی طعم و مزه نشان داد که مصرف کنندگان پسته خشک شده در دمای 75°C را ترجیح می دهند. 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 معنی دار نبود اما افزایش دمای خشک کردن تا 90°C سبب افزایش اندیس پراکسید به $0/55 \text{ meq/kg}$ می شود که هنوز در محدوده قابل قبول برای پسته فرآوری شده می باشد (6). Midilli رفتار خشک کردن پسته پوست گیری شده و پوست گیری نشده در یک سامانه خشک کن خورشیدی را مطالعه نمود. نتایج نشان داد که پسته های خشک شده در خشک کن خورشیدی با کمک جابجایی هوای اجباری در دمای 50°C در مدت زمان 6 ساعت خشک شدند. در حالی که، نمونه های 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 خشک کن های خورشیدی مجهز به سامانه ای گردش هوای بسته جهت خشک کردن پسته و برازش منحنی خشک کردن پسته توسط مدل های تجربی می باشد.

• مواد و روش ها

آماده سازی ماده خام: پسته (*Pistacia Vera L.*) رقم کله قوچی که یکی از ارقام تجاری پسته کشور می باشد به عنوان ماده خام اولیه به صورت روزانه از یکی از باغات روستای کینور (توابع بخش ششتمد، واقع در شهرستان سبزوار، استان خراسان رضوی) جمع آوری گردید. قبل از خشک کردن، پوست نرم پسته (پوست سبز) جدا و جهت جلوگیری از خشک شدن رطوبت سطحی، پسته ها به محض پوست شدن در ظرف پلاستیکی درب دار نگهداری و درب آن بسته شد. سپس پسته ها تا زمان شروع آزمایش در یخچال در دمای $\pm 3^{\circ}\text{C}$ نگهداری شدند.

طراحی و ساخت سامانه خورشیدی: خشک کن طراحی شده در این پژوهش شامل جمع کننده صفحه مسطح متخلخل، واحد خشک کن، فن سانتریفوژ (Centrifugal fan)، دریچه (Vent Damper) کنترل رطوبت نسبی، اتصالات و لوله های رابط، گرم کن الکتریکی کمکی (Ancillary electrical heater) و سامانه کنترل الکترونیکی می باشد. بخش های یاد

فیسلی شده است. در این راستا استفاده از خشک کن های خورشیدی به عنوان یک راه حل جدید مورد توجه قرار گرفته و به صورت فزاینده ای در حال رشد است. این نوع خشک کن در مقایسه با خشک کن های صنعتی دارای بازده انرژی قابل مقایسه بوده و در مناطقی که دارای ساعات تابش بالا در فصل برداشت پسته می باشند، به سادگی می تواند جانشین خشک کردن به روش سنتی و صنعتی گردد (2). خشک کن های خورشیدی بر اساس عبور هوای گرم شده در جمع کننده خورشیدی (Solar collector) از روی محصول فعالیت می کنند. Tavakolipour در مطالعه ای عملیات پس از برداشت پسته را مطالعه نمود. این محقق اظهار داشت که عملیات پس از برداشت پسته شامل حمل و نقل، حذف پوست سبز، خشک کردن، انبار کردن به صورت توده ای و بسته بندی می باشد. نتایج نشان داد که دمای هوا تأثیر چشمگیر روی زمان خشک کردن داشت و سرعت خشک کردن تأثیر معنی داری بر زمان خشک کردن نداشت (3). Tavakolipour و Mokhtarian روش شبکه عصبی مصنوعی را برای پیش بینی سینتیک خشک کردن پسته مطالعه نمودند. آنها فرآیند خشک کردن پسته را در دامنه دمای 40-70 درجه سانتی گراد با سرعت جریان هوای 2 متر بر ثانیه انجام داده و منحنی خشک کردن پسته را با بهره گیری از مدل های خشک کردن تجربی برازش و سرانجام نتایج پیش بینی شده این مدل ها را با مدل شبکه عصبی مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که شبکه عصبی پرسپترون با تابع فعال سازی 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 پیش بینی نماید (4). Tavakolipour و همکاران اثر پارامترهای خشک کردن بر شاخص های 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 سانتی گراد) و سرعت جابجایی هوا (1 و 2 متر بر ثانیه) و همچنین ضخامت بستر (تک لایه، 3 و 5 سانتی متر) بر سرعت کاهش رطوبت و شاخص های کیفی فرآورده نهایی، شامل عدد پراکسید و درصد اسیدهای چرب آزاد روغن پسته با استفاده از خشک کن های آزمایشگاهی با جریان متقاطع بررسی و شرایط بهینه خشک کردن تعیین گردید (5). Minaei و Gazor 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

و ساخته شد. همچنین جداره داخلی دستگاه توسط ورق گالوانیزه سفید به ضخامت 0/6 میلی متر پوشش دهی شد. درون گرمخانه دو سینی مشبک به ابعاد 0/04×0/84×0/88 متر (به ترتیب طول، عرض و ارتفاع) تعبیه شد که پسته ها روی این سینی ها قرار گرفته و خشک شدند. جهت جلوگیری از اتلاف حرارتی، محفظه خشک کن با پشم شیشه عایق بندی گردید. جهت استفاده از دستگاه در ساعات ابری در طول روز و همچنین بهره برداری از واحد خشک کن در طول شب، در سیستم یک گرم کن الکتریکی کمکی پره دار 700 وات نصب گردید. گرم کن الکتریکی در انتهای مسیر هوای ورودی به خشک کن 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 خشک کن از طریق فن سانتریفوژی نوع پروانه بسته (Hermetic impeller) و پره پس خور (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. به منظور اندازه گیری ویژگی های ترمودینامیک (دما و رطوبت نسبی) خشک کن خورشیدی مورد پژوهش از مازول دما و رطوبت AM2303 استفاده گردید. خصوصیات عملکردی (Performance characteristics) مازول AM2303 شامل محدوده ی رطوبت نسبی 0/1% تا 99/9% با دقت متداول (Typical accuracy) $\pm 2\%RH$ و محدوده ی دمایی 125 تا -40 با دقت متداول $\pm 0/3^{\circ}C$ می باشد.



شکل 1. سامانه خشک کن خورشیدی فعال غیر مستقیم و اجزای آن

شده در شکل 2 نمایش داده شده است. بدنه جمع کننده خورشیدی اولیه از جنس ورق گالوانیزه سفید به ضخامت 0/5 میلی متر، به صورت یک ناودانی با ابعاد مفید خارجی 0/22×1×1/98 متر (به ترتیب طول، عرض و ارتفاع) طراحی و ساخته شد. جهت جلوگیری از اتلاف حرارتی، بدنه جمع کننده خورشیدی با پوششی از جنس پشم شیشه (با مشخصات ضریب هدایت حرارتی 0/038 وات بر متر در درجه سانتی گراد) و چگالی 24 کیلوگرم بر متر مکعب) به ضخامت 3 سانتی متر عایق بندی گردید. سطح خارجی آن (سطح در معرض تابش خورشید) از یک لایه پوشش دهنده از جنس شیشه به ضخامت 4 میلی متر پوشانده شد. در حد فاصل بین کف جمع کننده و سطح شیشه، یک صفحه جاذب متخلخل از جنس ورق آلومینیوم به ضخامت 1/1 میلی متر، با شیب ملایم (تقریباً 4/5 درجه) از قسمت ورودی هوا به جمع کننده به سمت خروجی هوا از جمع کننده 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 کانال های رابط به محفظه خشک کن منتقل گردید. قطر سوراخ های صفحه جاذب 2 میلی متر و فاصله سوراخ ها (گام) 1 سانتی متر بود. آرایش سوراخ ها در صفحات جاذب از نوع مربعی بود. جمع کننده خورشیدی ثانویه دقیقاً از لحاظ شکل ظاهری و عملکرد مشابه جمع کننده اولیه، ولی در ابعاد کوچکتر، طراحی و ساخته شد (ابعاد مفید خارجی 0/22×0/55×0/805 متر (به ترتیب طول، عرض و ارتفاع) و ابعاد مفید داخلی 0/15×0/50×0/80 متر (به ترتیب طول، عرض و ارتفاع)). شیب جمع کننده خورشیدی و نحوه قرارگیری آن از رابطه (1) تعیین گردید (9، 8):

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

در این معادله، N تعداد روز (در 1 ژانویه N=1 و در 31 دسامبر N=365) می باشد. بدین ترتیب، برای دریافت حداکثر تابش خورشیدی، جمع کننده به صورت زاویه دار 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 میلی متر، به صورت یک مکعب مربع با ابعاد مفید خارجی 1 متر×1 متر×1 متر (به ترتیب طول، عرض و ارتفاع) که در دو انتها بالایی و پایینی به دو مخلوط ناقص متصل است، طراحی

طریق آون گذاری در دمای 105°C به مدت 24 ساعت انجام گرفت (10). چروکیدگی پسته خشک شده به روش جابجایی سیال تولون تعیین شد (11).

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

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.

به منظور اندازه گیری رنگ پسته خشک شده کامل و مغز پسته، از نرم افزار گرافیکی ایمج جی (Image J) استفاده شد. جهت تأمین نور مورد نیاز برای عکس برداری از یک عدد لامپ فلورسنت 12 وات (Master، ساخت چین) استفاده شد. بعد از تهیه عکس های مورد نیاز، عکس ها به کامپیوتر منتقل و در نرم افزار مربوطه جهت اندازه گیری رنگ، بارگذاری و سپس مقادیر L ، a و b تعیین گردید (12). تغییرات کلی رنگ پسته خشک شده (ΔE) توسط رابطه زیر محاسبه شد.

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

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

ارزیابی حسی: آزمون ارزیابی حسی به وسیله ی یک گروه ارزیاب حسی آموزش دیده متشکل از 5 نفر در محدوده سنی 20 تا 30 سال (مرد و زن) انجام گرفت. کلیه ی ارزیابی ها به روش امتیازبندی هدونیک (Hedonic) پنج نقطه ای (عدد 1 مربوط به نمونه با کمترین امتیاز حسی و عدد 5 مربوط به نمونه با بیشترین امتیاز حسی) صورت گرفت. بدین ترتیب که پرسشنامه هایی تهیه و بین تیم ارزیاب توزیع گردید. برای هر سؤال 5 گزینه به عنوان 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 داده ها استفاده شد. قبل از انجام آزمون، آزمودن برابری واریانس ها انجام و سپس نتایج گزارش شد (در صورت مساوی بودن واریانس ها آزمون تی جفت نشده به صورت واریانس برابر گزارش می شود). مقادیر p کمتر از 0/05 معنی دار در نظر گرفته شد. جهت آنالیز آماری از نرم افزار SAS نسخه 9.1.3 استفاده گردید. کلیه صفات کیفی به جز رطوبت در 5 تکرار انجام گردید (میزان رطوبت در 4 تکرار انجام شد).

روش اجرای آزمایش: آزمایشات مربوط به ارزیابی دستگاه، در محوطه ی آفتاب گیر در شهرستان سبزوار، انجام گرفت. محل مورد آزمایش دارای عرض جغرافیایی شمالی (Latitude $^{\circ}\text{N}$) 36 درجه و 13 دقیقه، طول جغرافیایی (Longitude $^{\circ}\text{E}$) 57 درجه و 37 دقیقه بود. عمل داده برداری به صورت 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 بخش های مختلف سامانه نصب گردید. محل نصب حسگرها در بخش های هوای ورودی و خروجی به جمع کننده اولیه و ثانویه و در ورودی و خروجی محفظه خشک کن و یک حسگر نیز بین دو سینی خشک کن نصب گردید. داده برداری 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. حالت های مورد مطالعه به صورت 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 به صورت 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 خشک کن خورشیدی فعال غیر مستقیم در حالت بازگردش هوا (With recycle): در این حالت 4 کیلوگرم پسته به صورت تک لایه در دو سینی دستگاه توزیع (در هر سینی 2 کیلوگرم) و در دستگاه بسته و فرآیند خشک کردن آغاز گردید. برنامه رایانه ای دستگاه جهت کنترل دریچه در رطوبت نسبی کمتر یا مساوی 15 درصد تنظیم گردید ($RH \leq 15$). میانگین شدت تابش خورشید در این حالت خشک کردن، طبق گزارشات ایستگاه هواشناسی منطقه 745/49 وات بر متر مربع ثبت شد. در کلیه روش های 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-ویژگی ها) ادامه یافت.

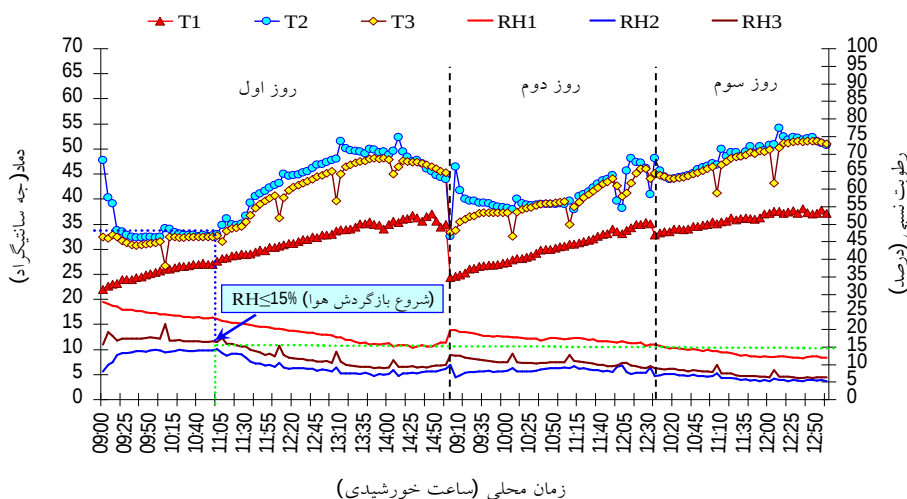
تعیین ویژگی های کیفی: محتوای رطوبت بر پایه تر به روش وزن سنجی مطابق دستورالعمل AOAC به شماره 967/21 از

• یافته‌ها

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 خشک‌کن خورشیدی در حالت بازگردش هوا، تا زمانی که رطوبت نسبی هوای خروجی از محفظه خشک‌کن بالاتر از 15% بود، وضعیت درجه 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، درجه با فرمان واحد کنترل الکترونیکی، بسته شده و بازگردش هوا آغاز می‌شود. این حالت در شکل 2 نشان داده شده است.

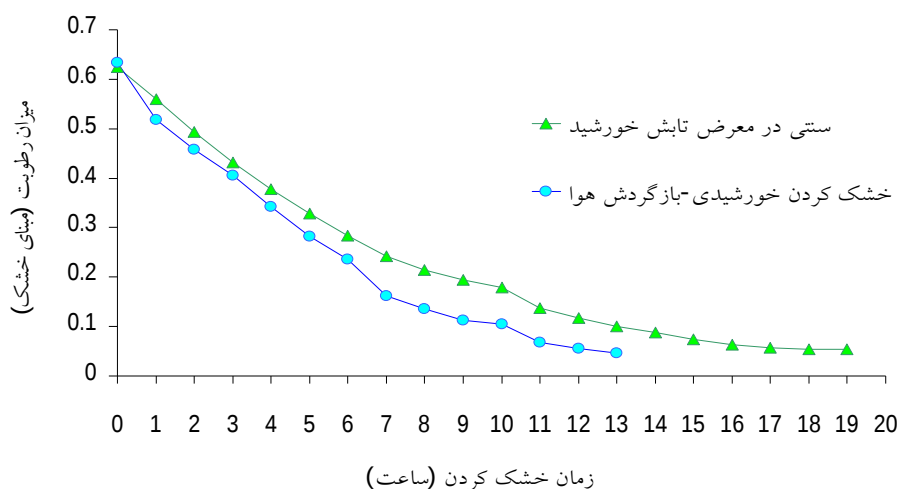
سینتیک خشک کردن: منحنی سینتیک خشک کردن پسته کامل در روش‌های مختلف فراورش در شکل 4 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در کلیه روش‌های خشک کردن، روند تغییرات میزان رطوبت پسته کامل بر حسب زمان خشک کردن نزولی است. بیشترین و کمترین زمان خشک کردن پسته کامل به ترتیب در روش‌های سنتی در معرض تابش مستقیم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

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 ($RH \leq 15\%$) 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



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

T₁ دمای هوای ورودی به جمع‌کننده خورشیدی، T₂ دمای هوای خروجی از جمع‌کننده خورشیدی یا ورودی به محفظه خشک‌کن، T₃ دمای هوای خروجی از محفظه خشک‌کن، RH₁ رطوبت نسبی هوای ورودی به جمع‌کننده خورشیدی، RH₂ رطوبت نسبی هوای خروجی از جمع‌کننده خورشیدی و RH₃ رطوبت نسبی هوای خروجی از محفظه خشک‌کن.



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

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 به طوری 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.

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 ($RH \leq 15\%$) 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

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

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

روش 1: سنتی در معرض تابش مستقیم آفتاب و روش 2: خشک‌کن خورشیدی در حالت بازگردش هوا ($RH \leq 15\%$).

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 به صورت واریانس برابر می‌باشد (با توجه به مساوی بودن واریانس‌ها آزمون t جفت نشده به صورت واریانس برابر در نتایج گزارش شد).

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



(ب)



(الف)

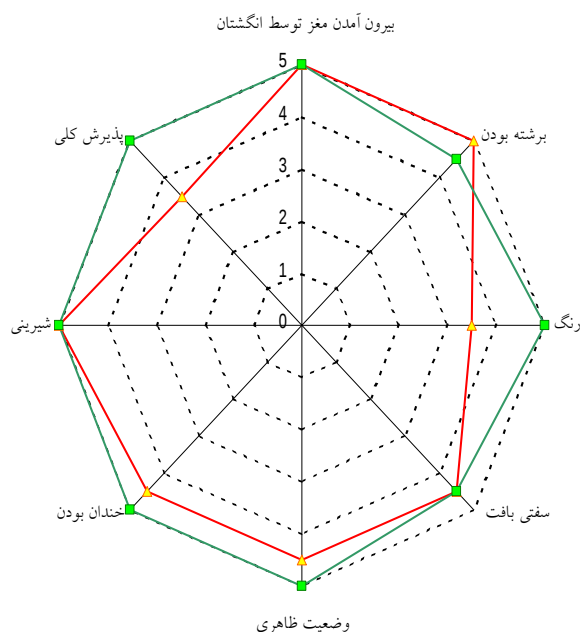
شکل 4. تصاویر پسته، (الف) خشک کردن در سامانه خشک‌کن خورشیدی در حالت بازگردش هوا و (ب) خشک کردن به روش سنتی در معرض آفتاب

شکل 5. ارزیابی حسی پسته خشک در روش‌های مختلف خشک کردن Δ ، سنتی در معرض تابش آفتاب و $\square$ ، 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 28-55 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

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 شاخص‌های حسی بیرون آمدن مغز توسط انگشتان، سفتی بافت و شیرینی اختلاف آماری معنی‌دار با یکدیگر نداشتند (شکل 5).



ساعت گزارش نمودند (میزان رطوبت اولیه پسته کامل 26/95 درصد در مبنای مرطوب تعیین شد) (18). Minaei و Gazor 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 سریع تر آب از محصول و کاهش رطوبت آن می باشد. همچنین در روش سنتی خشک کردن پسته به دلیل طولانی بودن زمان خشک شدن، بیشترین میزان چروکیدگی و در پسته های خشک شده به روش خورشیدی به دلیل ایجاد تنش حرارتی و کاهش زمان خشک کردن، کمترین میزان چروکیدگی اندازه گیری شد.

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

نتایج پژوهش حاضر نشان داد، بیشترین و کمترین زمان خشک کردن پسته کامل به ترتیب در روش های 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 به صورت 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 لایه ای نازک پسته را توسط خشک کن خورشیدی مورد مطالعه قرار دادند. آنها زمان خشک کردن پسته کامل را 6

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, 17th edn. 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, Castellero 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. A simple 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.

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.

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 H², Ahmad Kalbasi Ashtari³

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