

## مدلسازی سینتیک خشک کردن پسته رقم کله قوچی با استفاده از روش‌های مختلف خشک کردن: خشک کردن خورشیدی، سنتی در آفتاب و سایه

محسن مختاریان<sup>۱\*</sup>، حمید توکلی‌پور<sup>۲</sup> و احمد کلباسی اشتری<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۳/۴

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱/۱۵

<sup>۱</sup> استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

\*مسئول مکاتبه: Email: mokhtarian.mo@gmail.com

### چکیده

خشک کردن یکی از مهمترین مراحل فرآوری پس از برداشت محصولات کشاورزی است. در این مطالعه طراحی، ساخت و ارزیابی یک خشک‌کن خورشیدی جهت فرآوری پسته مورد بررسی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری و ثبت دما و رطوبت نسبی هوا در قسمت‌های مختلف خشک‌کن، دستگاه داده‌بردار دیجیتال ساخته و نصب شد. جهت ارزیابی خشک‌کن پارامترهای زمان خشک کردن، تغییرات رطوبت محصول طی خشک کردن و آهنگ خشک کردن مورد مطالعه قرار گرفت. خشک کردن پسته در روش‌های سنتی در معرض تابش آفتاب، سایه و خورشیدی به ترتیب در دامنه دمایی  $19/91-33/11$  °C،  $20/36-63/82$  °C و  $32/30-54/20$  °C در مدت زمان ۱۹، ۴۸ و ۱۳ ساعت انجام گردید. نتایج نشان داد که مدل‌های آغباشلو و همکاران و تقریب انتشار به ترتیب به عنوان بهترین مدل‌های پیش‌بینی کننده رفتار خشک کردن پسته کامل در روش‌های خشک کردن خورشیدی و سنتی (آفتاب/سایه) معرفی شدند. به طور کلی نتایج نشان داد که روش خشک کردن خورشیدی نسبت به سایر روش‌های خشک کردن برای فرآوری پسته ایرانی پیشنهاد می‌گردد.

**واژگان کلیدی:** انرژی تجدیدپذیر، پسته، خشک‌کن فعال خورشیدی، مدلسازی تجربی

### مقدمه

کشاورزی سازمان ملل متحد تولید پسته در سال ۲۰۱۲، ۱۰۰۵۱۴۵ متریک تن گزارش گردید که ایران حدوداً ۴۷/۱۷ درصد تولید جهانی پسته را به خود اختصاص

پسته یکی از محصولات اصلی ایران، آمریکا و ترکیه به شمار می‌رود. براساس نتایج سازمان خواروبار

برازش منحنی خشک کردن پسته توسط مدل‌های تجربی می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

#### آماده‌سازی ماده خام

پسته (*Pistacia Vera L.*) رقم کله قوچی به صورت روزانه از یکی از باغات روستای کیزور (شهرستان سبزوار) جمع‌آوری گردید. قبل از خشک کردن، پوست سبز (کاج پسته) جدا و جهت جلوگیری از خشک شدن رطوبت سطحی، پسته‌ها به محض پوست‌گیری به ظرف پلاستیکی درب‌دار منتقل شد. سپس پسته‌ها تا زمان شروع آزمایش در یخچال در دمای  $3^{\circ}\text{C}$  نگهداری شدند.

#### طراحی و ساخت سامانه خورشیدی

خشک‌کن طراحی شده در این پژوهش شامل جمع‌کننده صفحه‌ای متخلخل، واحد خشک‌کن، فن سانتریفوژ، دریچه<sup>۲</sup> کنترل رطوبت نسبی، اتصالات و لوله‌های رابط، گرم‌کن الکتریکی کمکی<sup>۳</sup> و سامانه کنترل الکترونیکی می‌باشد (شکل ۱). بدنه جمع‌کننده خورشیدی اولیه از جنس ورق گالوانیزه سفید به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر، با ابعاد مفید داخلی ۱/۹۳ متر × ۰/۹۵ متر × ۰/۱۵ متر (به ترتیب طول، عرض و ارتفاع) طراحی و ساخته شد. جهت جلوگیری از اتلاف حرارتی، بدنه جمع‌کننده خورشیدی با پوششی از جنس پشم شیشه به ضخامت ۳ سانتیمتر عایق‌بندی گردید. لایه پوشش‌دهنده از جنس شیشه سفید به ضخامت ۴ میلی‌متر پوشانده شد. در حد فاصل بین کف جمع‌کننده و سطح شیشه، یک صفحه جاذب متخلخل از جنس ورق آلومینیوم به ضخامت ۱/۱ میلی‌متر، با شیب ملایم (تقریباً ۴/۵ درجه) از قسمت وروی هوا به جمع‌کننده به سمت خروجی هوا از جمع‌کننده نصب گردید و سطح بیرونی آن

داده است (فائو ۲۰۱۲). مهمترین مرحله در فرآیند پس از برداشت پسته، خشک کردن است. در حال حاضر از دو روش سنتی و صنعتی به صورت توأم برای خشک کردن پسته استفاده می‌شود. در صورتی که پسته به صورت سنتی (پهن کردن در معرض آفتاب) خشک گردد، زمان لازم جهت خشک شدن طولانی و از طرفی حمله حشرات و پرندگان، گرد و غبار و ریزش باران از عواملی هستند که باعث کاهش کیفیت پسته خشک شده در این روش می‌گردند. خشک‌کن‌های صنعتی نیز به دلیل هزینه اولیه بالا و مصرف انرژی زیاد، مقرون به صرفه نبوده و مورد توجه باغداران و پایانه‌های ضبط پسته قرار نگرفته‌اند. انرژی مورد نیاز برای خشک کردن به روش صنعتی به طور 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 زیست محیطی آنها، توجه زیادی به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان جایگزین یا مکمل برای سوخت‌های فسیلی معطوف شده است. در این راستا استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی به عنوان یک راه حل جدید مورد توجه قرار گرفته و به صورت فزاینده‌ای در حال رشد است (پانگهان و همکاران ۲۰۰۲). پژوهش‌های مختلفی توسط توکلی پور (۲۰۱۵)، کوچک‌زاده (۲۰۱۳)، توکلی پور و مختاریان (۲۰۱۲)، کاشانی‌نژاد و همکاران (۲۰۰۷)، میدلی و کوکوک (۲۰۰۳) و میدلی (۲۰۰۱) بر روی خشک کردن پسته گزارش شده است.

هدف از این پژوهش، طراحی، ساخت و ارزیابی نوع جدیدی از خشک‌کن‌های خورشیدی مجهز به سامانه گردش هوای بسته جهت خشک کردن پسته و مقایسه رفتار خشک کردن با روش‌های سنتی (آفتاب/سایه) و

2 - Vent Damper

3 - Ancillary electrical heater

1 - Open sun drying

۴۰ درجه (با توجه به فصل برداشت پسته تعیین شد) رو به سمت جنوب قرار گرفت.

بدنه دستگاه از جنس ورق آهن سیاه با ضخامت ۳ میلیمتر، به صورت یک مکعب مربع با ابعاد مفید خارجی ۱متر×۱متر×۱متر (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 ۰/۶ میلیمتر پوشش‌دهی شد. درون گرمخانه دو سینی مشبک به ابعاد ۰/۸۸متر×۰/۸۴متر×۰/۰۴متر (به ترتیب طول، عرض و ارتفاع) تعبیه شد. 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 ۷۰۰ واتی استفاده شد که در مسیر هوای ورودی نصب شد. این واحد از طریق یک کنتاکتور ۹ آمپر به واحد کنترل الکترونیکی متصل و توسط برنامه کامپیوتری نوشته شده قابل کنترل بود. جریان هوا در داخل خشک‌کن از طریق فن سانتریفوژ نصب شده روی دستگاه تأمین گردید.

لازم به ذکر است که جهت کنترل ویژگی‌های ترمودینامیکی (دما و رطوبت نسبی) خشک‌کن خورشیدی ساخته شده در این پژوهش، از ماژول دما و رطوبت AM۲۳۰۳ استفاده گردید که توسط محققین در این پژوهش طراحی و ساخته شد.

### روش اجرای آزمایش

آزمایشات مربوط به ارزیابی دستگاه، در محوطه آفتاب‌گیر دانشگاه، انجام گرفت. محل مورد آزمایش دارای عرض جغرافیایی شمالی ۳۶° درجه و ۱۳ دقیقه، طول

جهت بهبود جذب تابش خورشید توسط رنگ مشکی مات رنگ شد. در اثر تابش نور خورشید ورقه آلومینیومی 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 ۲ میلیمتر و فاصله سوراخ‌ها (گام) ۱ 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 داخلی ۰/۸۰متر×۰/۵۰متر×۰/۱۵متر (به ترتیب طول، عرض و ارتفاع). شیب جمع‌کننده خورشیدی و نحوه قرارگیری آن توسط رابطه زیر تعیین گردید (برن‌دورف ۱۹۸۷؛ دوفه و بکمن ۱۹۹۱):

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



شکل ۱- سامانه خشک‌کن خورشیدی

در این معادله، N تعداد روز (در ۱ ژانویه N=۱ و در ۳۱ دسامبر N=۳۶۵) است. بدین ترتیب، برای دریافت حداکثر تابش خورشیدی، جمع‌کننده به صورت زاویه‌دار با شیب

### خشک کردن پسته در دستگاه خشککن خورشیدی در حالت بازگردش هوا

در این حالت ۴ کیلوگرم پسته به صورت تک لایه در دو سینی دستگاه توزیع (در هر سینی ۲ کیلوگرم) و درب دستگاه بسته و فرآیند خشک کردن آغاز گردید. برنامه رایانه‌ای دستگاه جهت کنترل دریچه در رطوبت نسبی کمتر یا مساوی ۱۵ درصد تنظیم گردید ( $RH \leq 15$ ). تا زمانی که رطوبت نسبی محفظه خشککن بالاتر از ۱۵ درصد بود، وضعیت دریچه در حالت باز بوده و هیچ بازگردش هوا صورت نگرفته و به محض کاهش رطوبت نسبی به کمتر از مقدار تعیین شده، دریچه با فرمان واحد کنترل الکترونیکی بسته شده و بازگردش هوا آغاز می‌شود. میانگین شدت تابش خورشید در این حالت خشک کردن، طبق گزارشات ایستگاه هواشناسی منطقه ۷۴۵/۴۹ 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 ۵ درصد مطابق استاندارد ملی ایران به شماره ۱۵ (پسته طبیعی خندان-ویژگی‌ها) ادامه یافت.

#### مدلسازی رفتار خشک کردن پسته

منحنی‌های خشک کردن پسته در روش‌های مختلف فراورش، توسط مدل‌های خشک کردن لایه‌ای نازک برازش گردید (مرکالی و همکاران ۲۰۱۰؛ توقرول و پهلوان ۲۰۰۲) (جدول ۱). در تئوری خشک کردن لایه نازک فرض بر این است که لایه مواد به اندازه کافی نازک بوده یا سرعت هوا به اندازه کافی بالا باشد به طوری که شرایط هوای خشک کننده (رطوبت نسبی و دما) در سراسر مواد در حال خشک شدن ثابت باشد (توکلی پور و مختاریان ۲۰۱۲).

ضریب تبیین ( $R^2$ ) یکی از مهمترین معیارها برای انتخاب بهترین مدل می‌باشد. علاوه بر ضریب تبیین، بهترین

جغرافیایی ۵۷<sup>۱</sup> درجه و ۳۷ دقیقه بود. عمل داده‌برداری به صورت روزانه از ساعت ۸ صبح تا ساعت ۱۸ بعد از ظهر از تاریخ ۱۳۹۳/۰۶/۲۷ شروع و تا ۱۳۹۳/۰۷/۰۴ پایان یافت. 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. 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 (Dr. Alfred Müller, S/N K4135, W20-1/CL/H, Germany) نصب شده در ایستگاه هواشناسی سبزواری تعیین گردید. حالت‌های مورد مطالعه به صورت زیر بود:

#### خشک کردن پسته در معرض تابش خورشید

در این روش ۴ 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 سرعت باد، دمای روز و شدت تابش خورشید طی دوره خشک کردن طبق گزارشات ایستگاه هواشناسی منطقه ۵/۸۸۵ متر بر ثانیه،  $21/28$  °C و  $23/752$  وات بر متر مربع گزارش شد.

#### خشک کردن پسته در سایه

در این روش ۴ کیلوگرم پسته بر روی یک پارچه نخی به صورت تک لایه پهن و در سایه قرار گرفت و تا رسیدن به وزن ثابت خشک شد. میانگین سرعت باد، دمای روز و رطوبت نسبی محیط طی دوره خشک کردن طبق گزارشات ایستگاه هواشناسی منطقه  $19/3$  متر بر ثانیه،  $94/30$  °C و  $96/14$  درصد گزارش شد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{p,i} - MR_{e,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{p,i} - MR_{p,i})^2} \quad [۲]$$

$$RMSE = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{p,i} - MR_{e,i})^2 \right)^{0.5} \quad [۳]$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{e,i} - MR_{p,i})^2}{N - z} \quad [۴]$$

$$P(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^n |MR_{p,i} - MR_{e,i}| \quad [۵]$$

برازش توسط پارامترهای آماری مختلفی نظیر ضریب تبیین تعدیل شده ( $R_{adj}^2$ )، کاهش مربع کای ( $\chi^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد مدول انحراف نسبی میانگین (P%) تعیین شد. برای بهترین برازش، بایستی پارامترهای آماری ضریب تبیین و ضریب تبیین تعدیل شده بیشینه و کاهش مربع کای، ریشه میانگین مربعات خطا و درصد مدول انحراف نسبی میانگین کمینه باشند.

جدول ۱- مدل‌های سینتیکی خشک کردن لایه‌ای نازک ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف

نام مدل	معادله مدل	نام مدل	معادله مدل
آغباشلو و همکاران	$MR = \exp(-kt/1 + kt)$	تامسون	$t = a \ln(MR) + b(\ln(MR))^2$
انتشار فیک	$MR = a \exp(-c(t/L^2))$	تقریب انتشار	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
پلگ	$MR = 1 - (t/(a+kt))$	دو جمله‌ای	$MR = a \exp(-kot) + b \exp(-kit)$
پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$	دو جمله‌ای نمایی	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$
پیچ اصلاح شده II	$MR = a \exp(-c(t/L^2)^n)$	نیوتن (لوپس)	$MR = \exp(-kt)$

روش‌های مختلف خشک کردن پسته، تقریباً بیشترین افزایش دمای هوا بین ساعت ۱۲:۳۰ تا ۱۴:۳۰ ثبت گردید که این حالت نتیجه کمتر بودن زاویه سمت خورشید و بازتابش کمتر از سطح جمع‌کننده خورشیدی در طول این ساعت است. در آزمایشات میانگین دمای هوای محیط در حالت‌های خشک کردن پسته به روش سنتی در آفتاب، سایه و خورشیدی به ترتیب ۲۸/۸۹، ۳۰/۹۴ و ۳۱/۵۲ °C ثبت شد. میانگین دمای هوای خروجی از جمع‌کننده خورشیدی اولیه و محفظه خشک‌کن به ترتیب ۴۲/۹۹ °C و ۴۱/۲۸ °C ثبت گردید. مقایسه میانگین دمای هوای ورودی به جمع‌کننده و هوای داخل محفظه خشک‌کن (ورودی به محفظه خشک‌کن) نشان داد که، صفحه جمع‌کننده خورشیدی قادر بود به طور میانگین دمای محیط را به میزان ۱۱/۴۷ °C افزایش دهد. پژوهش

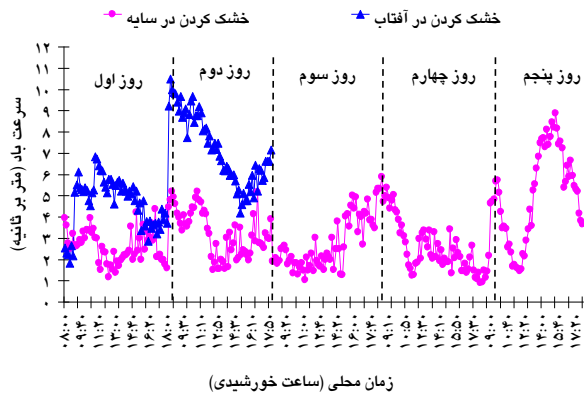
در این معادلات،  $MR_{e,i}$  نسبت رطوبت تجربی در آامین اندازه‌گیری،  $MR_{p,i}$  نسبت رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل در آامین اندازه‌گیری،  $\overline{MR}_{p,i}$  میانگین نسبت رطوبت پیش‌بینی شده در آامین اندازه‌گیری، N تعداد مشاهدات و z تعداد ضرایب ثابت مدل می‌باشد. فرآیند مدل‌سازی ریاضی توسط نرم افزار کامپیوتر سیگما پلات نسخه ۱۲ انجام گردید (تولکی پورو مختاریان ۲۰۱۲).

## نتایج و بحث

### تغییرات دما و رطوبت نسبی هوا

شکل ۲ تغییرات دما و رطوبت نسبی هوا در بخش‌های مختلف دستگاه خشک‌کن خورشیدی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که تغییرات دمای ثبت شده توسط حسگرها، ابتدا روند افزایشی و سپس نزولی بود. در

۱۸۳/۴۹-۱/۱۰ متر بر ثانیه و ۰/۸-۸۹/۸۷ متر بر ثانیه نوسان داشت.

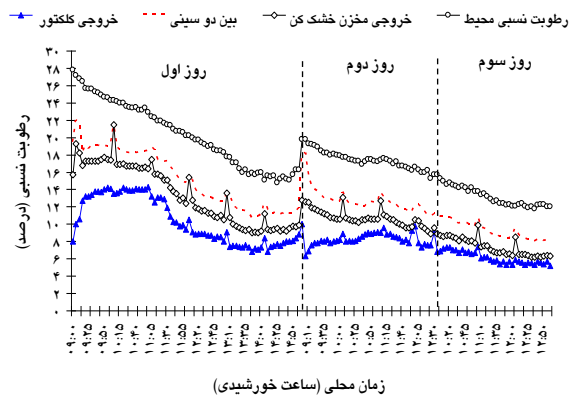
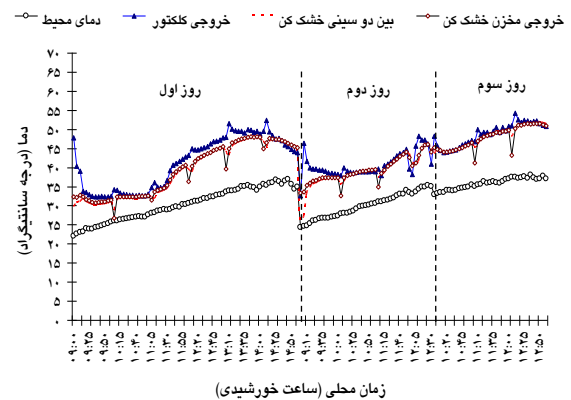


شکل ۳- منحنی تغییرات سرعت باد طی دوره خشک کردن

### برازش منحنی خشک کردن

منحنی تغییرات میزان رطوبت پسته کامل در برابر زمان خشک کردن در روش‌های مختلف خشک کردن در شکل ۴ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در کلیه روش‌های خشک کردن، تغییرات میزان رطوبت پسته بر حسب زمان خشک کردن نزولی است. بیشترین و کمترین زمان خشک کردن پسته به ترتیب در روش‌های سنتی در سایه (۴۸ ساعت) و خشک کردن خورشیدی در حالت بازگردش هوا (۱۳ ساعت) حاصل گردید. روش خشک کردن توسط خشک‌کن خورشیدی توانست زمان خشک کردن پسته را نسبت به روش‌های سنتی در آفتاب و سایه به ترتیب ۳۱/۵۷ و ۷۲/۹۱ درصد کاهش دهد. نتایج مشابه توسط توکلی‌پور (۲۰۱۵) و کاشانی‌نژاد (۲۰۰۷) در خصوص خشک کردن پسته مشاهده گردید.

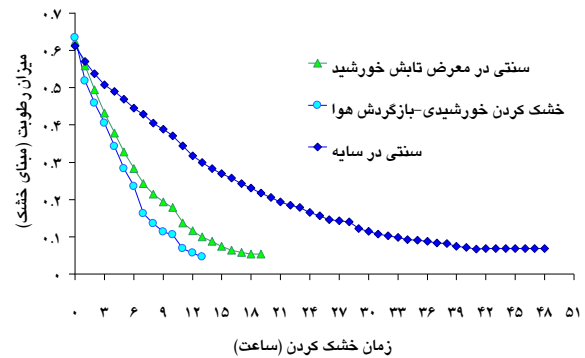
فودهولی و همکاران (۲۰۱۴) بر روی خشک کردن فلفل چیلی نشان داد که مقادیر میانگین دما و رطوبت نسبی هوای محفظه خشک‌کن در دامنه  $28-55^{\circ}\text{C}$  و  $74-18$  درصد متغیر بود. همچنین پژوهش میدلی (۲۰۰۱) نشان داد که دمای هوای خشک کردن و دمای محیط به ترتیب در  $21-32^{\circ}\text{C}$  و دامنه  $50^{\circ}\text{C}$  ثابت گردید.



شکل ۲- تغییرات دما و رطوبت نسبی هوا بر حسب زمان خشک کردن در بخش‌های مختلف خشک‌کن خورشیدی

با توجه به اهمیت سرعت باد در انتقال جرم طی خشک کردن پسته به روش سنتی (آفتابی/سایه)، منحنی تغییرات سرعت باد طی دوره خشک کردن بر حسب زمان محلی ثبت گردید (شکل ۳). میزان تغییرات سرعت باد در روش‌های خشک کردن آفتابی و سایه به ترتیب در دامنه

تقریب انتشار به ترتیب به عنوان بهترین مدل‌های پیش‌بینی کننده رفتار خشک کردن پسته در روش‌های خورشیدی و سنتی (آفتاب و سایه) معرفی شدند. بررسی مطالعات پیشین نشان داد که، محققین مختلف مدل‌های بسیاری را برای ارقام و روش‌های مختلف خشک کردن پسته پیشنهاد نموده‌اند. به عنوان مثال مدل پیچ اصلاح شده برای رقم عباس علی (توکلی‌پور و مختاریان ۲۰۱۲)، مدل‌های پیچ و دو جمله‌ای برای خشک کردن پسته رقم اوحدی (کاشانی‌نژاد و همکاران ۲۰۰۷؛ چایجان و اثنی‌عشری ۲۰۱۱) و مدل پیچ برای خشک کردن ارقام پسته خانی و عباس علی خشک شده به روش میکروویو-جابجایی هوای داغ (کوچک‌زاده و شافعی ۲۰۱۰).



شکل ۴- تأثیر روش‌های مختلف خشک کردن روی سینتیک خشک کردن پسته

نتایج مدلسازی منحنی خشک کردن پسته در روش‌های مختلف خشک کردن در جداول ۲ تا ۴ ارائه شده است. نتایج نشان داد که در کلیه مدل‌های مورد برآزش، مقادیر  $R^2$  و  $R^2_{adj}$ ، به ترتیب بیشتر از ۰/۹۷۵۵ و ۰/۹۷۳۲ گزارش گردید. نتایج نشان داد که مدل‌های آغباشلو و همکاران و

جدول ۲- پارامترهای آماری و ضرایب ثابت مدل‌های تجربی برآزش کننده منحنی خشک کردن پسته به روش خورشیدی در حالت بازگردش هوا ( $RH \leq 15\%$ )

نام مدل	$\chi^2$	RMSE	P(%)	$R^2$	$R^2_{adj}$
آغباشلو و همکاران ( $k_1 = -0/0421$ و $k = 0/1494$ )	۰/۰۰۰۵۲۶	۰/۰۲۱۲۵	۱/۶۸۶	۰/۹۹۵۳	۰/۹۹۴۹
انتشار فیک ( $L = -0/0618$ و $c = 0/0674$ , $a = 1/0374$ )	۰/۰۰۲۷۹۳	۰/۰۴۶۸۴	۴/۴۴۳	۰/۹۷۷۳	۰/۹۷۳۲
پلگ ( $a = 0/4233$ و $k = 0/0545$ )	۰/۰۰۰۷۱۰	۰/۰۲۴۶۸	۲/۰۵۳۲	۰/۹۹۳۷	۰/۹۹۳۲
پیچ ( $n = 1/260$ و $k = 0/1308$ )	۰/۰۰۱۱۹۳	۰/۰۳۱۹۸	۲/۶۷۵	۰/۹۸۹۴	۰/۹۸۸۵
پیچ اصلاح شده II ( $L = 1/0278$ و $c = 0/1401$ , $a = 1/260$ )	۰/۰۰۱۳۰۲	۰/۰۳۱۹	۲/۶۷۵۱	۰/۹۸۹۴	۰/۹۸۷۵
تامسون ( $b = -0/0196$ و $a = -0/0772$ )	۰/۰۰۲۱۳۸	۰/۰۴۲۸۱	۲/۷۷۷	۰/۹۸۰۴	۰/۹۷۸۷
تقریب انتشار ( $b = 1/0080$ و $a = -114/2$ , $k = 0/0866$ )	۰/۰۰۰۵۸۷	۰/۰۲۱۴	۱/۷۶۶۶	۰/۹۹۵۲	۰/۹۹۴۴
دو جمله‌ای ( $h = 456/5$ و $b = -0/0872$ , $a = 1/0872$ , $k = 0/2237$ )	۰/۰۰۲۷۴۸	۰/۰۴۴۳	۳/۹۲۳	۰/۹۷۹۷	۰/۹۷۳۶
دو جمله‌ای نمایی ( $a = 1/7661$ و $k = 0/2824$ )	۰/۰۰۱۲۷۱	۰/۰۳۳۰	۲/۸۵۱	۰/۹۸۸۷	۰/۹۸۷۸
نیوتن (لوپس) ( $k = 0/2064$ )	۰/۰۰۲۵۵۷	۰/۰۴۸۷۳	۴/۳۸۲	۰/۹۷۵۵	۰/۹۷۵۵

k: ثابت نرخ خشک کردن ( $h^{-1}$ )

همانطور که مشاهده می‌گردد، مدل‌های منتخب قادر به پیش‌بینی داده‌های تجربی با خطای بسیار کمی بودند یا به عبارت دیگر، داده‌های پیش‌بینی شده همبستگی بسیار بالایی با داده‌های تجربی داشتند.

منحنی تغییرات نسبت رطوبت پسته خشک شده در برابر زمان خشک کردن در روش‌های مختلف خشک کردن برای داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده با استفاده از بهترین مدل‌های برازش کننده در شکل ۵ ارائه شده است.

**جدول ۳- پارامترهای آماری و ضرایب ثابت مدل‌های تجربی برازش کننده منحنی خشک کردن پسته به روش سنتی در معرض تابش مستقیم آفتاب**

نام مدل	$\chi^2$	RMSE	P(%)	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
آغباشلو و همکاران ( $k_1 = -0.0271$ و $k = 0.1237$ )	0.00151	0.01165	0.811	0.9986	0.9985
انتشار فیک ( $L = -0.4332$ و $c = 0.0319$ , $a = 1.055$ )	0.001374	0.03418	3.086	0.9876	0.9862
پلگ ( $a = 6.436$ و $k = 0.6197$ )	0.00448	0.02009	1.703	0.9957	0.9955
پیچ ( $n = 1.230$ و $k = 0.1016$ )	0.00398	0.01893	1.493	0.9962	0.9960
پیچ اصلاح شده II ( $L = 1.690$ و $c = 0.3700$ , $n = 1.230$ )	0.00421	0.01893	1.493	0.9962	0.9958
تامسون ( $b = -0.0125$ و $a = -0.0459$ )	0.003421	0.05549	3.854	0.9785	0.9771
تقریب انتشار ( $b = 1.0093$ و $a = -77.717$ , $k = 0.0784$ )	0.00147	0.01120	0.926	0.9987	0.9985
دو جمله‌ای ( $h = 0.1785$ و $b = 1.1089$ , $a = -0.1089$ , $k = 22.65$ )	0.001084	0.02945	2.605	0.9908	0.9891
دو جمله‌ای نمایی (مدل قادر به برازش منحنی خشک کردن نبود)					
نیوتن (لویس) ( $k = 0.1618$ )	0.001575	0.03869	3.462	0.9841	0.9841
مدل قادر به برازش منحنی خشک کردن نبود					

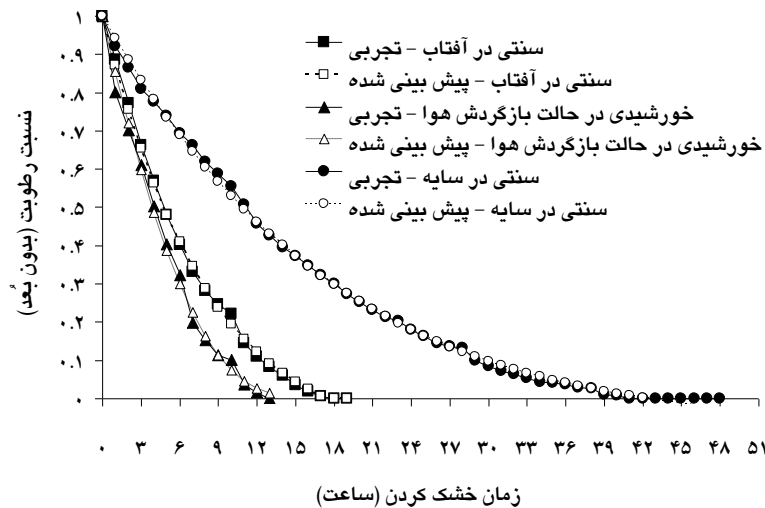
k: ثابت نرخ خشک کردن ( $h^{-1}$ )

**جدول ۴- پارامترهای آماری و ضرایب ثابت مدل‌های تجربی برازش کننده منحنی خشک کردن پسته به روش سنتی در سایه**

نام مدل	$\chi^2$	RMSE	P(%)	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
آغباشلو و همکاران ( $k_1 = -0.0106$ و $k = 0.0549$ )	0.00143	0.01173	0.930	0.9984	0.9983
انتشار فیک ( $L = 1.6218$ و $c = 0.1924$ , $a = 1.043$ )	0.001148	0.03284	2.911	0.9872	0.9866
پلگ ( $a = 14.14$ و $k = 0.6557$ )	0.00471	0.02126	1.701	0.9946	0.9945
پیچ ( $n = 1.194$ و $k = 0.0402$ )	0.00465	0.02113	1.805	0.9947	0.9946
پیچ اصلاح شده II ( $L = 3.894$ و $c = 1.023$ , $n = 1.194$ )	0.00475	0.02113	1.805	0.9947	0.9945
تامسون ( $b = -0.0018$ و $a = -0.030$ )	0.001758	0.04107	2.785	0.9791	0.9785
تقریب انتشار ( $b = 1.0029$ و $a = -215.09$ , $k = 0.0365$ )	0.00128	0.01096	0.834	0.9986	0.9985
دو جمله‌ای ( $h = 1284/2$ و $b = -0.0577$ , $a = 1.057$ , $k = 0.741$ )	0.001118	0.03204	2.800	0.9878	0.9870
دو جمله‌ای نمایی (مدل قادر به برازش منحنی خشک کردن نبود)					
نیوتن (لویس) ( $k = 0.0702$ )	0.001266	0.03522	3.018	0.9853	0.9853
مدل قادر به برازش منحنی خشک کردن نبود					

k: ثابت نرخ خشک کردن ( $h^{-1}$ )





شکل ۵- تغییرات نسبت رطوبت تجربی و پیش بینی شده در برابر زمان خشک کردن برای پسته در روش‌های مختلف خشک کردن توسط بهترین مدل سینتیکی خشک کردن:  $\Delta$ ،  $\square$  و  $\blacktriangle$ ، آغباشلو و همکاران؛  $\bullet$  و  $\circ$ ، تقریب انتشار

### نتیجه‌گیری

ترتیب در مدت زمان ۱۹، ۴۸ و ۱۳ ساعت تعیین شد. نتایج نشان داد که مدل‌های آغباشلو و همکاران و تقریب انتشار به ترتیب به عنوان بهترین مدل‌های پیش‌بینی کننده رفتار خشک کردن پسته کامل در روش‌های خورشیدی و سنتی (سایه/آفتاب) معرفی شدند.

نتایج نشان داد که بکارگیری خشک‌کن خورشیدی جهت خشک کردن پسته قادر به گرم کردن هوا به میزان  $11/47^{\circ}\text{C}$  است که در طول خشک کردن طی روز متغیر می‌باشد. مدت زمان خشک کردن پسته کامل در روش‌های سنتی در معرض تابش آفتاب، سایه و خورشیدی به

### منابع مورد استفاده

- Brenndorfer B, Kennedy L, Oswin Bateman CO, Trim DS, Mrema GC and Wereko-Brobby C, 1987. Solar dryers their role in post-harvest processing. London, SW1Y 5HX.
- Chayjan RA and Esna-Ashari M, 2011. Isotheric heat and entropy modeling of pistachio cultivars using neural network approach. Journal of Food Processing and Preservation 35: 524-532.
- Duffie JA and Beckman WA, 1991. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons, New York, 918p.
- FAO, 2012. FaoStat Database. Available from <http://faostat.fao.org>.
- Fudholi A, Sopian K, Yazdi MH, Ruslan MH, Gabbasa M and Kazem HA, 2014. Performance analysis of solar drying system for red chili. Journal of Solar Energy 99: 47-54.
- Kashaninejad M, Mortazavi A, Safekordi A and Tabil LG, 2007. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. Journal of Food Engineering 78: 98-108.
- Kouchakzadeh A and Shafeei S, 2010. Modeling of microwave-convective drying of pistachios. Journal of Energy Conversion and Management 51: 2012-2015.

- Kouchakzadeh A, 2013. The effect of acoustic and solar energy on drying process of pistachios. *Journal of Energy Conversion and Management* 67: 351-356.
- Mercali GD, Tessaro IC, Norena CPZ and Marczak LDF, 2010. Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of bananas (*Musa sapientum*, shum.). *International Journal of Food Science and Technology* 45(11): 2281-2289.
- Midilli A, 2001. Determination of pistachio drying behaviour and conditions in a solar drying system. *International Journal of Energy Research* 25: 715-725.
- Midilli A and Kucuk H, 2003. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Journal of Energy Conversion and Management* 44: 1111-1122.
- Pangavhane DR, Sawhney RL and Sarsavadia PN, 2002. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Journal of Energy* 27(6): 579-590.
- Tavakolipour H and Mokhtarian M, 2012. Neural network approaches for prediction of pistachio drying kinetics. *International Journal of Food Engineering* 8(3): Article 42.
- Tavakolipour H, 2015. Postharvest operations of pistachio nuts. *Journal of Food Science and Technology* 52(2): 1124-1130.
- Toğrul İT and Pehlivan D, 2002. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering* 55: 209-216.

## Drying kinetic modelling of Kalle-Ghuchi cultivar pistachio nut using different methods: solar, sun and shade drying

M Mokhtarian<sup>1\*</sup>, H Tavakolipour<sup>2</sup> and A Kalbasi Ashtari<sup>3</sup>

Received: May 25, 2015

Accepted: April 03, 2016

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Roudhen Branch, Islamic Azad University, Roudhen, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran

<sup>3</sup>Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Technology and Engineering, Tehran University, Karaj, Iran

\*Corresponding author: E mail:mokhtarian.mo@gmail.com

### Abstract

Drying is one of important stage of the postharvest processing of agriculture crops. In this study design, construction and evaluation of a solar dryer for pistachio processing was investigated. To measure and record air temperature and relative humidity at different places of dryer, a digital data logger device was fabricated and installed. To evaluating of drier, the parameters of drying time, moisture content variation during drying and drying rate were studied. Drying of pistachio in traditional methods exposed to direct sunlight, shade and solar drying were carried out at the ranges of air temperature of 19.91-33.11°C, 20.63-36.82°C and 32.30-54.20°C during 19, 48 and 13 h, respectively. The results illustrated that, Aghbashlo et al. and Diffusion approximation models were introduced as the best models for predicting drying behaviour of whole pistachio in solar drying and traditional drying (sun/shade) methods, respectively. Generally, the result indicated that solar drying method than other drying method was recommended to processing of Persian's pistachio.

**Key words:** Renewable energy, Pistachio, Active solar dryer, Empirical modelling