



A Review of Mathematical Models Utilized in the Drying Processes of Various Pistachio Cultivars

Hadi Karimi^{1*}, Najmeh Soleimani², Fatemeh Darijani³, Bahman Panahi⁴ and Houshang Afzali Grouh⁵

^{1*, 2, 5} Agricultural Engineering Research Department, Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Kerman, Iran.

³ Forests and Rangelands Research Department, Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Kerman, Iran.

⁴ Pistachio Research Center, Horticultural Sciences Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rafsanjan, Iran

* Corresponding Author's Email: h_karimi@areeo.ac.ir

((Received: October. 11, 2025 – Accepted: December. 17, 2025))

ABSTRACT

Objective: Drying is a critical stage in pistachio post-harvest processing. This study investigates the drying kinetics and models the drying methods employed for different pistachio cultivars in Iran and Turkey, the world's primary producers.

Material and Method: Drying plays a critical role in determining final product quality, yet comprehensive research in this area is lacking. Therefore, identifying the optimal drying method is essential. This study evaluated several drying methods, including solar, cabinet, microwave, and fluidized bed drying, using mathematical models. The two-parameter Page, modified Page, and Henderson-Pabis models were employed to describe the drying kinetics of Iranian and Turkish pistachio cultivars.

Results: Analysis of the experimental data revealed that the modified Page model demonstrated the best fit, enabling accurate prediction of drying behavior and process optimization. The study also investigated the effects of temperature, air velocity, and relative humidity on drying rate and pistachio quality characteristics. While increased temperature and air velocity reduced drying time, these parameters required careful control to prevent texture damage and discoloration. Furthermore, relative humidity significantly influenced the moisture transfer rate.

Conclusion: The selection of an optimal drying method and the precise optimization of its parameters are essential for preserving the quality and nutritional value of pistachios, which in turn enhances their competitiveness in the global market.

Keywords: Pistachios, drying, kinetic modeling

Cite this article: Karimi, H., Soleimani, N., Darijani, F., Panahi, B., and Afzali Grouh, H. 2025. A Review of Mathematical Models Utilized in the Drying Processes of Various Pistachio Cultivars. *Journal of Sustainable Agricultural Science Research*, 5 (3), 1-16.

DOI: <https://doi.org/10.71667/sarj.2025.1220794>



© The Author(s).

<https://doi.org/10.71667/sarj.2025.1220794>

Publisher: Islamic Azad University of Kerman Branch Press.

مروری بر مدل های ریاضی مورد استفاده در فرآیندهای خشک کردن انواع پسته

هادی کریمی^{۱*}، نجمه سلیمانی^۲، فاطمه دریجانی^۳، بهمن پناهی^۴، هوشنگ افزلی گروه^۵

^۱ و ^۲ ۵ - بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان، سازمان

تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران

^۳ - بخش تحقیقات جنگل و مرتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان، سازمان تحقیقات آموزش و

ترویج کشاورزی، کرمان، ایران

^۳ - پژوهشکده پسته، موسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: h_karimi@areeo.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶ - تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰)

چکیده

هدف: خشک کردن مهمترین بخش فرآوری پسته محسوب می شود. لذا این مطالعه با هدف بررسی مدل های سنتیکی خشک کردن پسته در ایران و ترکیه، به عنوان بزرگترین تولیدکنندگان پسته در جهان، به تحلیل مدل سازی روش های خشک کردن ارقام مختلف پسته در این دو کشور می پردازد.

مواد و روش ها: با عنایت به نقش تعیین کننده خشک کردن در کیفیت نهایی محصول و نبود تحقیقات جامع در این حوزه، تعیین روش بهینه خشک کردن امری ضروری است. در این پژوهش، روش های گوناگون خشک کردن شامل خشک کردن آفتابی، کابینتی، میکروویو و بستر سیال با استفاده از مدل های ریاضی مورد ارزیابی قرار گرفته اند. مدل های دو پارامتری پیچ، پیچ اصلاح شده و هندرسون-پایس به منظور مدل سازی فرآیند خشک کردن ارقام پسته ایرانی و ترکیه پیشنهاد شده اند.

یافته ها: یافته ها حاکی از آن است که مدل پیچ اصلاح شده، انطباق بهتری با داده های تجربی داشته و امکان پیش بینی دقیق رفتار خشک شدن و بهینه سازی فرآیند را فراهم می سازد. اثرات متغیرهای دما، سرعت هوا و رطوبت نسبی بر نرخ خشک شدن و ویژگی های کیفی پسته مورد بررسی قرار گرفته اند. افزایش دما و سرعت هوا منجر به کاهش زمان خشک شدن می گردد، لیکن اعمال این پارامترها مستلزم دقت است تا از آسیب به بافت و تغییر رنگ پسته جلوگیری به عمل آید. همچنین، رطوبت نسبی بر میزان انتقال رطوبت تأثیرگذار است.

نتیجه گیری: انتخاب روش مناسب خشک کردن و بهینه سازی پارامترهای فرآیند، نقشی کلیدی در حفظ کیفیت، ارزش غذایی پسته و ارتقا توان رقابتی آن در بازارهای جهانی ایفا می کند.

واژه های کلیدی: پسته، خشک کردن، مدل سازی سینتیکی.

استناد:

Karimi, H., Soleimani, N., Darijani, F., Panahi, B., and Afzali Grouh, H. 2025. A Review of Mathematical Models Utilized in the Drying Processes of Various Pistachio Cultivars. *Journal of Sustainable Agricultural Science Research*, 5 (3), 1-16.

DOI: <https://doi.org/10.71667/sarj.2025.1220794>



© The Author(s).

ناشر: انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان

<https://doi.org/10.71667/sarj.2025.1220794>

مقدمه

پسته (*Pistacia vera*) محصولی استراتژیک در ایران محسوب می‌شود و بیش از ۷۰ درصد صادرات جهانی پسته را شامل می‌شود (Fao, 2022; Khoshgoftarmanesh & et al., 2021). ارزش غذایی بالای این محصول شامل پروتئین‌های گیاهی، اسیدهای چرب غیراشباع، فیبر، مواد معدنی و ترکیبات آنتی‌اکسیدان است که آن را در میان آجیل‌ها برجسته می‌کند (Dreher, 2012; Usda, 2021; Gentile & et al., 2020). اما پسته تازه دارای رطوبت بالا (۳۰-۵۰ درصد) است که خطر رشد قارچ‌های مولد آفلاتوکسین و سایر میکروارگانیسم‌های مضر را افزایش می‌دهد (Moghaddam & et al., 2022). خشک‌کردن پسته بلافاصله پس از برداشت، فرایندی ضروری است که تأثیر مستقیمی بر کیفیت تغذیه‌ای، ایمنی، قابلیت صادرات و پذیرش بازار دارد (Aghdam & et al., 2020; Esmailzadeh & et al., 2020). بر پایه مطالعات، مصرف منظم پسته می‌تواند به بهبود پروفایل چربی خون، کاهش التهاب، و بهبود سلامت قلبی-عروقی کمک کند (Gulati & et al., 2019). به علاوه، پسته ایران به دلیل کیفیت حسی خاص خود (رنگ سبز مغز، طعم و بافت مطلوب) در بازارهای جهانی تقاضای بالایی دارد (Mohammadi & et al., 2016). صادرات این محصول، نقش مهمی در ارزآوری و ایجاد اشتغال در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور ایفا می‌کند (Fao, 2022; Iran Pistachio, 2023).

رطوبت بالای پسته تازه، خطر فساد میکروبی و تولید آفلاتوکسین را به شدت افزایش می‌دهد (Shakerardekani & Karim, 2012; Marín et al., 2012). آفلاتوکسین‌ها ترکیباتی سرطان‌زا هستند که وجود آن‌ها در مواد غذایی با استانداردهای سختگیرانه‌ای در بازارهای جهانی کنترل می‌شود (Iarc, 2020; Who, 2018). خشک‌کردن، با کاهش رطوبت به کمتر از ۶ درصد، رشد قارچ‌ها و باکتری‌های مضر را مهار کرده و ایمنی محصول را تضمین می‌کند (Fao, 2021). علاوه بر ایمنی، خشک‌کردن به حفظ ترکیبات زیست‌فعال و ممانعت از تغییرات آنزیمی کمک می‌کند. تأخیر در خشک‌کردن یا خشک‌کردن ناکافی، منجر به تخریب آنتی‌اکسیدان‌ها، اسیدهای چرب غیراشباع و ویتامین‌ها می‌شود (Vega-Gálvez et al., 2023; Doymaz, 2020; Doymaz, 2014).

(Nikanfar & et al., 2023). همچنین، فعالیت آنزیم‌های اکسیداتیو در رطوبت بالا سبب قهوه‌ای شدن مغز و افت کیفیت حسی محصول می‌شود (Ghanbarzadeh & et al., 2020). از منظر اقتصادی، خشک‌کردن درست، افزایش ماندگاری، کاهش ضایعات، حفظ کیفیت بازارپسند و امکان صادرات به بازارهای دوردست را فراهم می‌سازد (Fao, 2022; Iran Pistachio, 2023). مطالعات نشان داده‌اند که یکی از اصلی‌ترین دلایل برگشت محموله‌های پسته از جهانی، آلودگی به آفلاتوکسین و عدم خشک‌شدن مناسب محصول بوده است (Iarc, 2020).

خشک کردن پسته نه تنها به عنوان یک مرحله فنی، بلکه به عنوان یک ضرورت راهبردی در زنجیره تأمین این محصول شناخته می‌شود. مدیریت صحیح این فرآیند، تضمین‌کننده کیفیت، ایمنی و ارزش اقتصادی محصول بوده و به تقویت جایگاه ایران در بازارهای جهانی کمک می‌کند. انتخاب روش مناسب خشک کردن تأثیر مستقیمی بر کیفیت نهایی، زمان فرآیند، مصرف انرژی، و هزینه‌های اقتصادی دارد (Ghanbarzadeh, 2020). خشک کردن آفتابی^۱ روشی است که در مناطق گرم و خشک ایران رایج است، شامل پهن کردن پسته در فضای باز روی سطح زمین یا توری است. اگرچه هزینه کم و مصرف انرژی صفر از مزایای آن است، اما مدت زمان طولانی (۲-۵ روز) و خطر آلودگی میکروبی و آفاتوکسینی از نقاط ضعف اصلی آن هستند (Khoshtaghaza, 2010; Mohammadi, 2022; Salehi, 2022). خشک کردن در سایه در برخی مناطق، خشک کردن در محیط‌های سایه‌دار (مانند انبارهای نیمه‌باز) انجام می‌شود تا از آسیب نور مستقیم خورشید بر رنگ مغز جلوگیری شود. این روش عمدتاً در مقیاس‌های کوچک به کار می‌رود و کارایی کمی دارد (Ghasemi, 2019).

در روش خشک‌کن حرارتی^۲ از جریان هوای گرم (معمولاً ۵۰-۷۰ درجه سانتی‌گراد) برای خشک کردن

استفاده می‌شود. این روش، رایج‌ترین شیوه صنعتی خشک کردن پسته در ایران و جهان است (Nasrnia, 2010; Tavakoli, 2023). اگرچه کاهش زمان و کنترل بهتر فرآیند از مزایای آن است، اما در صورت کنترل نامناسب، ممکن است منجر به آسیب حرارتی به مغز پسته شود (Jannatizadeh, 2019; Niakousari, 2013). در این سامانه‌ها، خشک‌کن لایه‌ای (Cabinet tray dryer) پسته در سینی‌هایی به صورت لایه‌ای چیده شده و هوای گرم از میان آن‌ها عبور می‌کند. این روش برای پژوهش و تولیدات نیمه‌صنعتی استفاده می‌شود و امکان کنترل دقیق‌تر پارامترهای فرآیند را فراهم می‌کند (Farahnaky, 2017). مایکروویو با نفوذ به درون پسته باعث تبخیر سریع رطوبت می‌شود. خشک کردن با مایکروویو^۳ با کاهش شدید زمان خشک کردن (در حد دقیقه) و حفظ بهتر ترکیبات حساس به حرارت برتری دارد، اما هزینه اولیه بالاست (Minaei, 2012; Taghinezhad, 2018). خشک کردن ترکیبی^۴ مانند مایکروویو-هوای گرم، مادون قرمز-هوای گرم، یا مایکروویو-مادون قرمز برای افزایش راندمان و کیفیت خشک کردن پیشنهاد شده‌اند (Sabbaghi, & Nguyen, 2025; Sabzehmeidani, 2021). مطالعات نشان داده‌اند این روش‌ها به حفظ رنگ، آنتی‌اکسیدان و بافت مغز کمک می‌کنند (Daramy, 2021).

¹ Sun drying

² Hot-air dryers

³ Microwave drying

⁴ Hybrid Drying

در روش خشک‌کردن با امواج مادون قرمز^۵ از تشعشعات مادون قرمز برای گرم‌کردن سطح محصول استفاده می‌شود. این روش به‌ویژه برای کاهش مصرف انرژی و حفظ رنگ مغز پسته مفید ارزیابی شده است (Sabbaghi, & Nguyen, 2025; Vahidinia, 2022). در تکنیک خشک‌کردن با هوای متناوب^۶، فازهای گرم‌کردن و توقف به تناوب اجرا می‌شود تا استرس حرارتی کاهش یافته و راندمان افزایش یابد. برای محصولاتی مانند پسته، کاهش آسیب حرارتی و حفظ کیفیت بافت از مزایای این روش است (Babajani, 2021). خشک‌کردن با خلأ^۷ که در خلأ انجام می‌شود، دمای تبخیر آب را کاهش داده و برای محصولات حساس مانند مغز پسته کاربردی است. اگرچه هزینه‌بر است، اما کیفیت محصول نهایی بسیار بالا باقی می‌ماند (Basiri, 2017). در روش خشک‌کردن با بستر سیال^۸، هوای گرم با فشار بالا از میان ذرات عبور داده می‌شود. سرعت و یکنواختی خشک‌کردن بالا بوده و برای تولید صنعتی پیشنهاد شده است (Zare, 2020).

بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن پسته برای حفظ کیفیت و افزایش ماندگاری، نیازمند مدل‌سازی ریاضی دقیق و کارآمد است. این امر، با توجه به پیشرفت‌های تکنولوژیک در این حوزه، اهمیت بیشتری می‌یابد؛ چرا که بدون یک مدل ریاضی قوی برای شبیه‌سازی دقیق

فرآیند، دستیابی به بهینه‌سازی کامل و نتایج مطلوب، حتی با وجود فناوری‌های نوین، میسر نخواهد بود. در طی فرآیند خشک‌کردن پسته، دو پدیده انتقال حرارت به مغز پسته و انتقال رطوبت از آن، به‌طور همزمان روی می‌دهند. این دو پدیده، علاوه بر هم‌زمانی، وابستگی متقابل شدیدی داشته و تحت‌تأثیر عوامل متعددی قرار دارند. از جمله این عوامل می‌توان به نوع پسته (شامل رقم و ویژگی‌های خاص آن)، ضخامت پوسته (که بر سرعت انتقال حرارت و رطوبت مؤثر است)، دما و سرعت جریان هوای خشک‌کن، رطوبت نسبی هوا (که میزان تبخیر رطوبت از پسته را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد)، و شرایط اولیه محصول (مانند میزان رطوبت اولیه) اشاره نمود (Aghdam, 2020; Salehi, 2022). با عنایت به پیچیدگی و تعامل این عوامل، انتخاب مدل ریاضی مناسب و دقیق، برای تخمین انتقال همزمان حرارت و رطوبت در خشک‌کردن پسته، به‌عنوان یک ابزار علمی و مهندسی ضروری است که می‌تواند به کنترل کیفیت محصول، کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری فرآیند منجر شود.

⁵ Infrared Drying

⁶ Intermittent Drying

⁷ Vacuum Drying

⁸ Fluidized Bed Drying

مواد و روش‌ها

مدل‌سازی سینتیکی فرآیند خشک‌کردن

تجربی و نیمه‌تجربی دقت قابل قبولی در پیش‌بینی رفتار خشک‌کردن دارند، اما مدل‌های بر پایه مکانیسم انتقال جرم و حرارت، به دلیل در نظر گرفتن پارامترهای فیزیکی مؤثر، از دقت بالاتری برخوردارند (Aghbashlo, & Ghasemi, 2009; Togrul & Pehlivan, 2004). با این حال، پیچیدگی محاسباتی و نیاز به اطلاعات دقیق در مورد خواص فیزیکی ماده، استفاده از این مدل‌ها را محدود می‌کند.

مطالعات متعددی به بررسی سینتیک فرآیند خشک‌کردن و ارائه مدل‌های ریاضی پرداخته‌اند (Sabbaghi, & Nguyen, 2025; Sabzehmeidani, 2021). جدول ۱ مهم‌ترین مدل‌های ریاضی مقایسه شده در ایران و ترکیه را نشان می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهند که مدل‌های

جدول ۱- مهم‌ترین مدل‌های ریاضی مقایسه شده در ایران و ترکیه

ردیف	نام مدل	معادله ارائه شده برای مدل
۱	دو پارامتری ^۹	$MR = a \exp(-bt) + c \exp(-dt)$
۲	بیج	$MR = \exp(-kt^n)$
۳	هندرسون و پابیس اصلاح‌شده ^{۱۰}	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$
۴	هندرسون و پابیس ^{۱۱}	$MR = a \exp(-kt)$

اصلاح‌شده، هندرسون و پابیس، هندرسون و پابیس اصلاح‌شده، و مدل لگاریتمیک) در سه دمای مختلف (۳۶، ۴۰ و ۴۸ درجه سانتی‌گراد) مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. همچنین، میزان رطوبت موجود در پسته‌ها به وسیله رابطه ۱ اندازه‌گیری شد تا تغییرات رطوبت در طول فرآیند خشک‌کردن به دقت ثبت شود. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از شاخص‌های آماری شامل ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و مجموع مربعات خطا (SSE) (روابط ۲ و ۳) این پژوهش، به طور خلاصه

در پژوهشی که در کشور ترکیه انجام شد (Balbay & Sahin, 2013)، محققان به بررسی اثر استفاده از امواج مایکروویو بر فرآیند خشک‌کردن دو رقم پسته با عملکرد بالا، یعنی ارقام سیریت (Sirit) و آنتپ (Antep) پرداختند. این مطالعه به طور ویژه به بررسی چگونگی خشک‌کردن این دو رقم پسته با استفاده از تکنولوژی مایکروویو متمرکز بود (شکل ۱). در پژوهش، از مدل‌سازی ریاضی به منظور بررسی دقیق‌تر فرآیند خشک‌کردن استفاده شد. مدل‌سازی ریاضی بر پایه مدل‌های (شش مدل ریاضی (نیوتن، بیج، بیج

⁹ Two term

¹⁰ Modified Henderson and Pabis

¹¹ Henderson and Pabis

هادی کریمی و همکاران: مروری بر مدل‌های ریاضی مورد استفاده در فرآیندهای خشک‌کردن انواع پسته... ۷

رابطه ۲ و ۳

$$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{ei} - MR_{pi})^2$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{ei} - MR_{pi})^2 \right]^{1/2}$$

که در آن:

MR_{ei} مقدار رطوبت تجربی

MR_{pi} مقدار رطوبت پیش‌بینی شده

N اعداد مشاهدات،

SSE مجموع مربع برآوردهای خطا^{۱۲}

$RMSE$ خطای جذر میانگین مربعات^{۱۳}

در جدول ۳ ارائه شده است تا امکان مقایسه و بررسی آسان‌تر یافته‌ها فراهم شود.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

رابطه ۱

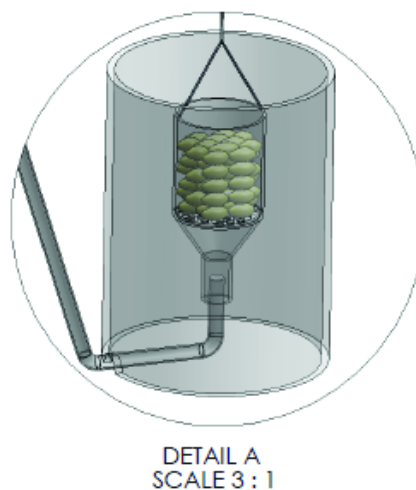
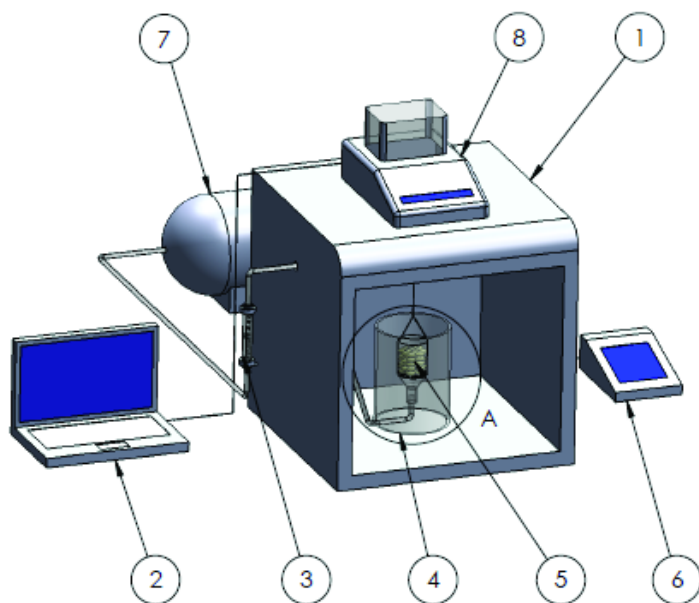
که در آن:

MR رطوبت پایه پسته

M_e = رطوبت تعادلی

M_t = رطوبت در زمان مشخص

M_0 = رطوبت اولیه



شکل ۱- نمای شماتیک از چیدمان ماکروویو استفاده شده در کشور ترکیه: ۱. اجاق مایکروویو، ۲. Notebook، ۳. جریان‌سنج، ۴. لوله شیشه‌ای، ۵. درپوش خشک‌کن، ۶. واحد ورودی داده‌ها، ۷. کمپرسور هوا، ۸. ترازوی دیجیتال (Balbay & Sahin, 2013).

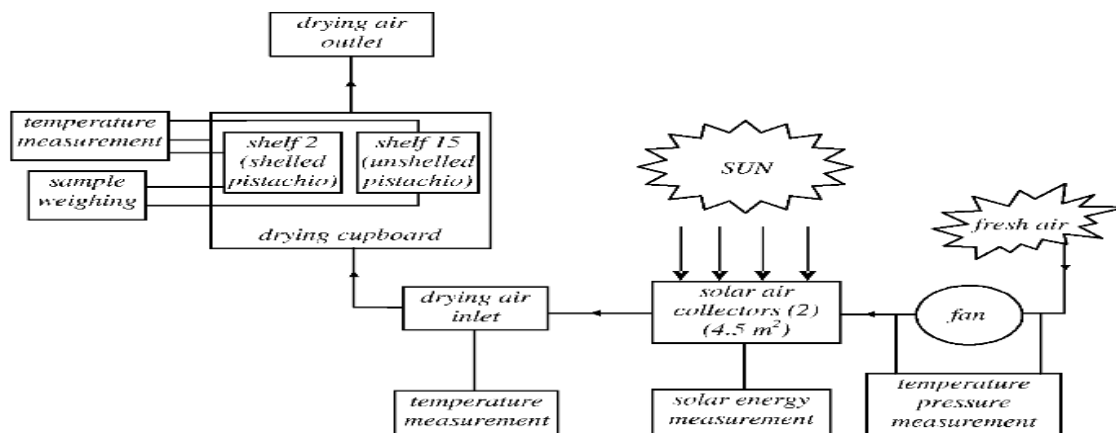
^{۱۲} Sum of Squares Error

^{۱۳} Root Mean Square Error

به‌عنوان روش اصلی خشک‌کردن پسته‌ها استفاده شد (Midilli & Kucuk, 2003). در واقع، پسته‌ها در معرض نور مستقیم خورشید قرار گرفتند تا رطوبت خود را از دست بدهند. یک شماتیک از این فرآیند خشک‌کردن ویژه، به‌صورت تصویری در (شکل ۲) نشان داده شده است. این شماتیک، مراحل و چگونگی انجام فرآیند خشک‌کردن آفتابی پسته را به تفصیل نشان می‌دهد. افزون بر این، مدل‌های مختلف ریاضی که برای توصیف فرآیند خشک شدن مورد استفاده قرار گرفتند، در جدول ۲ معرفی شده‌اند. این جدول شامل جزئیاتی در مورد ساختار و پارامترهای هر یک از مدل‌های مورد استفاده است.

با در نظر گرفتن نتایج در میان مدل‌های مورد بررسی مدل هندرسون و پاییس اصلاح‌شده جهت توصیف فرآیند خشک‌شدن مناسب بود. ضریب تصحیح این روش برای Sirit و AnTep به‌ترتیب بین ۰/۹۹۲۹ تا ۰/۹۹۹ و ۰/۹۹۴ تا ۰/۹۹۹۶ گزارش شد که SEE و RMSE برای رقم Sirit و AnTep به‌ترتیب در محدوده ۰/۰۰۰۲۰۰۳ تا ۰/۳۹۳۹ و ۰/۰۰۶۷۲۲ تا ۰/۱۴۸۳ گزارش شد.

در یک پژوهش جداگانه که در کشور ترکیه انجام شد، محققان به بررسی پسته‌های خریداری شده از بازار محلی پرداختند. در این مطالعه، از روش خشک‌کردن آفتابی



شکل ۲- طرح‌واره خشک‌کردن آفتابی (Midilli & Kucuk, 2003).

جدول ۲- مدل‌های مورد بررسی در کشور ترکیه در خشک کن آفتابی (Midilli & Kucuk, 2003)

ردیف	نام مدل	معادله ارائه شده برای مدل
۱	نیوتن یا لونیس	$MR = \exp(-kt)$
۲	پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$
۳	پیچ اصلاح شده	$MR = \exp(-(kt)^n)$
۴	هندرسون و پابیس ^{۱۴}	$MR = a \exp(-kt)$
۵	لگاریتمیک	$MR = a \exp(-kt) + c$
۶	دو پارامتری	$MR = a \exp(-bt) + c \exp(-dt)$
۷	دو پارامتری نمایه ای	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$
۸	وانگ و سینگ	$MR = 1 + at + bt^2$

برای اندازه‌گیری میزان رطوبت پسته از روابط ۴ و ۵ استفاده شد. ثابت‌ها و مقادیر r و X^2 به‌دست‌آمده در پژوهش در جدول ۳ آمده است.

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n}$$

رابطه ۵

که در آن:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

رابطه ۴

که در آن:

MR_{exp} = مقدار رطوبت تجربی

$MR_{pre,i}$ = مقدار رطوبت پیش‌بینی شده

N = تعداد داده‌ها

n = تعداد تکرار

MR = رطوبت پایه پسته

M_e = رطوبت تعادلی

M_t = رطوبت در زمان مشخص

M_0 = رطوبت اولیه

^{۱۴}Henderson and Pabis

جدول ۳- ثابت‌ها و مقادیر r و X^2 به‌دست‌آمده (Midilli & Kucuk, 2003)

X^2	r	مدل
$\times 10^{-3} 1/0.72$	۰/۹۱۵۵	مدل نیوتن ($0/0.579k =$)
$\times 10^{-4} 1/0.70$	۰/۹۹۲۶	مدل پیچ ($0/0.5850, n = 0/0.46k =$)
$\times 10^{-4} 1/0.70$	۰/۹۹۲۶	مدل پیچ اصلاح‌شده ($0/0.5850, n = 0/0.211k =$)
$\times 10^{-4} 4/854$	۰/۹۵۹۰	مدل هندرسون و پاییس ($0/0.465, k = 0/9565a =$)
$\times 10^{-5} 2/697$	۰/۹۹۸۳	مدل لگاریتمیک ^۸ ($0/0.7310, c = 0/4052, k = 0/2670a =$)
$\times 10^{-4} 3/683$	۰/۹۷۹۰	مدل دو-پارامتری ($0/1906, k_1 = 0/2787, b = 0/0.122, k_0 = 0/6915a =$)
$\times 10^{-4} 4/756$	۰/۹۶۶۸	مدل دو-پارامتری نمایی ($0/1560, k = 0/0.589a =$)
$\times 10^{-5} 4/859$	۰/۹۹۶۲	مدل وانگ و سینگ ($0/0.083, b = 0/0.891a = -$)

نتایج و بحث

نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که مدل دو پارامتری، در مقایسه با سایر مدل‌ها دارای ضریب همبستگی بالاتر و کای اسکور کمتری می‌باشد و بهترین تطابق را با داده‌های آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از فرآیند خشک‌کردن پسته دارد. به‌عبارت دیگر، این مدل توانست به‌طور دقیق‌تری رفتار خشک شدن پسته را پیش‌بینی کند. بر پایه نتایج این پژوهش، تخمین زده شد که زمان مورد نیاز برای خشک‌شدن کامل پسته‌ها با استفاده از روش خشک‌کردن آفتابی، تقریباً ۵ روز به طول می‌انجامد. این برآورد می‌تواند به کشاورزان و تولیدکنندگان پسته در برنامه‌ریزی فرآیند خشک‌کردن کمک کند.

در پژوهشی در ایران (Mohammadpour, 2008)، رفتار خشک‌کردن پسته‌های تهیه شده در اندازه یکسان و یکنواخت با استفاده از خشک‌کن بستر سیال بررسی شد و داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌ها، برای مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۳). هدف اصلی، تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، انرژی فعال‌سازی و تحلیل رفتار خشک‌کردن پسته در شرایط دمایی و سرعت هوای مختلف بود. شش مدل ریاضی مختلف شامل: مدل دو پارامتری، مدل نمایی، مدل لگاریتمی، مدل پیچ، مدل پیچ اصلاح‌شده، مدل هندرسون و پاییس برای شبیه‌سازی فرآیند خشک‌کردن بررسی شدند.



شکل ۴- خشک کن بستر سیال در مقیاس آزمایشگاهی (Mohammadpour, 2008)

نتایج مدل‌سازی: در کلیه شرایط دمایی و سرعت جریان هوا، مدل دو پارامتری بهترین برازش را با داده‌های تجربی داشته و به‌عنوان مدل بهینه معرفی شد. در شرایط دمای بالا و سرعت‌های هوای بیشتر، مدل هندرسون و پاییس نیز عملکرد مناسبی داشته است. تحلیل شاخص‌های آماری شامل ضریب تعیین (R^2) و مجموع مربعات خطا (SSE) نشان داد که مدل دو پارامتری با بالاترین مقدار R^2 (تا $1/000$) و کمترین SSE، بهترین پیش‌بینی روند خشک‌کردن را ارائه می‌دهد (شکل ۴). مدل دو پارامتری به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای شبیه‌سازی رفتار خشک‌کردن پسته در خشک‌کن بستر سیال شناخته شد و می‌تواند برای طراحی بهینه و پیش‌بینی فرآیندهای صنعتی خشک‌کردن پسته مورد استفاده قرار گیرد.

میزان رطوبت با استفاده از روابط ۶، ۷ و ۸ تعیین شد.

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن:

$$M_0 = \text{رطوبت اولیه}$$

$$M_{eq} = \text{رطوبت تعادلی}$$

$$M = \text{مقدار متوسط رطوبت نمونه در لحظه توزین}$$

$$RH = \exp \left[\left(\frac{-21065}{RT} \right) \cdot M_{eq}^{-25/1} \right] \quad \text{رابطه ۷}$$

$$M_{eq} = \left[\frac{-21065}{R.T.Ln(RH)} \right]^{8/0} \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن:

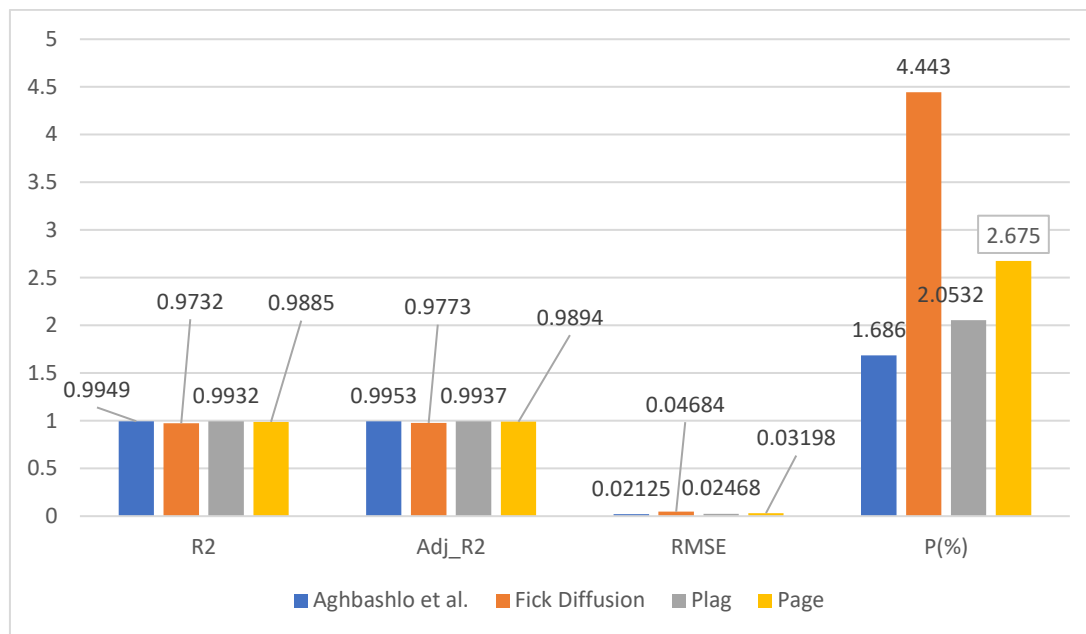
$$RH = \text{رطوبت نسبی هوا}$$



شکل ۴- نمودار مقایسه‌ای میانگین ضریب تعیین (R^2)

در مطالعه‌ای، رفتار خشک کردن پسته رقم کله قوچی در سه روش مختلف شامل خشک کردن سنتی در آفتاب، خشک کردن در سایه و خشک کردن با خشک کن خورشیدی فعال بررسی شد (Mokhtarian, & Tavakolipour, & Kolbasi Ashtari, 2017). برای مدل سازی سینتیکی خشک کردن، ده مدل ریاضی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج مدل سازی با پارامترهای آماری از جمله R^2 ، R^2 تعدیل شده، RMSE و درصد خطای نسبی مقایسه شدند (شکل ۵). مدل آغباشلو و همکاران (Aghbashlo *et al.*, 2009) و مدل تقریب انتشار¹⁵ بهترین برازش را داشتند، به طوری که R^2 آنها به ترتیب برابر ۰/۹۹۵۳ و ۰/۹۹۵۲ گزارش شد. زمان خشک کردن برای پژوهش انجام شده توسط این پژوهشگران با مدل Page ۱۳ ساعت بود که نسبت به روش سنتی آفتاب ۴۸ ساعت و سایه ۱۹ ساعت کاهش چشمگیری داشت.

¹⁵ Approximation of Diffusion



شکل ۵- نتایج مدل‌سازی با پارامترهای آماری از جمله R^2 ، R^2 تعدیل‌شده، RMSE و درصد خطای نسبی (Mokhtarian et al., 2017)

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که انتخاب روش خشک‌کردن و مدل‌سازی مناسب فرآیند نقش کلیدی در کاهش زمان خشک‌کردن، افزایش کیفیت نهایی پسته و بهره‌وری انرژی ایفا می‌کند. در پژوهش، رفتار خشک‌کردن پسته رقم کله‌قوچی در سه روش خشک‌کردن سنتی (در آفتاب و سایه) و خشک‌کردن با سامانه خورشیدی فعال مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی سینتیکی با به کارگیری ۱۰ مدل تجربی و نیمه‌تجربی انجام شد که در میان آن‌ها، مدل‌های آغباشلو و همکاران (Aghbashlo et al., 2009) و تقریب انتشار بهترین برازش را با داده‌های تجربی داشتند (R^2 بیش از ۰/۹۹۵). مقایسه روش‌های مختلف نشان داد که خشک‌کن خورشیدی توانست زمان خشک‌کردن را تا ۱۳ ساعت کاهش دهد، در حالی‌که روش‌های سنتی در آفتاب و سایه به ترتیب ۴۸ و ۱۹ ساعت زمان نیاز داشتند. این کاهش زمان

در کنار حفظ کیفیت رطوبتی و حداقل خطای مدل‌سازی (RMSE کمتر از ۰/۰۲۲) بیانگر کارایی بالای خشک‌کردن خورشیدی در شرایط اقلیمی ایران است. مطالعات پیشین نیز به مزایای خشک‌کردن خورشیدی در بهبود فرآیند خشک‌کردن پسته اشاره داشته‌اند. برای نمونه، تحقیقات (Midilli & Kucuk, 2003; Mohammadpour, 2008) نشان داده‌اند که استفاده از مدل‌های دقیق مانند مدل‌های دو پارامتری و پیچ اصلاح‌شده می‌تواند رفتار خشک‌کردن را به‌درستی شبیه‌سازی کند، به‌ویژه زمانی که از تکنیک‌هایی نظیر خشک‌کن بستر سیال یا ترکیبی (مایکروویو-هوای گرم) استفاده شود. از نظر کیفی، استفاده از سامانه خشک‌کن خورشیدی علاوه بر کاهش زمان فرآیند، موجب افزایش میانگین دمای هوای خشک‌کن تا حدود ۱۱/۵ درجه بیشتر از دمای محیط شد که در نتیجه، آهنگ خشک‌کردن و نرخ تبخیر رطوبت را بهبود بخشید و از رشد قارچ‌ها و تولید آفلاتوکسین‌ها جلوگیری نمود. این موضوع از

نظر ایمنی غذایی نیز اهمیت به سزایی دارد، چرا که آفلاتوکسین‌ها از عوامل اصلی رد محموله‌های صادراتی پسته در بازارهای جهانی هستند (Fao, 2020; Iarc, 2021). در پایان، بهینه‌سازی پارامترهای خشک‌کردن از جمله دمای هوا، رطوبت نسبی، نرخ جریان و مدت زمان خشک‌کردن، بر پایه‌ی مدل‌های دقیق ریاضی، می‌تواند منجر به ارتقا کیفیت نهایی، صرفه‌جویی در انرژی، کاهش ضایعات و افزایش توان رقابت‌پذیری پسته ایران در بازارهای جهانی گردد (Aghdam, 2020; Esmailzadeh & et al., 2020; Sabzehmeidani, 2021)

REFERENCES

- Aghbashlo, M., Kianmehr, M., Khani, S., & Ghasemi, M. 2009. Mathematical modelling of thin-layer drying of carrot. *International Agrophysics*, 23(4), 313–317.
- Aghdam, M. S. 2020. Postharvest physiology and biochemistry of pistachios. *Postharvest Biology and Technology*, 166, 111205.
- Aghdam, M. S., Akbarabadi, A., & Mobli, H. 2020. Postharvest physiology and biochemistry of pistachios. *Postharvest Biology and Technology*, 166, 111205. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111205>.
- Babajani, A. 2021. Intermittent drying effect on pistachio quality. *Journal of Food Process Engineering*, 44(4), e13630.
- Balbay, A., & Sahin, O. 2013. Drying of pistachios by using a microwave assisted dryer. *Acta Scientiarum. Technology*, 35(2), 263–269.
- Basiri, M. H. 2017. Vacuum drying for nuts: Performance analysis. *Journal of Food Science and Technology*, 54(10), 3090–3099.
- Daramy, V. 2021. Quality retention in infrared-hot air drying of nuts. *Food and Bioproducts Processing*, 127, 190–201.
- Dreher, M. L. 2012. Pistachio nuts: Composition and potential health benefits. *Nutrition Reviews*, 70(4), 234–240.
- Doymaz, I. 2014. *Drying kinetics and thermal degradation of phenolic compounds and anthocyanins in pomegranate arils*. *International Journal of Food Science and Technology*, 49(2), 595–605.
- Doymaz, I. 2020. *Effect of drying methods and storage conditions on phytochemicals and antioxidant activity of fruits: a review*. *Journal of Food Quality*.

- Fao. 2021. *Preventing aflatoxin contamination in nut crops*. *FAO Bulletin No. 123*. Retrieved from
- Fao. 2022. Nut crops production statistics. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Farahnaky, A. 2017. Comparison of cabinet and hot-air drying. *Drying Technology*, 35(5), 609–617.
- Gentile, C., & et al. 2020. Nutritional and health properties of pistachios. *Nutrients*, 12(3), 870.
- Ghanbarzadeh, B. 2020. Enzymatic browning in nuts during storage. *LWT*, 117, 108674.
- Ghanbarzadeh, B., & et al. 2020. Enzymatic browning in nuts during storage. *LWT - Food Science and Technology*, 117, 108674.
- Ghasemi, M. 2019. Traditional shade drying of pistachios. *Iran Agricultural Research*, 38(2), 105–115.
- Gulati, S., & et al. 2019. Pistachios and cardiovascular health: A systematic review. *Nutrients*, 11(8), 1938.
- Iarc. 2020. *Monographs on aflatoxins. Volume 125*. Retrieved from
- Iran Pistachio, A. 2023. *Export reports and economic value of Iranian pistachios*. Retrieved from
- Jannatizadeh, A. 2019. Quality characteristics of dried pistachios. *Iran Journal of Food Science and Technology*, 16(2), 109–120.
- Khoshgoftarmanesh, A. H., & et al. 2021. Iran's global position in pistachio production and export. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 19(2), 102–108.
- Khoshtaghaza, M. H. 2010. Sun drying of pistachios. *Drying Technology*, 28(4), 530–538.
- Marín, S., Ramos, A. J., & Sanchis, V. 2012. Modelling *Aspergillus flavus* growth and aflatoxin production in pistachio nuts. *International Journal of Food Microbiology*, 32(2), 378–388.
- Midilli, A., & Kucuk, H. 2003. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy conversion and Management*, 44(7), 1111–1122. doi: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00099-7](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00099-7).
- Minaei, S. 2012. Industrial applications of microwave drying. *Biosystems Engineering*, 113(2), 166–172.
- Mohammadi, M. 2022. Nutritional quality and storage stability of pistachios. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(7), e16602.
- Mohammadpour, K. V. H., Mousavian Mt Etemadi, Ahmad. 2008. Determination of effective diffusivity coefficient and activation energy of shelled pistachio by using fluidized bed dryer.
- Mohammadi Moghaddam, T., Razavi, S. M. A., Taghizadeh, M., & Sazgarnia, A. 2016. Sensory and instrumental texture assessment of roasted pistachio nut/kernel by partial least square (PLS) regression analysis: effect of roasting conditions. *Journal of Food Science and Technology*, 53(1), 370–380. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2054-2>.

- Mokhtarian, M., Tavakolipour, H., & Kolbasi Ashtari, A. 2017. Drying kinetic modelling of Kalle-Ghuchi cultivar pistachio nut using different methods: solar, sun and shade drying. *Food industry research*, 26(4), 627–663.
- Nasrnia, F. 2023. Evaluation of industrial pistachio dryers. *Thermal Science and Engineering Progress*, 39, 101554.
- Niakousari, M. 2013. Microwave drying of pistachios. *International Journal of Food Engineering*, 9(1), 55–63.
- Sabbaghi, H., & Nguyen, N. P. 2025. Infrared Drying in Food Technology: Principles and Practical Insights.
- Sabzehmeidani, M. M. 2021. Hybrid drying methods for pistachios. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(3), 2965–2974.
- Salehi, F. 2022. Review of pistachio drying methods. *Journal of Food Process Engineering*, 45(1), e13932.
- Shakerardekani, A., & Karim, R. 2012. Effect of packaging films on the moisture and aflatoxin contents of pistachio nuts during storage. *Journal of Food Science and Technology*, 50(2), 409–411.
- Taghinezhad, E. 2018. Heat and mass transfer in microwave drying of pistachios. *Heat and Mass Transfer*, 54(4), 1055–1064.
- Tavakoli, M. 2010. Energy consumption in hot-air pistachio dryers. *Energy*, 35(12), 4917–4923.
- Toğrul, İ. T., & Pehlivan, D. 2004. Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of food Engineering*, 65(3), 413–425.
- Usda. 2021. *National Nutrient Database for Standard Reference*.
- Vahidinia, A. 2022. Infrared drying evaluation in nut processing. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147, 1909–1920.
- Vega-Gálvez, A., Di Scala, K., Rodríguez, K., Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., López, J., Perez-Won, M. 2023. *Thermal degradation of bioactive compounds during drying process of horticultural and agronomic products: A comprehensive overview*. *Agronomy*, 13(6), 1580. doi:10.3390/agronomy13061580.
- World Health Organization (WHO). 2018. Aflatoxins and food safety (Food Safety Digest No. WHO/NHM/FOS/RAM/18.1). Retrieved from <https://www.who.int/foodsafety/food-safety-digest-aflatoxins-EN.pdf?ua=1>.
- Zare, D. (2020). Fluidized bed drying of pistachios. *Drying Technology*, 38(10), 1339–1349.