



مدل سازی عددی خشک کن پسته توسط هیترهای تابشی کاتالیستی

وحید ابراهیم پور^{1*}، کاظم اسماعیل پور²

1- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، مرکز تحقیقات انرژی های تجدید پذیر، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران

2- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی های تجدیدپذیر، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران

* تهران، صندوق پستی 1415894798، v_er95damavand@yahoo.com

چکیده

نحوه خشک کردن پسته با رعایت استانداردهای جهانی به طور چشمگیری در حال توسعه است. کشور ایران را می توان جزء پنج تولیدکننده اول پسته در جهان دانست. برای حفظ ارزش غذایی پسته به مدت طولانی و همچنین جلوگیری از فاسد شدن آن، باید پسته ابتدا خشک و سپس نگهداری شود. روش های مختلف خشک کردن پسته اغلب بر روی طعم و کیفیت آن تاثیرگذار است. از این رو در این مقاله روش جدیدی برای خشک کردن پسته بر اساس هیترهای کاتالیستی پیشنهاد شده است. در این پژوهش به مدل سازی عددی یک دستگاه خشک کن پسته با استفاده از هیترهای کاتالیستی به عنوان جدیدترین تکنولوژی احتراقی دارای بازدهی بالا پرداخته شده است. هدف اصلی در این پژوهش ارزیابی یک مدل ریاضی به منظور بررسی نحوه اثرگذاری پارامترهای مختلف کارکردی هیتر کاتالیستی بر روی میزان چروکیدگی پسته های خشک شده که نشان دهنده کیفیت خشک کردن محصول می باشد، است. نتیجه این تحقیق به دنبال پاسخگویی به این سوال است که آیا با استفاده از هیتر کاتالیستی می توان پسته خشک شده با کیفیت بالا در مقایسه با دیگر روش های خشک کردن به دست آورد یا خیر؟ نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی نشان دهنده کیفیت بسیار مطلوب پسته خشک شده با روش هیتر کاتالیستی می باشد. استفاده از هیتر کاتالیستی منجر به افزایش سرعت خشک کردن پسته شده است. افزایش سرعت هوای ورودی به خشک کن باعث کاهش شدت خشک کردن و افزایش دمای ورودی به سیستم، باعث افزایش سرعت خشک شدن پسته شده است.

کلیدواژه ها: خشک کردن، پسته، هیتر کاتالیستی، حرارت، مدل سازی حرارتی، چروکیدگی

Numerical Modeling of Pistachio Dryer by Catalytic Radiant Heaters

Vahid Ebrahimpour^{1*}, Kazem Esmaeilpour²

1- PhD Candidate, Renewable Energy Research Center, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, Iran

2- Assistant Professor, Renewable Energy Research Center, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, Iran

* P.O.B. 1415894798 Tehran, Iran, v_er95damavand@yahoo.com

Received: 08 August 2023 Accepted: 28 May 2024

Abstract

The method of drying pistachios in compliance with international standards is developing significantly. Iran can be considered one of the top five producers of pistachios in the world. To preserve the nutritional value of pistachios for a long time and also to prevent them from spoiling, pistachios should be dried first and then stored. Different methods of pistachio drying often affect its taste and quality. Therefore, in this article, a new method for drying pistachios based on catalytic heaters is proposed. In this research, the numerical modeling of a pistachio dryer using catalytic heaters as the latest combustion technology with high efficiency has been discussed. The main goal of this research is to evaluate a mathematical model in order to investigate the effect of various functional parameters of the catalytic heater on the amount of shrinkage of dried pistachios, which indicates the drying quality of the product. The result of this research seeks to answer the question whether it is possible to obtain high-quality dried pistachios by using a catalytic heater compared to

other drying methods. The results obtained from the numerical modeling show the very favorable quality of dried pistachios with the catalytic heater method.

Keywords: Drying, pistachio, catalytic heater, heat, thermal modeling, shrinkage

آفلاتوکسین و خصوصیات ظاهری پسته (خندان بودن و رنگ پوست استخوانی) و بسته‌بندی مناسب از فاکتورهای مهم در این زمینه محسوب می‌شود [14]. پسته ایران به دلیل شرایط مناسب اقلیمی مرغوبیت بالایی دارد و تسریع در فرآوری بعد از برداشت به ویژه مراحل پوست‌گیری و خشک کردن اهمیت زیادی در کیفیت آن دارد. بهینه‌سازی مراحل مختلف فرآوری پسته نقش قابل توجهی در دستیابی به کیفیت مطلوب، افزایش صادرات و درآمد ارزی کشور دارد. خشک کردن یکی از مراحل مهم فرآوری پسته است. هدف اصلی در فرآیند خشک کردن تولید محصول خشک شده با کیفیت مطلوب، حداقل قیمت و بازدهی بالا است [13]. کیفیت خوب بیولوژیکی محصول، اغلب نتیجه چند تغییر فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است.

صالحی و همکاران [15]. به بررسی خشک کردن قارچ با استفاده از سیستم ترکیبی مادون قرمز-هوای گرم پرداختند. آنها تاثیر استفاده از منبع حرارتی مادون قرمز با توان 150، 250 و 375 وات و هوای گرم با دماهای 50، 60 و 70 درجه سانتی‌گراد و نرخهای 1، 2 و 3 متر بر ثانیه را بر روی خشک کردن قارچ مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که با افزایش توان منبع مادون قرمز نرخ خشک شدن در حدود 10/3٪ افزایش می‌یابد و با افزایش دمای هوای گرم و نرخ هوای گرم کاهش وزنی معادل 13/9٪ رخ می‌دهد. سپس آنها با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی سیستم ارایه شده بر اساس چهار متغیر توان منبع مادون قرمز، دما و نرخ هوای گرم و زمان خشک شدن پرداختند. در پژوهشی دیگر، کایران و دویماز [16] به بررسی خشک کردن به کمک امواج مادون قرمز و بررسی میزان نفوذ و توان تابش مادون قرمز بر روی فرآیند خشک کردن زردآلو پرداختند. آنها فرآیند خشک کردن را برای منبع‌های تابش مادون قرمز با توان‌های 62، 74، 88 و 104 وات بررسی کردند. آنها نشان دادند که فرآیند خشک کردن به شدت تابعی از پیش تسویه و توان منبع مادون قرمز است. آنها از مدل لایه نازک برای مدل‌سازی فرآیند خشک کردن استفاده کردند. همچنین از قانون دوم فیک برای مدل‌سازی پخش رطوبت استفاده کردند.

صالحی و همکاران [17] به مدل‌سازی فرآیند خشک کردن توت فرنگی با استفاده از روش خشک کن مادون قرمز پرداختند و از روش الگوریتم ژنتیک- شبکه‌های عصبی برای بهینه‌سازی فرآیند استفاده کردند. آنها تاثیر توان منبع تابش مادون قرمز و فاصله توت فرنگی تا منبع مادون قرمز را بررسی کردند و نشان دادند که حداقل 110 دقیقه برای خشک کردن زمان لازم است. آنها نشان دادند که با افزایش توان منبع مادون قرمز و کاهش فاصله، نرخ خشک کردن افزایش می‌یابد. آنها نشان دادند که با افزایش توان منبع مادون قرمز از 150 وات به 375 وات میزان نرخ خشک کردن در حدود 69/24٪ افزایش می‌یابد. ابولتین و همکاران [18] به بررسی خشک کردن سبزیجات با استفاده از خشک کن مادون قرمز پرداختند. آنها در پژوهش خود به بررسی فرآیند خشک کردن هویج و سیر تازه پرداختند و نشان دادند که مدت زمان خشک کردن با استفاده از این روش کاهش می‌یابد. بررسی خشک کردن پسته و خشک‌کار با استفاده از این روش نشان داد که مدت زمان و مقدار انرژی صرف شده کاهش پیدا کرد [19-37]. محققان مختلفی [38-44] به بررسی اثرات

1- مقدمه

واژه خشک کردن به طور کلی به خارج کردن رطوبت از مواد جامد، مایع و یا گاز اطلاق می‌شود [1]. در بین کلیه واحدهای صنعتی، شاید بتوان گفت که عملیات مربوط به خشک کردن مواد بیشترین کاربرد را دارد [2]. مکانیزم خشک کردن مواد و طراحی دستگاه‌هایی که در مقیاس صنعتی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [1]. در اکثر عملیات تولید مواد به ویژه در صنایع شیمیایی، دارویی و غذایی در یک یا چند مرحله عملیات خشک کردن در یکی از اشکال متنوع آن به کار می‌رود. در بیشتر فرآیندهای صنعتی خشک کردن محصول به خاطر حداقل یکی از دلایل زیر است [3-5]: کاهش هزینه انتقال، افزایش مدت نگهداری، پیشگیری از فاسد شدن، چروکیده شدن، شکستن، چسبیدن مواد به هم، تغییر طعم، مزه، بو و رنگ. به بیان دیگر خشک کردن به منظور افزایش کیفیت و یا حفظ کیفیت مواد غذایی انجام می‌شود. آنالیز تئوری و همچنین طراحی سیستم خشک کردن به دلیل انتقال جرم و حرارت از سطح آن، مکانیزم‌های متفاوت انتقال رطوبت درون جامد و در نظر گرفتن چروکیدگی در برخی از مسایل، پیچیده و دشوار است [6]. یکی از روشهای جدید خشک کردن، استفاده از هیترهای کاتالیستی یا همان هیترهای بدون شعله است. احتراق بدون شعله ضمن ایجاد احتراقی یکنواخت در سراسر فضای داخل محفظه احتراق و کاهش چشمگیر آلاینده‌ها، موجب افزایش بازدهی احتراق می‌شود. احتراق بدون شعله، تحت شرایط پیش گرم اکسید کننده تا دمای بالا و رقیق‌سازی هوا جهت کاهش درصد اکسیژن موجود در منطقه واکنش، شکل می‌گیرد. اساس این شرایط احتراقی به تئوری وینبرگ تحت عنوان احتراق با آنتالپی اضافه که در سال 1971 مطرح شد، بر می‌گردد [3-4]. در این شرایط افزایش دما باید در اثر احتراق کمتر از دمای خود اشتعالی باشد [7-11].

پسته گونه‌ای از میوه درختی است که در کشورهایی مثل ایران، آمریکا، ترکیه، چین و سوریه رشد می‌کند. طبق آمارها میزان مصرف جهانی پسته حدود 600 تا 700 هزارتن در سال است، که برای تامین بازار جهانی بین ایران و آمریکا رقابت تنگاتنگی وجود دارد [12]. در سال 2013 میلادی ایران با تولید 470 هزارتن پسته در رتبه اول و آمریکا با تولید 200 هزارتن در رتبه دوم تولید پسته قرار گرفتند [13]. این در حالی است که در سال 2014 میلادی آمریکا با تولید 360 هزارتن در رتبه اول و ایران با تولید 200 هزارتن در رتبه دوم جای گرفت [13]. در این بین کشورهایی مانند ترکیه، چین و سوریه موفق به برداشت پسته شدند که در مقایسه با حجم تولید شده توسط ایران و آمریکا اندک است. لازم به ذکر است که بعد از سال 2014 میلادی همواره میزان تولید پسته آمریکا بیش از ایران بوده و همواره آمریکا در جایگاه نخست تولید پسته در جهان و ایران در جایگاه دوم قرار داشته است. ارزش غذایی بالای پسته باعث گسترش مصرف آن به صورت خام و پخته شده در نقاط مختلف جهان شده است. افزایش کیفیت بهداشتی و پایین بودن میزان

$$k = k_0 \exp\left(\frac{\Delta H_k}{RT}\right) \quad (8)$$

$$\Delta H_c = H_m - H_n \quad (9)$$

$$\Delta H_k = H_l - H_n \quad (10)$$

برای محاسبه کردن ضریب انتقال جرم تا کنون معادله‌های متعددی توسعه داده شده است. از مهمترین این معادله‌ها می‌توان به رابطه اوزیشیک اشاره کرد که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

$$sh = 2 + \left(0.4Re^{0.5} + 0.06Re^{\frac{2}{3}}\right) Sc^{0.4} \quad (11)$$

$$\frac{k_G P_t}{G_M} Sc^{0.56} = 0.218Re^{-0.4} \quad (12)$$

$$h = \frac{Fl}{cD_{AB}} \rightarrow k_y = FM_B \rightarrow k_y = k_G P_t \quad (13)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} \quad (14)$$

ضریب نفوذ رطوبتی تابعی از مقدار رطوبت و دما است. مقدار ضریب نفوذ رطوبت را می‌توان با استفاده از داده‌های تجربی محاسبه کرد. برای نمونه پسته، رابطه تجربی زیر ارائه شده است:

$$D_{eff} = 0.126 \exp\left(\frac{-5969.3}{T_{abs}}\right) \exp\left(-\left(8.108 \times 10^{-3} T_{abs} - 2.55\right)X\right) \quad (15)$$

مقدار چگالی ذرات در طی فرآیند خشک شدن با استفاده از داده‌های تجربی محاسبه می‌شود. برای ذرات پسته رابطه تجربی زیر پیشنهاد شده است:

$$\rho_s = 967.7 \left(\frac{X}{X_0}\right)^{0.0071} \quad (16)$$

به منظور محاسبه کردن توزیع رطوبت در فاز جامد و از دیدگاه میکروسکوپی از معادله‌های زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial y}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial x}\right) + Q_{IR} = \rho_s c_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (17)$$

شرط مرزی و شرط اولیه برای معادله فوق به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$t = 0. \quad T = T_0 \quad (18)$$

$$t > 0. \quad x = 0 \quad \text{or} \quad \frac{\Delta T}{\Delta x} = 0 \quad (19)$$

$$\bar{T}_a = \frac{(T_a|z + T_a|z + dz)}{2} \quad (20)$$

ضریب هدایت حرارتی ذرات جامد از رابطه تجربی زیر محاسبه می‌شود:

$$k_s = 0.0055 \left(\frac{X}{1+X}\right) + 0.0084 \left(100 - \frac{X}{1+X}\right) \left(\frac{j}{ms^{\circ}C}\right) \quad (21)$$

ظرفیت حرارتی ذرات جامد از رابطه تجربی زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{ps} = 0.00419 \left(\frac{X}{1+X}\right) + 0.0084 \left(100 - \frac{X}{1+X}\right) \left(\frac{kJ}{kg^{\circ}C}\right) \quad (22)$$

انتالپی تبخیر ذرات جامد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$h_{fg} = 0.335 \left(\frac{X}{1+X}\right) \left(\frac{kJ}{kg}\right) \quad (23)$$

مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی فاز گاز را می‌توان با کمک روش تشابه جرم و حرارت و با استفاده از رابطه زیر به دست آورد:

$$Nu = 2 + \left(0.4Re^{0.5} + 0.06Re^{\frac{2}{3}}\right) Pr^{0.4} \quad (24)$$

$$Nu = \frac{hl}{k_s} \cdot Pr = \frac{C_p \mu}{k_s} \quad (25)$$

دما و ارتعاش در فرایند خشک کردن پرداختند و نشان دادند که سرعت کاهش رطوبت با افزایش دما و ارتعاش افزایش و زمان خشک کردن کاهش می‌یابد. با توجه به بررسی تحقیقات اخیر، در خصوص خشک کردن مواد غذایی و میوه‌ها، این پژوهش با توجه به خلاء تحقیقاتی در زمینه خشک کردن پسته و با در نظر داشتن رویکرد ارتقاء کیفیت محصول و حفظ ارزش غذایی، بهینه‌سازی انرژی، بومی‌سازی و افزایش سرعت خشک کردن، انجام شده است. در این راستا یک مدل ریاضی توسط نرم افزار فلوئنت و بر اساس داده‌های تجربی استخراج شده در این پژوهش، مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفته است.

2- معادلات حاکم

به منظور مدل‌سازی خشک کردن پسته با استفاده از هیترهای تابشی کاتالیستی، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:

- اثرگذاری هدایت حرارتی و نفوذ در راستای عمودی در قیاس با اثرگذاری جابجایی حرارتی در این راستا قابل چشم پوشی می‌باشد.
 - از لحاظ هدایت حرارتی، دیواره خشک کن، عایق در نظر گرفته می‌شود.
 - فرض می‌شود که ذرات به یکدیگر نمی‌چسبند.
 - فرض می‌شود که ذرات خرد و یا شکسته نمی‌شوند.
 - فرض می‌شود که، اختلاط به صورت کامل صورت می‌گیرد به این معنی که موقعیت مکانی هر ذره در نرخ خشک شدن آن اثر نمی‌گذارد.
 - رطوبت و دمای نمونه‌های خشک شونده در آغاز فرآیند خشک شدن یکنواخت است.
 - در زمان خشک شدن فیلم گازی اطراف ذرات از دیدگاه دما و رطوبت با ذرات در حال تعادل است.
 - هیچ نوع میعانی در داخل خشک کن اتفاق نمی‌افتد.
- معادله‌های حاکم برای شبیه‌سازی شامل انتقال حرارت و انتقال جرم در فاز جامد و گاز می‌باشد. برای به دست آوردن معادله‌های حاکم بر مساله، یک جزء حجمی در نظر گرفته می‌شود و معادلات برای آن محاسبه می‌شود. انتقال جرم در ذرات در راستای ضخامت و به صورت یک بعدی در نظر گرفته شده است. بنابراین میزان رطوبت در فاز جامد از دیدگاه میکروسکوپی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_s D_{eff} \frac{\partial X}{\partial x}\right) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_s X) \quad (1)$$

شرایط مرزی و شرایط اولیه برای رابطه فوق به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$t > 0. \quad x = 0. \quad \frac{\partial X}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$t = 0. \quad X = X_0 \quad (3)$$

$$x = b. \quad -D_{eff} \frac{\partial X}{\partial x} = k_y (\bar{Y}_a - Y_e) \quad (4)$$

$$\bar{Y}_a = \left(\frac{Y_a|z + Y_a|z + dz}{2}\right) \quad (5)$$

با توجه به این که مقدار رطوبت تعادلی در فاز گاز و جامد با هم برابر می‌باشد، به منظور محاسبه رطوبت تعادلی فاز جامد می‌توان از رابطه پیشنهادشده توسط کیرانودیس که به معادله GAB نیز معروف است، به صورت زیر استفاده کرد [14,45,46]:

$$X_e = \frac{(X_m C k a_w)}{[(1 - k a_w)(1 - (1 - C) k a_w)]} \quad (6)$$

$$C = C_0 \exp\left(\frac{\Delta H_c}{RT}\right) \quad (7)$$

عکس دستگاه خشک کن نشان داده شده است. همچنین در شکل (3) تصویر هیتر کاتالیستی ارائه شده است.

در شکل (4) نمودار تغییرات مقدار رطوبت ماده خشک شونده برای سرعت هوای 3/5 متر بر ثانیه، دمای هوای خشک کننده 40 درجه سانتی گراد و توان هیتر کاتالیستی 1500 وات نشان داده شده است. این مشخصات بر اساس تنها تجهیزات هیتر کاتالیستی موجود در بازار داخل کشور (شرکت به فرآوران نوین آریا سرد) و مبتنی بر تجربیات تحقیقات پیشین در نظر گرفته شده است. محور عمودی نشان دهنده رطوبت بدون بعد است که نسبت جرم رطوبت به جرم کل پسته در هر لحظه را نشان می دهد. این منحنی فرایند خشک کردن پسته و کاهش رطوبت بر حسب زمان را نشان می دهد. در شکل (5) نمودار تغییرات مقدار دمای ماده خشک شونده برای سرعت هوای 3/5 متر بر ثانیه، دمای هوای خشک کننده 40 درجه سانتی گراد و توان هیتر کاتالیستی 1500 وات نشان داده شده است.



شکل 2 تصویر دستگاه خشک کن تابشی

مقدار Q_{IR} مقدار گرمای حجمی وابسته به خصوصیات تابشی ماده خشک شونده و توان منبع هیتر کاتالیستی مربوط می باشد. برای محاسبه کردن آن از قوانین تابشی جابجایی وین، استفان بولتزمن و لامبرت استفاده می شود. با توجه به پژوهش های انجام شده توسط پژوهشگران قبلی مقدار گرمای تولید شده در واحد حجم ماده خشک شونده با استفاده از معادله لامبرت به صورت زیر محاسبه می شود [1-5]:

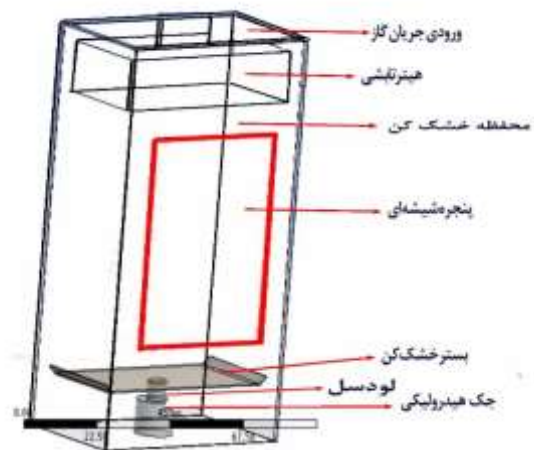
$$Q_{IR} = Q_{Abs} \exp\left(\frac{-k\delta x}{V}\right) \quad (26)$$

3- روش حل معادلات

حل معادله های دیفرانسیل پاره ای حاصل از مدل با استفاده از روش خطی انجام گرفت. در این روش با استفاده از اختلافات محدود معادله های پاره ای به چند معادله دیفرانسیل معمولی تبدیل می شود. در این روش مشتق نسبت به زمان بی تغییر باقی مانده، ولی مشتق نسبت به مکان، به صورت اختلاف محدود نوشته می شود. معادله های حاصل با استفاده از روش رانگ کوتاه مرتبه چهارم حل می شوند.

4- هندسه خشک کن کاتالیستی مورد بررسی

سیستم خشک کن با هیتر کاتالیستی از پنج بخش اصلی تشکیل شده است که عبارتند از: جک هیدرولیکی، لود سل، صفحه بستر، هیتر کاتالیستی و محفظه خشک کن. می توان نمای از هندسه کلی سیستم را در شکل (1) مشاهده نمود. هیتر تابشی کاتالیستی مورد استفاده از نوع FCS-2ft ساخت شرکت دانش بنیان آریا سرد می باشد. ابعاد سطح پنل 80×80 سانتی متر، توان تولیدی آن 3/6 کیلووات معادل 3096 کیلوکالری در ساعت می باشد. میزان گاز مصرفی هیتر 0/336 مترمکعب در ساعت است. لازم به ذکر است که در داخل هیتر تعدادی المنت حرارتی وجود دارد که برای راه اندازی اولیه از این المنت ها استفاده می شود. میزان برق مورد نیاز برای راه اندازی، 486 وات می باشد که نیاز به جریان برق 2/5 آمپر می باشد. در نهایت وزن هیتر تابشی برابر با 4 کیلوگرم می باشد که بر روی پایه هایی که همراه هیتر وجود دارد، نصب می شود.



شکل 1 نمای شماتیک کلی از سیستم خشک کن تابشی

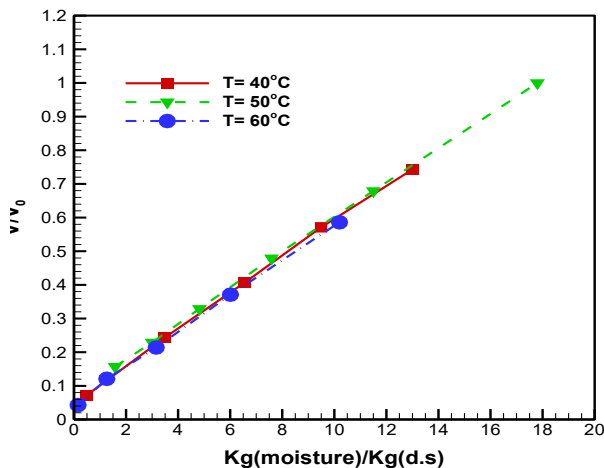
5- اعتبار سنجی مدل عددی

به منظور صحت مدل عددی توسعه داده شده، نتایج به دست آمده از مدل عددی در ادامه با نتایج تجربی به دست آمده مقایسه شده است. در شکل (2)

با توجه به شکل (4) و (5) می توان دریافت که نتایج تجربی با داده های عددی دارای همخوانی بسیار خوبی هستند که این به معنی صحت و دقت مدل عددی است.

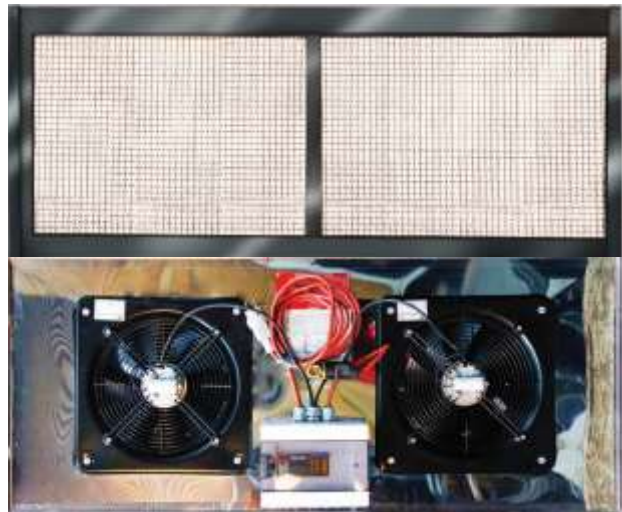
6- نتایج

نتایج حاصل از مدل سازی عددی برای پارامترهای مختلف مدل سازی در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است. تاثیر دمای هوای خشک کننده بر روی مقدار چروکیدگی نمونه پسته در شکل (6) آورده شده است. در تمامی دماهای نشان داده شده، مقدار تغییرات رطوبت بر حسب جرم پسته خشک با چروکیدگی رفتاری خطی دارد.

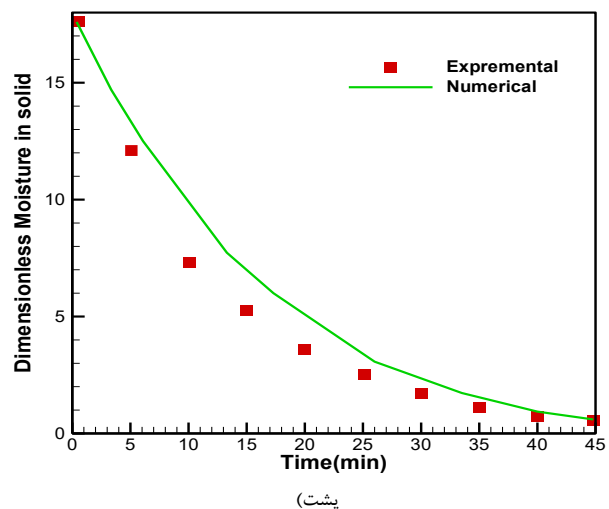


شکل 6 تاثیر دمای هوای خشک شونده بر روی مقدار چروکیدگی نمونه های پسته

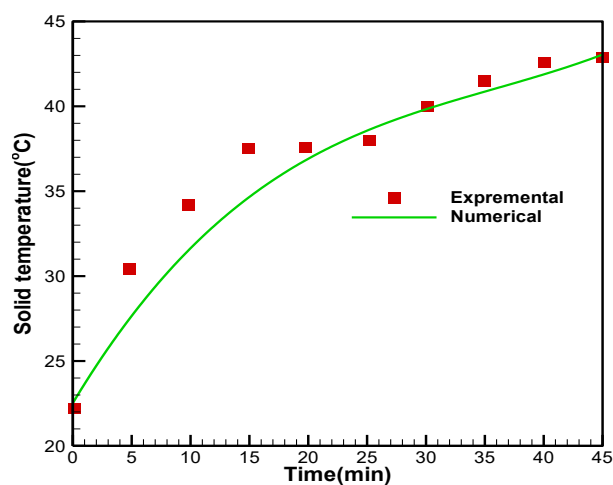
دمای هوای خشک کننده تاثیری بر روی مقدار چروکیدگی نمونه های پسته ندارد. در مقاله حاضر مقدار چروکیدگی به صورت نسبت حجم پسته در هر لحظه به حجم اولیه پسته خام ($\frac{V}{V_0}$) تعریف شده است و حد بالای این مقدار در زمان اولیه 1 است و هر چه مقدار چروکیدگی بیشتر شود این شاخص کوچکتر خواهد شد. برای محاسبه این شاخص از اندازه گیری حجم پسته در زمانهای مختلف به دست می آید. تاثیر سرعت هوای خشک کننده بر روی میزان چروکیدگی نمونه به کمک شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج در شکل (7) نشان داده شده است. رفتاری مشابه با تغییرات خطی شکل های (6) و (7) برای مواد غذایی دیگر در مراجع دیگر قابل مشاهده است [48-47]. با توجه به نتایج ارائه شده می توان دریافت که سرعت هوای خشک کننده نیز تاثیر چندانی بر روی مقدار چروکیدگی نمونه های پسته مورد آزمایش ندارد.



شکل 3 تصویری از هیتر کاتالیستی (شکل بالا نمای روبرو و شکل پایین نمای

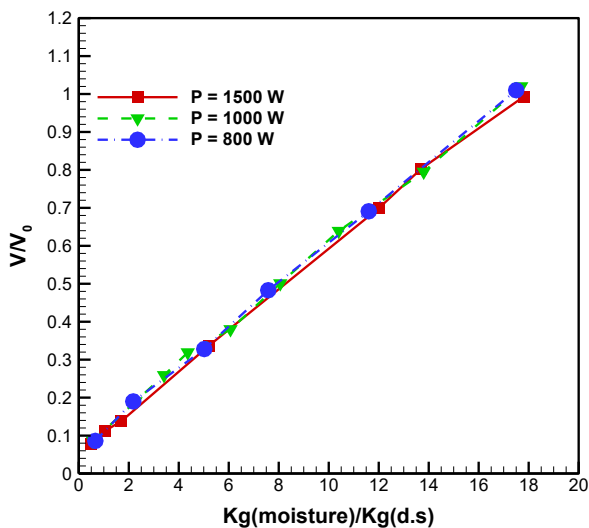


شکل 4 نمودار تغییرات مقدار رطوبت ماده خشک شونده

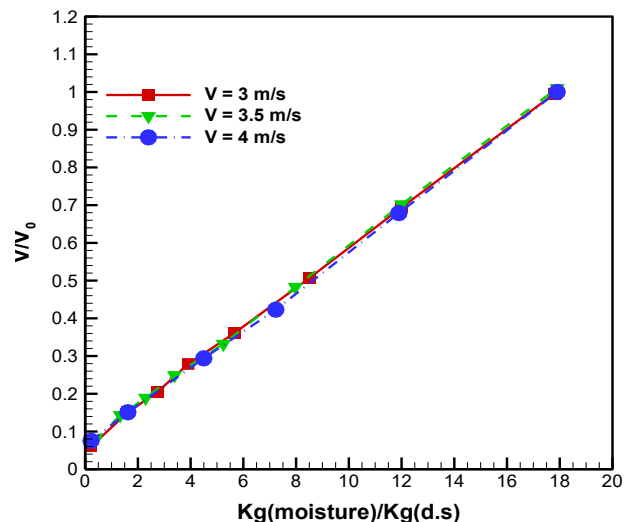


شکل 5 نمودار تغییرات مقدار دمای ماده خشک شونده

خشک شدن برای افزایش دمای 40 درجه به 50 درجه بیشتر مشهود است و تاثیر شدت خشک شدن با افزایش دمای 50 به 60 درجه خیلی زیاد نیست. تغییرات چروکیدگی با شدت خشک شدن رفتاری به شکل یک منحنی غیر خطی از خود نشان می‌دهد.

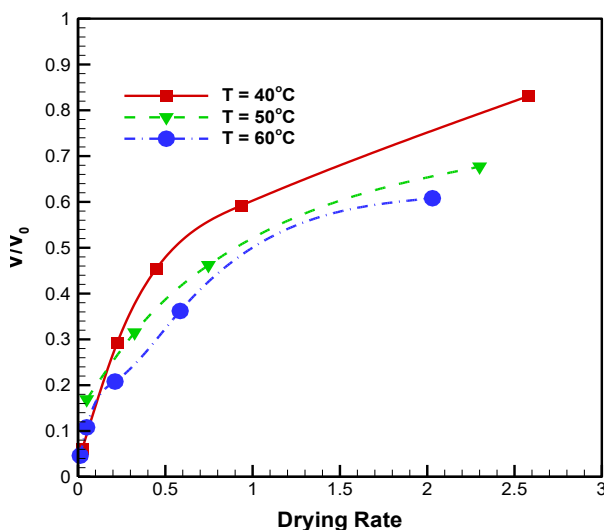


شکل 9 تاثیر توان هیتر کاتالیستی بر روی مقدار چروکیدگی نمونه های پسته



شکل 7 تاثیر سرعت هوای خشک شونده بر روی مقدار چروکیدگی نمونه های پسته

تاثیر ذرات بی اثر و همچنین مقدار جرم این ذرات، نشان شبیه‌سازی مربوط به آنها در شکل (8) آورده شده است.



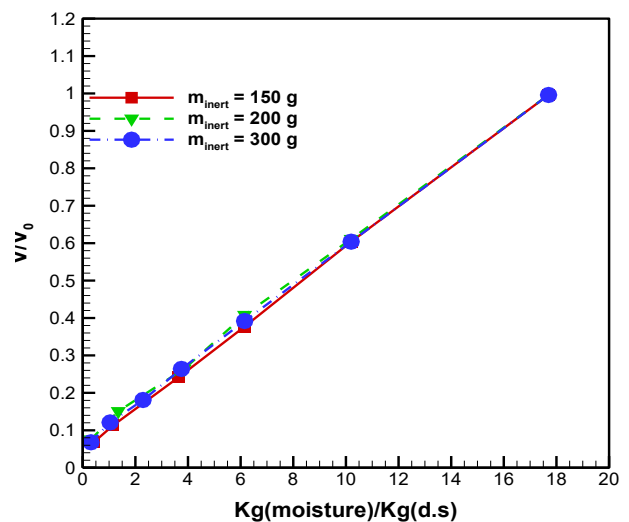
شکل 10 تاثیر شدت خشک شدن بر روی مقدار چروکیدگی نمونه های پسته

در نتیجه می‌توان معادله زیر را برای محاسبه چروکیدگی نمونه بر حسب مقدار رطوبت به صورت زیر ارائه کرد:

$$\frac{V}{V_0} = 0.0532X + 0.0555 \quad (27)$$

در ادامه به بررسی تغییر چگالی نمونه پرداخته می‌شود. با گذشت زمان و از دست رفتن رطوبت نمونه انتظار می‌رود که چگالی افزایش پیدا کند. نتایج مربوط در شکل (11) آورده شده است. تغییرات چگالی بر حسب رطوبت بدون بعد رفتاری غیرخطی و به شکل منحنی توانی است و دمای ورودی بر مقادیر چگالی اثرگذار است.

با توجه به شکل 11 می‌توان رابطه زیر را برای چگالی نمونه ارائه کرد:



شکل 8 تاثیر میزان جرم ذرات بی اثر بر روی مقدار چروکیدگی نمونه های پسته

همان‌طور که مشاهده می‌شود، حضور ذرات بی اثر و همچنین مقدار جرم این ذره‌ها تاثیری بر روی مقدار چروکیدگی نمونه ندارد. نتایج مربوط به تاثیر توان تابشی هیتر کاتالیستی بر روی چروکیدگی نمونه‌های مورد بررسی در شکل (9) آورده شده است.

با توجه به بررسی نتایج می‌توان دریافت که توان هیتر کاتالیستی تاثیر معنی‌داری بر روی چروکیدگی نمونه‌ها ندارد. به طور خلاصه می‌توان دریافت که دمای هوای خشک‌کننده، سرعت هوا، میزان جرم ذرات بی اثر و توان هیتر کاتالیستی تاثیری بر روی مقدار چروکیدگی نمونه‌های پسته ندارد. از این رو نتیجه می‌شود که تنها مقدار رطوبت و تغییرات آن در زمان خشک شدن که از آن به عنوان شدت خشک شدن یاد می‌شود، تنها پارامتر موثر بر روی چروکیدگی می‌باشد. تاثیر شدت خشک شدن بر روی چروکیدگی نمونه‌ها در شکل (10) آورده شده است. برای رسیدن به یک مقدار مشخص از چروکیدگی، دمای بالاتر شدت خشک شدن بالاتری از خود نشان می‌دهد. این افزایش شدت

علامه یونانی

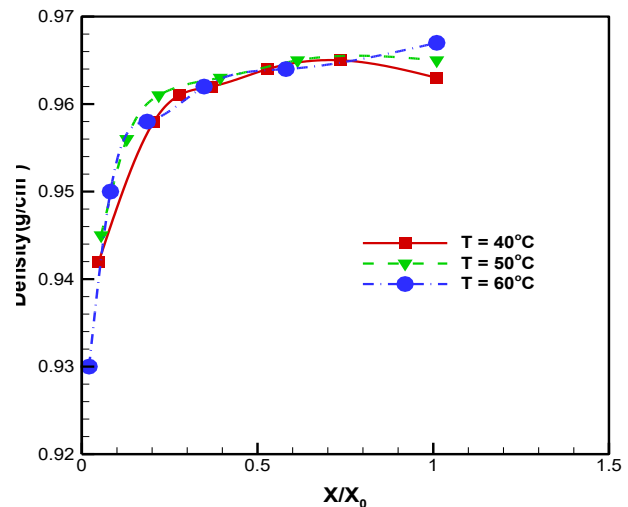
ρ چگالی (gcm^{-3})

μ لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)

9- مراجع

- [1] H. Bagheri, Application of infrared heating for roasting nuts, *Journal of Food Quality*, Vol. 2020, pp. 1-10, 2020.
- [2] C. Chen, and Z. Pan, Postharvest processing of tree nuts, Current status and future prospects—A comprehensive review, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, Vol. 21, pp. 1702-1731, 2020
- [3] D. A. Delfiya, K. Prashob, S. Murali, P. V. Alfiya, M. P. Samuel, R. Pandiselvam, Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review, *Journal of Food Process Engineering*, Vol. 2022, No. 13810, 2022.
- [4] A. Morshedi, T. Mohammadi Moghaddam, S. Razavi, *Effects of Infrared Roasting Process on Sensory Characteristics of Iranian Commercial Pistachio Varieties*, Accessed 12 September 2023; <https://ssrn.com/abstract=4375839>.
- [5] H. Bagheri, M. Kashaninejad, A. M. Ziaifar, M. Aalami, Textural, color and sensory attributes of peanut kernels as affected by infrared roasting method, *Information Processing in Agriculture*, Vol. 6, No. 2, pp. 255-264, 2019.
- [6] A. Morshedi, and S. M. A. Razavi, Effect of Infrared Roasting Process on the Microorganism Contaminations of Long and Round Iranian Pistachio Kernels, *Journal of Nuts*, Vol. 11, pp. 23-36, 2020.
- [7] Y. B. Öztekin, M. Aktaş, E. C. Dolgun Bilim, K. Sacilik, Drying kinetics and thermodynamic properties of Uzun pistachios dried by convective drying, *Journal of Food Processing and Preservation*, Vol. 46, pp. 17035, 2022.
- [8] S. Asadi, M. Aalami, S. Shoeibi, M. Kashaninejad, M. Ghorbani, M. Delavar, Effects of different roasting methods on formation of acrylamide in pistachio, *Food science & nutrition*, Vol. 8, pp. 2875-2881, 2020.
- [9] C. Venkitasamy, and Z. Pan, *Drying Technology in Food Processing, Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry, Section Two: Different dryers in the food industry, 10-Infrared drying*, pp. 305-339, Woodhead Publishing, 2023.
- [10] I. Golpour, M. KavehAmiri, R. Chayjan, R. P. Guiné, Optimization of infrared-convective drying of white mulberry fruit using response surface methodology and development of a predictive model through artificial neural network, *International Journal of Fruit Science*, Vol. 20, pp. 1015-1035, 2020.
- [11] G. K. Dolgun, M. Aktaş, E. C. Dolgu, Infrared convective drying of walnut with energy-exergy perspective, *Journal of Food Engineering*, Vol. 306, pp. 110638, 2021.
- [12] A. Jahanbakhshi, M. Kaveh, E. Taghinezhad, V. Rasooli Sharabiani, Assessment of kinetics, effective moisture diffusivity, specific energy consumption, shrinkage, and color in the pistachio kernel drying process in microwave drying with ultrasonic pretreatment, *Journal of Food Processing and Preservation*, Vol. 44, No. 6, pp. 14449, 2020.
- [13] M. Mokhtarian, H. Tavakolipour, A. Kalbasi-Ashtari, F. Koushki, The effects of solar drying on drying kinetics and effective moisture, *diffusivity of pistachio nut*, Vol.4, No. 4, pp. 7-12, 2021.
- [14] C. Chen, C. Venkitasamy, W. Zhang, R. Khir, S. Upadhyaya, Z. Pan, Effective moisture diffusivity and drying simulation of walnuts under hot air, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 150, pp. 119283, 2020.
- [15] F. Salehi, M. Kashani Nejad, A. Sadeghi Mahoonak, A. Mohammad Ziyai Far, Drying of button mushroom by infrared-hot air system, *Journal of food science and technology*, Vol. 13, No. 59, pp. 151-159, 2016.
- [16] S. Kayran, and I. Doymaz, Infrared drying and effective moisture diffusivity of apricot halves, Influence of pretreatment and infrared power, *Journal of Food Processing and Preservation*, Vol. 41, No.2, pp. 12827, 2017.
- [17] A. Aboltins, and J. Palabinskis, Studies of vegetable drying process in infrared film dryer, *Agronomy Research*, Vol. 15, pp. 1259-1266, 2017.

$$\rho_s = a \left(\frac{X}{X_0} \right)^b \quad (28)$$



شکل 11 تغییرات چگالی نمونه مورد بررسی

7- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش ابتدا به ارایه معادلات حاکم بر یک سیستم خشک کن پسته مبتنی بر هیتر کاتالیستی پرداخته شد و سپس خشک کن مورد نظر به صورت عددی مدل سازی گردید. پس از ایجاد اطمینان از صحت مدل عددی ارایه شده، به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر روی عملکرد خشک کن پیشنهادی پرداخته شد. نتایج حاصل نشان دادند که:

1. استفاده از هیتر کاتالیستی منجر به افزایش سرعت خشک کردن می شود.
2. حضور ذرات خنثی می توان شدت فرآیند خشک کردن را بهبود ببخشد هر چند بر روی کیفیت نمونه های خشک شده تاثیر چندانی ندارد.
3. با زیاد کردن سرعت هوای ورودی به خشک کن، میزان شدت خشک کردن کاهش می یابد که علت اصلی آن سرمایش سطح است.
4. با زیاد شدن دمای ورودی به سیستم، شدت خشک شدن بیشتر می شود.
5. افزایش توان هیتر کاتالیستی، شدت خشک شدن را زیاد می کند.

در نهایت پیشنهاد می شود که به منظور اطمینان از عملکرد مطلوب سیستم خشک کن پسته ارایه شده، به ساخت نمونه آزمایشگاهی این دستگاه و بررسی عملکرد آن در محیط واقعی پرداخته شود.

8- فهرست علائم

p	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
C_{ps}	ظرفیت حرارتی ذرات جامد ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$)
u_j	سرعت (ms^{-1})
h_{fg}	آنتالپی تبخیر ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$)
k_s	ضریب هدایت حرارتی ذرات جامد ($\frac{\text{J}}{\text{ms}^\circ\text{C}}$)
T	دما (C)
Sh	عدد شرود
Sc	عدد اشویت
D_{eff}	ضریب نفوذ رطوبتی ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg.mol}}$)
Q_{IR}	گرمای حجمی وابسته ($\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$)

- [41] B. B. Dally, A. N. Karpetis, R. S. Barlow, Structure of turbulent non-premixed jet flames in a diluted hot coflow, *Proceedings of the combustion institute*, Vol. 29., No. 1, pp. 1147-1154, 2002.
- [42] H. Tsuji, Ashwani K. Gupta, T. Hasegawa, M. Katsuki, K. Kishimoto, M. Morita, *High temperature air combustion: from energy conservation to pollution reduction*, CRC press, 2002.
- [43] M. Mörtberg, W. Blasiak, A. K. Gupta, Experimental investigation of flow phenomena of a single fuel jet in cross-flow during highly preheated air combustion conditions, *Journal of engineering for gas turbines and power*, Vol. 129, No. 2, pp. 556-564, 2007.
- [44] M. Mörtberg, W. Blasiak, A. K. Gupta, Combustion of normal and low calorific fuels in high temperature and oxygen deficient environment, *Combustion Science and Technology*, Vol. 178, No. 7, pp. 1345-1372, 2006.
- [45] J. S. Sørensen, S. R. van Reeuwijk, R. S. Bartle, L. T. Hansen, Inactivation of *Salmonella Typhimurium* during low heat convection drying of winged kelp (*Alaria esculenta*), *LWT*, Vol. 182, pp. 114822, 2023.
- [46] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, S. Adrienne Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, New York: Wiley, 1996.
- [47] M. Serowik, A. Figiel, M. Nejman, A. Pudlo, D. Chorazyk, W. Kopec, Drying characteristics and some properties of spouted bed dried semi-refined carrageenan, *Journal of food engineering*, Vol. 194, pp. 46-57, 2017.
- [48] P. Dhurve, V.K. Arora, D.K. Yadav, S. Malakar, Drying kinetics, mass transfer parameters, and specific energy consumption analysis of watermelon seeds dried using the convective dryer, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 59, pp. 926-932, 2022.
- [18] F. Salehi, A.Gohari Ardabili, A. Nemati, B. Latifi Dara, Modeling of strawberry drying process using infrared dryer by genetic algorithm, *Artificial neural network method*, Vol. 14, No. 69, pp. 105-114, 2017.
- [19] FAO, *FAO Statistical Yearbook: World Food and Agriculture*, 2013.
- [20] A. Shakerardekani, *The Vital Role of Pistachio Processing Industries*, Accessed 8 April 2023; https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1694267.
- [21] D. Heber, and S. Bowerman, The pistachio: a surprising and colorful nut, *Nutrition Today*, Vol. 43, No. 1, pp.36-40, 2008.
- [22] D. Avanzato, and I. Vassallo, Following Pistachio footprints (*Pistacia vera L.*): cultivation and culture, folklore and history, traditions and uses, *International Society for Horticultural Science (ISHS)*, 2008.
- [23] M. Kashani Nejad, L. G. Tabil, A. Mortazavi, A. Safe Kordi, Effect of drying methods on quality of pistachio nuts, *Drying Technology*, Vol. 21, No. 5, pp. 821-838, 2003.
- [24] A. Kouchakzadeh, Moisture diffusivity of five major varieties of Iranian pistachios, *American Journal of Food Technology*, Vol. 6, No.3, pp.253-259, 2011.
- [25] A. Taghizadeh-Alisaraei, H. Alizadeh Assar, B. Ghobadian, A. Motevali, Potential of biofuel production from pistachio waste in Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 72, pp. 510-522, 2017.
- [26] A. Midilli, and H. Kucuk, Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio, *Energy*, Vol. 28, No.6, pp. 539-556, 2003.
- [27] M.A. Rostami, F. Mirdamadiha, A. Golshan, Evaluation and comparison of the common pistachio dryers in kerman province, *Acta Horti*, In IV International Symposium on Pistachios and Almonds, Vol. 726, pp. 595-598, 2006.
- [28] M. Hosseinalipour, M. Namazi, A. Behravan, Kh. Ghadiri, M. Madadelahi, Fabrication and performance study of the radiative catalytic pad for flameless combustion of natural gas in different climate conditions, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, 2014.
- [29] M. Zanfir, and A. Gavriilidis, Catalytic combustion assisted methane steam reforming in a catalytic plate reactor, *Chemical Engineering Science*, Vol. 58, No. 17, pp. 3947-3960, 2003.
- [30] N. Jodeiri, J.P. Mmbaga, L. Wu, S.E. Wanke, R.E. Hayes, Modelling a counter-diffusive reactor for methane combustion, *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 39, pp. 47-56, 2012.
- [31] S. Specchia, A. Civera, G. Saracco, In situ combustion synthesis of perovskite catalysts for efficient and clean methane premixed metal burners, *Chemical engineering science*, Vol. 59, pp. 5091-5098, 2004.
- [32] S. A. Lloyd, and F. J. Weinberg, A burner for mixtures of very low heat content, *Nature*, Vol. 251, No. 5470, pp. 47-49, 1974.
- [33] R. Tanaka, New progress of energy saving technology toward the 21st century; Frontier of combustion & heat transfer technology, *Proceedings of 11th IFRF Members Conference*, 1995.
- [34] J. A. Wüning, and J. G. Wüning, Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation, *Progress in energy and combustion science*, Vol. 23, No. 1, pp. 81-94, 1997.
- [35] A. K. Gupta, and Z. Li, Effect of fuel property on the structure of highly preheated air flames, *Proc. Intl. Joint Power Generation Conference (JPGC)*, 1997.
- [36] A. K. Gupta, Flame characteristics and challenges with high temperature air combustion, *Proceedings of the International Joint Power Generation Conference*, pp. 58-74, 2000.
- [37] A. K. Gupta, Thermal characteristics of gaseous fuel flames using high temperature air, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 126, No.1, pp. 9-19, 2004.
- [38] M. Katsuki, and T. Hasegawa, The science and technology of combustion in highly preheated air, *Symposium (International) on combustion*, Vol. 27. No. 2. Elsevier, 1998.
- [39] A. K. Gupta, S. Bolz, T. Hasegawa, Effect of air preheat temperature and oxygen concentration on flame structure and emission, *Journal of energy resources technology*, Vol. 121, No .3, pp. 209-216, 1999.
- [40] T. Hasegawa, S. Mochida, A. K. Gupta, Development of advanced industrial furnace using highly preheated combustion air, *Journal of propulsion and power*, Vol. 18, No. 2, pp. 233-239, 2002.