



مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن لایه نازک کمه (کشک محلی)

هادی باقری^۱، محمدمهدی سیدآبادی^{۲*}، مهدی کاشانی نژاد^۳

1. دانشجوی دکتری، گروه آموزشی مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گلستان
2. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آموزشی مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی،
3. دانشیار، گروه آموزشی مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی،

(تاریخ دریافت: 92/11/16، تاریخ پذیرش: 92/12/14)

چکیده

خشک‌کردن یکی از راه‌های افزایش زمان ماندگاری محصولات می‌باشد. در این مطالعه، رفتار خشک‌شدن کمه در شکل‌های هندسی مختلف در خشک‌کن هوای داغ براساس سه مدل ریاضی پیچ، هیلو-کلاک و هندرسون-پابیس اصلاح‌شده مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در سه سطح دمایی 65، 75 و 85 درجه سانتی‌گراد در سه شکل هندسی مختلف (نمونه دایره‌ای، استوانه‌ای و تیغه‌ای) و با دو ضخامت مختلف (1 و 3 سانتی‌متر) و در دو تکرار انجام گرفت. رفتار خشک‌شدن کمه در شکل‌های هندسی مختلف براساس داده‌های آزمایشگاهی مورد برازش قرار گرفت و ضریب‌های مربوط به مدل‌ها یافت شد. برای بررسی دقت مدل‌ها از سه پارامتر ضریب تبیین (R^2)، ریشه متوسط خطای داده‌ها (RMSE) و مجموع مربعات خطا (SSE) استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش دما و ضخامت و تغییر شکل هندسی نمونه‌ها به شکل تیغه‌ای، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافت. علاوه بر این برازش داده‌ها با مدل مورد نظر نشان داد که مدل پیچ به علت داشتن بالاترین R^2 و کمترین RMSE و SSE به عنوان بهترین مدل برای برازش داده‌های آزمایشگاهی مطرح است. مدل‌سازی تغییرات نسبت رطوبت تیمارها با مدل‌های مختلف، نشان داد که مدل پیچ (مدل 1 جدول 2) انطباق خوبی ($R^2 = 0/999$) را با مقادیر نسبت رطوبت آزمایشی دارد و به عنوان بهترین مدل پیش‌بینی‌کننده سینتیک خشک‌شدن لایه نازک کمه تحت شرایط مورد آزمایش انتخاب شد.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کردن، ضریب نفوذ، شکل هندسی، مدل‌سازی.

* مسئول مکاتبات: bagherihadi51@yahoo.com

1- مقدمه

است. به‌علاوه به هنگام خشک‌کردن، وزن و حجم ماده غذایی کاهش پیدا کرده و در نتیجه باعث کاهش هزینه‌های بسته‌بندی، حمل و نقل، انبارداری و پخش مواد غذایی می‌گردد [2]. در حین خشک‌کردن مواد غذایی، یک‌سری تغییرات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در بعضی خواص طبیعی مواد غذایی مانند بافت، رنگ، عطر و طعم و ارزش تغذیه‌ای رخ می‌دهد. از این‌رو، دومین هدف خشک‌کردن، بایستی تولید مواد غذایی خشک‌شده با کیفیت خوب از نظر ارگانولپتیکی و تغذیه‌ای باشد. امروزه، علاوه بر مصرف تازه‌خوری، خشک‌کردن کمه مرسوم‌شده است و این محصول در بازار با قیمت مناسبی به فروش می‌رسد. در گذشته محصولات کشاورزی به‌صورت سنتی در مقابل نور خورشید خشک می‌شدند. این روش بسیار آسان و کم‌هزینه می‌باشد [3]؛ اما چنین سیستم‌هایی دارای معایبی از جمله کاهش کیفیت، غیر قابل کنترل بودن شرایط محیطی، خشک‌شدن غیریکنواخت و افزایش زمان خشک‌شدن هستند [4 و 5]. یکی از متداول‌ترین روش‌های خشک‌کردن مواد غذایی استفاده از جریان هوای داغ با کنوکسیون اجباری است که در آن هوای داغ با عبور از سطح ماده غذایی باعث تبخیر آب و رسیدن رطوبت آن به حد مورد نظر می‌شود. خشک‌کردن با جریان هوای داغ دارای مزایایی مانند امکان کنترل دقیق دما، صرف نظر از اندازه و شکل محصول و عدم نیاز به تماس مستقیم می‌باشد [6 و 7].

مدل‌های ریاضی مورد استفاده در فرایند خشک‌کردن به دو گروه مدل‌های بنیادی و مدل‌های تجربی طبقه‌بندی می‌شوند. مدل‌های بنیادی از فرضیه‌ها و نظریه‌ها استنباط می‌شوند و فرضیه‌ها بر اساس درک صحیحی از فرایند پایه‌ریزی می‌شوند. به‌عنوان نمونه، مکانیسم حرکت رطوبت در یک ماده جامد جاذب الرطوبه و در طول دوره سرعت نزولی خشک‌کردن می‌تواند به‌صورت یک پدیده انتشار منطبق با قانون دوم فیک توصیف شود. در حالی که مدل‌های تجربی به‌طور معمول چگونگی اتفاق افتادن فرایند را توصیف نمی‌کنند و پارامترهای آن‌ها هیچ معنای فیزیکی ندارند؛ بنابراین نمی‌توانند دیدگاه دقیقی از فرایندهای مهم در حال وقوع را در طول خشک‌کردن ارائه کنند؛ ولی روند تغییرات را در طول عملیات نشان می‌دهند. به‌کار بردن مدل‌های بنیادی و تجزیه مسائل پیچیده

در صنعت مواد غذایی تمایل فزاینده‌ای برای تولید محصولات غذایی با ارزش تغذیه‌ای و حسی بالا و با استفاده از روش‌های بهینه اقتصادی وجود دارد. خشک‌کردن یکی از روش‌های قدیمی و مرسوم برای نگهداری محصولات کشاورزی است. کمه یکی از معروف‌ترین کَشک‌های محلی در خراسان است و از مهم‌ترین فرآورده‌های سنتی و تخمیری شیر محسوب می‌شود. این محصول اغلب به‌صورت سنتی تولید و مصرف می‌شود و اغلب دارای مزه ترشی بوده و در غذاهایی مانند کمه جوش (غذای سنتی خراسان)، کشک بادمجان و به عنوان نوشیدنی همراه با غذا قابل استفاده است. ماده اولیه کمه اغلب شیر گوسفندی یا بز و یا مخلوطی از آن‌ها می‌باشد. این محصول از ارزش غذایی بالایی برخوردار بوده و سرشار از پروتئین و کلسیم است و می‌تواند احتیاجات بدن را از نظر مواد معدنی موجود در شیر که شامل کلسیم، منیزیم، آهن، سدیم و پتاسیم بوده؛ هم‌چنین از نظر اسیدهای آمینه ضروری و مواد پروتئینی تأمین نماید. بنابراین بسیار مغذی بوده و دربرگیرنده تمام خصوصیات شیر می‌باشد و برای افرادی که از بیماری عدم تحمل لاکتوز رنج می‌برند، فرآورده بسیار مناسب و جایگزین برای شیر محسوب می‌شود. از خواص درمانی کشک می‌توان به جلوگیری از ابتلاء به اختلالات گوناگون عصبی، تنظیم و بهبود هاضمه و جلوگیری از اسهال اشاره کرد [1]. به‌صورت سنتی و معمول، برای تولید کمه ابتدا ماست بدون چربی تولیدشده را حرارت داده تا کمی تغلیظ شود، سپس به‌وسیله پارچه‌های صافی، آب آن گرفته‌شده و بعد از آن ناتراوه باقی مانده (چیزی شبیه ماست چکیده) را در داخل پوست دباغی‌شده قرار می‌دهند تا زمان تخمیر خود را که به مدت 1-2 ماه است، را بگذرانند. ولی این کار نیاز به رسیدگی داشته و اغلب دشوار است. برای راحتی کار اغلب آن را به‌صورت گلوله‌ای (قورود) خشک کرده و در زمان مصرف آن را آسیاب می‌کنند. بنابراین خشک‌کردن یکی از راه‌های افزایش زمان ماندگاری این محصول مغذی محسوب می‌شود که اغلب به‌صورت سنتی و از طریق آفتاب خشک می‌شود.

مهم‌ترین هدف خشک‌کردن، جدا کردن آب از ماده غذایی و افزایش مدت زمان ماندگاری و جلوگیری از فساد ماده غذایی

ضروری است [10]. Meisami asl (2009) با بررسی ضریب نفوذ لایه نازک سیب نشان داد که مقدار ضریب نفوذ مؤثر در نمونه‌های خشک شده در دمای 40 تا 80 درجه سانتی‌گراد، در دامنه $1/495 \times 10^{-8}$ تا $1/706 \times 10^{-8}$ متر مربع بر ثانیه قرار دارد. و انرژی لازم برای فعال سازی با افزایش ضخامت و سرعت هوای خشک کننده افزایش یافت [11]. Corzo و همکاران (2008) با بررسی ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در ورقه های انبه نشان دادند که با افزایش دما، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش می‌یابد [12].

با توجه به این که تاکنون هیچ تحقیقی در مورد خشک کردن کمه صورت نپذیرفته است؛ هدف از این تحقیق، مطالعه تأثیر دمای هوا، ضخامت و شکل هندسی نمونه بر سینتیک خشک شدن کمه، مدل سازی سینتیک خشک شدن لایه نازک و انتخاب بهترین مدل پیش‌بینی کننده فرایند خشک شدن بود.

2- مواد و روش ها

2-1- تهیه و آماده سازی

کمّه مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های خشک کردن، از شهرستان اسفراین تهیه و تا پایان آزمایش‌ها در یخچال با دمای $4 \pm 1^\circ\text{C}$ نگهداری شد. حدود یک ساعت قبل از شروع هر آزمایش، جهت متعادل سازی دمای نمونه‌ها با دمای محیط، نمونه‌ها از یخچال به آزمایشگاه انتقال می‌یافت.

2-2- طرح کلی آزمایش‌ها

فرایند خشک کردن کمه در سه شکل هندسی مختلف و با سه اندازه متفاوت و در سه سطح دمایی 65، 75 و 85 درجه سانتی‌گراد و با استفاده از یک دستگاه آون هوای داغ مدل (JEIO TECH-(OF-026)) ساخت آلمان انجام شد. حدود نیم ساعت قبل از شروع فرایند خشک کردن، دستگاه خشک کن روشن و دمای آن متناسب با دمای مورد نیاز تنظیم شد تا دمای هوای داخل خشک کن به حالت پایدار برسد. نمونه‌ها بر روی یک عدد سینی قرار داده شد و کاهش وزن آن‌ها در فواصل زمانی تعیین شده، اندازه‌گیری و ثبت شد. خشک کردن نمونه‌ها تا رسیدن به محتوی رطوبت ثابت انجام شد. آزمایش‌های خشک کردن، در 18 تیمار و 2 تکرار انجام

به فرایندهای تشکیل دهنده آن به علت عدم دانش مناسب، همیشه امکان پذیر نیست. در این موارد، اغلب از مدل‌های تجربی استفاده می‌شود. این مدل‌ها برای اهداف طراحی در موارد پیچیده مفید هستند. مدل‌های تجربی اغلب برای بیان تغییرات متوسط رطوبت در ماده غذایی، به صورت تابعی از زمان خشک شدن به کار می‌روند. مدل‌های پیچ، هیلو-کلاک و پیچ اصلاح شده از جمله مدل‌های تجربی هستند که در فرایند خشک کردن لایه نازک مواد غذایی برای توصیف سینتیک خشک شدن به کار رفته‌اند. در تحقیقی، سینتیک خشک شدن آلو در خشک کن کنوکسیونی با هوای داغ با سرعت هوای 0/8 متر بر ثانیه و دمای هوای 50، 60 و 70 درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت؛ سینتیک خشک شدن به وسیله مدل‌های پیچ¹، لگاریتمی²، تقریب انتشار³ و دو جمله‌ای⁴ بررسی شده و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به وسیله قانون دوم فیک به دست آمد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که با افزایش دما، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش پیدا می‌کند. همچنین، برازش سینتیک خشک شدن به وسیله مدل دو جمله‌ای، همبستگی بهتری با داده‌های آزمایشی نشان داد.

پارامتر مهم دیگر در خشک کردن مواد غذایی ضریب نفوذ مؤثر رطوبت می‌باشد. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت جزء خواص ذاتی هر محصول می‌باشد که تابع خواص فیزیکی و شیمیایی محصول است. این ضریب که کنترل کننده زمان لازم برای خشک کردن محصول می‌باشد، به چندین عامل درونی و بیرونی بستگی دارد. از جمله عوامل بیرونی که با کنترل آن‌ها می‌توان ضریب نفوذ مؤثر را تغییر داد، دما، سرعت هوا و نیز ضخامت محصول می‌باشند. عوامل درونی مختص محصول می‌باشد که از آن جمله می‌توان به نفوذ بخار، نفوذ مایع و خاصیت موینگی لوله‌های موئین درون بافتی اشاره کرد که در میزان ضریب نفوذ مؤثر رطوبت تأثیر دارند. از آنجا که تفکیک اثرات هر عامل مشکل است، بنابراین سرعت حرکت رطوبت بدون توجه به اینکه کدام مکانیسم در حرکت رطوبت دخالت دارد، با یک پارامتر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت بیان می‌گردد. تعیین این ضریب در مدل سازی فرایند خشک کردن مواد غذایی

1. Page
2. Logarithmic
3. Approximation of diffusion
4. Two term exponential

2-3- آهنگ تبخیر جدول 1 تیمارهای مختلف و علائم اختصاری آن‌ها را

نشان می‌دهد. اندازه گرفت. جدول 1 تیمارهای مختلف و علائم اختصاری آن‌ها را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری محتوای رطوبت نمونه‌های کمه براساس استاندارد AOAC (1990) انجام شد؛ به طوری که مقداری نمونه قبل و پس از انجام هر آزمایش خشک‌کردن، در آون با دمای $105 \pm 1^\circ\text{C}$ قرار داده شد و پس از رسیدن وزن نمونه‌ها به مقدار ثابت، مقدار رطوبت بر حسب (گرم آب/گرم ماده خشک) گزارش گردید [13] گیری محتوای رطوبت نمونه‌های کمه براساس استاندارد AOAC (1990) انجام شد؛ به طوری که مقداری نمونه قبل و پس از انجام هر آزمایش خشک‌کردن، در آون با دمای $105 \pm 1^\circ\text{C}$ قرار داده شد و پس از رسیدن وزن نمونه‌ها به مقدار ثابت، مقدار رطوبت بر حسب (گرم آب/گرم ماده خشک) گزارش گردید [13].

$$DR = \frac{MC_{t+dt} - MC_t}{dt} \quad (1)$$

که DR نشان دهنده آهنگ تبخیر (گرم بر دقیقه)، MC_{t+dt} نشان دهنده محتوای رطوبتی در زمان $t+dt$ ، برابر با محتوای رطوبتی در زمان t و dt فاصله زمانی بین دو رطوبت متوالی بر حسب دقیقه را نشان می‌دهند.

2-4- تعیین ضریب نفوذ مؤثر و انرژی فعال‌سازی

برای تشریح فرایند خشک‌شدن کمه و بررسی ضریب نفوذ

جدول (1) علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

ردیف	تیمار	علامت اختصاری
1	نمونه دایره‌ای با قطر 1 سانتی‌متر و دمای 65 درجه سانتی‌گراد	DZ1T65
2	نمونه دایره‌ای با قطر 1 سانتی‌متر و دمای 75 درجه سانتی‌گراد	DZ1T75
3	نمونه دایره‌ای با قطر 1 سانتی‌متر و دمای 85 درجه سانتی‌گراد	DZ1T85
4	نمونه دایره‌ای با قطر 3 سانتی‌متر و دمای 65 درجه سانتی‌گراد	DZ3T65
5	نمونه دایره‌ای با قطر 3 سانتی‌متر و دمای 75 درجه سانتی‌گراد	DZ3T75
6	نمونه دایره‌ای با قطر 3 سانتی‌متر و دمای 85 درجه سانتی‌گراد	DZ3T85
7	نمونه استوانه‌ای با قطر 1 سانتی‌متر و دمای 65 درجه سانتی‌گراد	OZ1T65
8	نمونه استوانه‌ای با قطر 1 سانتی‌متر و دمای 75 درجه سانتی‌گراد	OZ1T75
9	نمونه استوانه‌ای با قطر 1 سانتی‌متر و دمای 85 درجه سانتی‌گراد	OZ1T85
10	نمونه استوانه‌ای با قطر 3 سانتی‌متر و دمای 65 درجه سانتی‌گراد	OZ3T65
11	نمونه استوانه‌ای با قطر 3 سانتی‌متر و دمای 75 درجه سانتی‌گراد	OZ3T75
12	نمونه استوانه‌ای با قطر 3 سانتی‌متر و دمای 85 درجه سانتی‌گراد	OZ3T85
13	نمونه تیغه‌ای با قطر 1 سانتی‌متر و دمای 65 درجه سانتی‌گراد	TZ1T65
14	نمونه تیغه‌ای با قطر 1 سانتی‌متر و دمای 75 درجه سانتی‌گراد	TZ1T75
15	نمونه تیغه‌ای با قطر 1 سانتی‌متر و دمای 85 درجه سانتی‌گراد	TZ1T85
16	نمونه تیغه‌ای با قطر 3 سانتی‌متر و دمای 65 درجه سانتی‌گراد	TZ3T65
17	نمونه تیغه‌ای با قطر 3 سانتی‌متر و دمای 75 درجه سانتی‌گراد	TZ3T75
18	نمونه تیغه‌ای با قطر 3 سانتی‌متر و دمای 85 درجه سانتی‌گراد	TZ3T85

رطوبت از قانون دوم فیک استفاده شد. برای آنالیز تحلیلی، قرص های کمه به سه حالت، تیغه نامحدود، استوانه نامحدود و کره در نظر گرفته شد. اثرات شیب حرارتی بر روی ضریب نفوذ حرارتی نادیده گرفته شد. تحت این شرایط انتقال رطوبت در داخل کمه به وسیله قانون دوم نفوذ فیک قابل توصیف می باشد (رابطه 2).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (2)$$

که X ، میزان رطوبت (کیلوگرم آب/ کیلوگرم ماده خشک)، D ، ضریب نفوذ پذیری رطوبت (m^2/s)، t ، زمان (ثانیه) و Z فاصله یا ضخامت برای نفوذ رطوبت می باشد. فرایند نفوذ را می توان با استفاده از قانون فیک به صورت ریاضی توصیف کرد. روش های تحلیلی برای حل معادله (2) توسط Crank (1975) با در نظر گرفتن هندسه ماده غذایی و شرایط مرزی بیان گردیده است. فاکتور های مؤثر بر نوع راه حل این معادلات وابسته به نوع هندسه ماده غذایی و شرایط مرزی سطح ماده غذایی است [19]. حل تحلیلی رابطه 2 با در نظر گرفتن فرضیات بالا برای تیغه نامحدود به به صورت رابطه 3 است؛

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4d^2}\right] \quad (3)$$

که M میزان رطوبت بر پایه ماده خشک در هر زمان، M_e و M_0 نشان دهنده میزان رطوبت تعادلی و رطوبت اولیه بر پایه ماده خشک، D ضریب نفوذ مؤثر رطوبت یا نفوذ پذیری رطوبت و d برابر با نصف ضخامت نمونه می باشد. حل تحلیلی رابطه 2 با در نظر گرفتن فرضیات بالا برای استوانه نامحدود نیز به صورت رابطه 4 است.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \quad (4)$$

$$\frac{4}{a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n^2} \exp(-D_{eff} \beta_n^2 t)$$

که در آن a شعاع استوانه (m) و β ریشه های تابع Bessel از نوع اول و درجه صفر می باشد.

همچنین حل تحلیلی رابطه 2 با در نظر گرفتن فرضیات بالا برای اجسام کروی به صورت رابطه 5 است.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (5)$$

به منظور بررسی داده های آزمایشگاهی، محاسبه ی نسبت رطوبت در گام نخست ضروری می باشد. نسبت رطوبت نشان دهنده مقدار رطوبت نمونه های کمه در هر لحظه نسبت به رطوبت اولیه و نهایی می باشد و از رابطه 6 به دست می آید.

$$MR = \frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e} \quad (6)$$

که در آن M_e ، $M_{(t)}$ ، M_R و M_0 ، به ترتیب نسبت رطوبت، رطوبت بر مبنای خشک در هر لحظه از زمان خشک شدن، رطوبت تعادلی بر پایه خشک و رطوبت اولیه بر مبنای خشک می باشد. رطوبت تعادلی، رطوبتی است که فرایند کاهش وزن در دمای مورد مطالعه، متوقف شده باشد. اگر چه نسبت رطوبتی مطابق رابطه (6) تعریف می شود، ولی به دلیل نوسانات مداوم در رطوبت نسبی هوای خشک کننده، نسبت رطوبتی به صورت رابطه 7 ساده می شود (20).

$$MR = \frac{M(t)}{M_0} \quad (7)$$

2-5- اندازه گیری انرژی فعال سازی

با توجه به تابعیت ضریب نفوذ با دما، برای تعیین انرژی فعال سازی رطوبت از رابطه آرنیوس (8) استفاده شد.

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{R}\right) \cdot \frac{1}{T} \quad (8)$$

که در آن D_0 ، ضریب نفوذ مؤثر در دمای مبنا، E_a انرژی فعال سازی، R ثابت جهانی گازها (8/314 ژول بر مول درجه کلونین) و T دمای مطلق هر فرایند می باشد. می توان با لگاریتم گیری از رابطه (8) آن را به صورت یک رابطه خطی (9) در آورد.

$$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \quad (11) \quad \ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (9)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right)^{1/2} \quad (12)$$

در این معادلات، $MR_{exp,i}$ نسبت رطوبت نمونه در i امین اندازه‌گیری، $MR_{pre,i}$ نسبت رطوبت نمونه پیش‌بینی شده در i امین اندازه‌گیری، $\overline{MR}_{exp,i}$ میانگین نسبت نمونه در i امین اندازه‌گیری و $\overline{MR}_{pre,i}$ میانگین نسبت رطوبت نمونه پیش‌بینی شده در i امین اندازه‌گیری می‌باشد.

3- نتایج و بحث

3-1- منحنی‌های خشک‌شدن

مطالعه سینتیک افت رطوبت برای رسیدن به اطلاعاتی درباره زمان مورد نیاز برای خشک‌کردن صحیح محصول ضروری می‌باشد. سینتیک افت رطوبت در مواد غذایی مختلف به عوامل متعددی مانند دما، رطوبت اولیه محصول و غیره وابسته است و با تغییر شرایط فرایند سینتیک افت رطوبت نیز تغییر می‌کند. پس از قرار دادن نمونه‌های کمه در دمای 105°C ، رطوبت اولیه محصول از برابند دو تکرار، $66/4$ بر مبنای تر و $197/5$ بر مبنای خشک محاسبه گردید.

شکل 1 منحنی‌های سینتیک کاهش رطوبت نمونه‌ها را به صورت محتوی رطوبت بر پایه خشک (گرم آب بر گرم ماده خشک) در طول زمان خشک‌شدن و در سطوح مختلف بر اساس جدول 1 نشان می‌دهد. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که محتوی رطوبت نمونه‌های کمه در طول خشک‌شدن به صورت مداوم و نمایی کاهش می‌یابد.

بررسی سینتیک افت رطوبت در دمای 65 تا 85 درجه سانتی‌گراد

2-6- برآورد ضرایب ثابت در مدل‌های ریاضی و انتخاب

مناسب‌ترین مدل برای توصیف سینتیک خشک‌شدن مدل‌های تجربی زیادی برای بررسی سینتیک خشک‌کردن محصولات غذایی مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج نشان دهنده کارایی بالایی این مدل‌ها است. اما چندین مدل از اعتبار و کارایی بالاتری نسبت به بقیه مدل‌ها برخوردارند که در این مطالعه، تعدادی از مدل‌های تجربی، برای مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن (برازش نسبت رطوبت در مقابل زمان خشک‌شدن) نمونه‌های کمه مورد استفاده قرار گرفته است (جدول 2).

منحنی‌های خشک‌شدن به دست آمده برای کمه در شرایط مختلف خشک‌کردن، به وسیله 3 مدل مذکور برازش شده و ضرایب آن‌ها (a, b, k, g, n) توسط نرم افزار Sigmaplat 12.0 تعیین گردید.

برای انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف‌کننده سینتیک خشک‌کردن نمونه‌های کمه، معیارهای ضریب تبیین R^2 ، ریشه متوسط خطای داده‌ها $(RMSE)^2$ و مجموع مربعات خطا³ (SSE) توسط هر مدل، محاسبه و با مدل‌های دیگر مورد مقایسه قرار گرفتند. مدلی که دارای بالاترین مقدار R^2 و پایین‌ترین مقدار $RMSE$ و SSE باشد، مدل برازش بهتری بر داده‌های آزمایشگاهی دارد و به عنوان بهترین مدل انتخاب می‌شود [21]. مقادیر $RMSE$ ، R^2 و SSE از روابط 10، 11 و 12 محاسبه گردید:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,average})^2} \quad (10)$$

1. Coefficient of determination
2. Root Mean Square Error
3. Sum Square Error

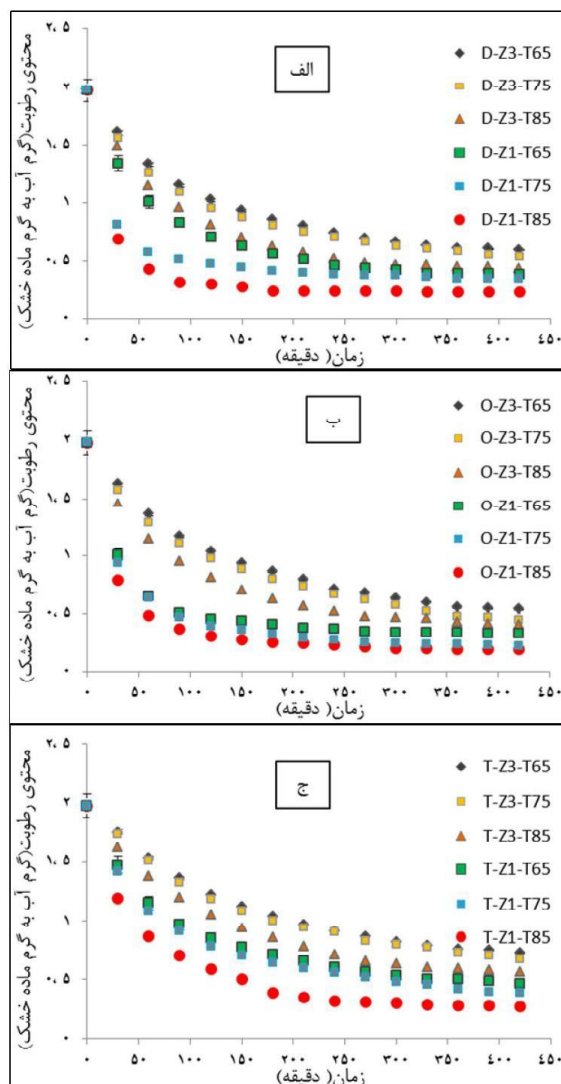
جدول (2) مدل‌های مورد استفاده برای برازش داده‌های آزمایشگاهی

شماره	نام مدل	مدل ریاضی	مرجع
1	پیچ	$MR = \exp(-ktn)$	16
2	هیلاو-کلاک	$MR = a \exp(-ktn) + c \exp(-gtn)$	17
3	هندرسون-پایس اصلاح‌شده	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	18

گلوله‌های نسبت به نمونه‌های تیغه‌ای داری سرعت خروج رطوبت با سرعت بیش تری هستند. علت این امر بدین دلیل است که در نمونه گلوله‌ای و استوانه‌ای سطح بیش تری در تماس با هوای گرم قرار دارد و خروج رطوبت با سرعت بیش تری خارج می‌شوند (شکل 1)

از طرفی بررسی رطوبت تعادلی نهایی در نمونه‌های مختلف نشان داد که با افزایش ضخامت، درصد رطوبت تعادلی در نمونه‌ها افزایش یافت. به عبارت دیگر، فرایند خشک شدن نمونه‌ها در ضخامت‌های 3 سانتی‌متری نسبت به نمونه‌هایی با ضخامت 1 سانتی‌متر، در رطوبت تعادلی بالاتری ثابت و متوقف شدند. این امر به دلیل افزایش طول مسیر خروج رطوبت از

با ضخامت 1 تا 3 سانتی‌متر در نمونه‌های کمه با اشکال هندسی مختلف، نشان داد که با کاهش ضخامت و افزایش دما، زمان مورد نیاز برای خشک کردن کاهش یافت. علت کاهش زمان مورد نیاز با افزایش دما به خاطر افزایش انرژی وارد شده به مولکول‌های آب در دماهای بالاتر می‌باشد به گونه‌ای که با دمای 85°C بیش تری انرژی را برای جدا کردن آب تامین نمود و فرایند تبخیر با شدت و سرعت بیش تری انجام شد. از طرفی با کاهش ضخامت نمونه‌های کمه، به علت کاهش طول مسیر خروج رطوبت از عمق به سطح نمونه، زمان مورد نیاز برای خشک کردن کاهش یافت [22 و 23]. اشکال هندسی نمونه نیز بر روی سرعت خروج رطوبت تأثیرگذار است؛ به طوری که نمونه‌های با اشکال هندسی استوانه‌ای و



شکل (1) الف-ج) محتوی رطوبت در طول خشک شدن تیمارهای مختلف بر اساس جدول 1

عمق به سطح نمونه و چروکیدگی سطحی نمونه‌ها می‌باشد. در حالی که با افزایش دما از 65°C درجه به 75°C منجر به کاهش رطوبت تعادلی نمونه‌ها در فرایند خشک‌شدن گردید، که علت آن به خاطر تامین انرژی بالاتر در دمای 85°C نسبت به دمای 65°C می‌باشد.

(دایره‌ای) منجر به کاهش دمای خشک‌شدن می‌گردد. این بدین معنی است که در یک شرایط ثابت و معین، نمونه‌های گلوله‌ای، رطوبت بیش‌تر و با شدت بالاتری از دست می‌دهند (شکل 1).

نتایج Doymaz (2004)، Mwithiga و همکاران (2005) در مورد کاهش زمان خشک‌کردن با افزایش دمای فرایند تاییدکننده نتایج این تحقیق است.

3-2- محاسبه ضریب نفوذ

جدول 3، مقایسه میانگین‌های اثر دما و ضخامت بر شیب نمودار لگاریتمی نسبت رطوبت در مقابل زمان و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در نمونه‌های با اشکال هندسی مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، پایین‌ترین شیب نمودار مربوط به نمونه تیغه با ضخامت 3 سانتی‌متر و دمای 65°C و پایین‌ترین ضریب نفوذ مربوط به

هم‌چنین بررسی اثر شکل هندسی بر رطوبت تعادلی در فرایند خشک‌کردن نشان داد نمونه‌های با شکل هندسی تیغه‌ای دارای درصد رطوبت تعادلی بالاتری بوده که علت آن پایین بودن میزان سطح تماس نمونه تیغه‌ای با هوای خشک در مقایسه با نمونه‌های گلوله‌ای و استوانه‌ای می‌باشد.

با توجه به منحنی تغییرات رطوبت بر مبنای خشک نسبت به زمان مشاهده می‌شود که بیش‌ترین زمان خشک‌کردن مربوط به نمونه‌های تیغه‌ای با ضخامت 3 سانتی‌متر می‌باشد بر این اساس افزایش دما و تغییر شکل هندسی از تیغه‌ای به گلوله‌ای

جدول (3) مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهای مختلف بر شیب منحنی لگاریتم تغییرات رطوبت و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

تیمار	شیب منحنی لگاریتم تغییرات رطوبت	ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (10^{-8}) (متر مربع بر ثانیه)
DZ1T65	0/00345094	$1/18 \pm 1/63^a$
DZ1T75	0/00368598	$9/22^k \pm 0/98$
DZ1T85	0/003858459	$9/65^k \pm 0/31$
DZ3T65	0/00268857	$60/50^e \pm 0/88$
DZ3T75	0/00279241	$62/83^e \pm 1/07$
DZ3T85	0/003343301	$75/23^d \pm 1/15$
OZ1T65	0/00304399	$1/32^m \pm 0/18$
OZ1T75	0/00401953	$1/68^m \pm 0/96$
OZ1T85	0/00402176	$1/74^m \pm 0/19$
OZ3T65	0/00298917	$11/63^j \pm 0/16$
OZ3T75	0/00334014	$13/04^i \pm 0/24$
OZ3T85	0/00348082	$13/55^i \pm 0/60$
TZ1T65	0/00308245	$30/82^h \pm 0/23$
TZ1T75	0/00342290	$34/23^s \pm 0/63$
TZ1T85	0/00397045	$39/71^f \pm 0/56$
TZ3T65	0/00236050	$212/45^c \pm 1/80$
TZ3T75	0/00247029	$222/33^b \pm 0/86$
TZ3T85	0/00290984	$261/88^a \pm 1/89$

حروف یکسان در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح احتمال 5٪ می‌باشد.

سرعت ثابت خشک‌شدن در نمونه‌های کمه دیده نمی‌شود و خشک‌شدن در مرحله سرعت نزولی اتفاق می‌افتد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت داخلی در مقابل انتقال جرم وجود دارد [3].

نتایج نشان می‌دهند که آهنگ خشک‌شدن در ابتدای فرایند خشک‌شدن به دلیل زیاد بودن محتوی رطوبت، بیش‌تر از مراحل پایانی خشک‌شدن است. هم‌چنین، آهنگ خشک‌شدن در مراحل پایانی فرایند به دلیل ایجاد مقاومت در مقابل انتقال رطوبت در نتیجه چروکیدگی و افزایش مقاومت داخلی در مقابل انتقال جرم به دلیل کاهش محتوی رطوبت، کاهش پیدا کرد. همان‌طور که در شکل 2 نیز، دیده می‌شود، با افزایش دما به دلیل افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و در نتیجه تسهیل خروج رطوبت، آهنگ خشک‌شدن را در مقایسه با سایر تیمارها افزایش می‌دهد. هم‌چنین در ابتدای فرایند با افزایش ضخامت به علت افزایش مسیر پیمایش رطوبت، شدت آهنگ خشک‌شدن کاهش می‌یابد.

3-5- مدل‌سازی فرایند خشک‌کردن

شکل 3 تغییرات نسبت رطوبت نمونه‌های کمه در طول خشک‌شدن و در شرایط مختلف فرایند بر اساس جدول 1 نشان می‌دهد. با توجه به این اشکال، تأثیر تلفیقی دما و ضخامت بر نسبت رطوبت، مشابه محتوی رطوبت در طول خشک‌شدن (شکل 2) است.

جدول 5، پارامترهای آماری مدل‌های مختلف برای همه تیمارها را نشان می‌دهد. با مقایسه مقادیر میانگین این پارامترها، می‌توان نتیجه گرفت که، مدل پیچ دارای بالاترین مقدار R^2 و پایین‌ترین مقادیر SSE و RMSE نسبت به بقیه مدل‌های جدول 2 می‌باشد. میانگین مقادیر SSE، R^2 و جدول 5، پارامترهای آماری مدل‌های مختلف برای همه تیمارها را نشان می‌دهد. با مقایسه مقادیر میانگین این پارامترها،

جدول (4) انرژی فعال‌سازی طی خشک‌شدن کمه (ژول بر مول)

تیغه‌ای	استوانه‌ای	گلوله‌ای	شکل هندسی ضخامت
15170/5	10160	5627/7	یک سانتی‌متر
10473/1	7697/6	10901/3	سه سانتی‌متر

نمونه‌های استوانه‌ای با دمای 65°C و ضخامت 1 سانتی‌متر می‌باشد؛ در حالی که بالاترین شیب نمودار مربوط نمونه استوانه‌ای با ضخامت 1 سانتی‌متر و دمای 85°C و بالاترین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت مربوط به نمونه‌های تیغه‌ای با ضخامت 3 سانتی‌متر و دمای 85°C مشاهده می‌شود. در نمونه‌های گلوله‌ای، ضریب نفوذ بین $8/63 \times 10^{-8}$ تا $75/23 \times 10^{-8}$ در نمونه‌های استوانه‌ای $1/32 \times 10^{-8}$ تا $13/55 \times 10^{-8}$ و در نمونه‌های تیغه‌ای $30/82 \times 10^{-8}$ تا $261/88 \times 10^{-8}$ می‌باشد. با توجه به اشکال هندسی نمونه‌ها می‌توان بیان کرد که پایین‌ترین ضریب نفوذ مربوط به نمونه‌های استوانه‌ای و بالاترین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت مربوط به نمونه‌های تیغه‌ای می‌باشد. در نمونه‌های استوانه‌ای، اثر دما تأثیر قابل توجهی بر روی ضریب نفوذ نداشته در حالی که در نمونه‌های گلوله‌ای اثر دما بر روی ضریب نفوذ واضح‌تر و مشخص‌تر است. به‌طور کلی در تمام نمونه‌ها با افزایش دما و ضخامت، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافت که این امر با افزایش فشار بخار آب با افزایش دما و رابطه مستقیم تغییرات ضخامت و مقدار ضریب نفوذ مؤثر با توجه به روابط مذکور قابل توجیه است.

Doymaz (2004) با بررسی ضریب نفوذ در لایه نازک گندم نشان داد که با افزایش دما، مقدار ضریب نفوذ افزایش می‌یابد [3].

3-3- محاسبه انرژی فعال‌سازی

انرژی فعال‌سازی نشان‌دهنده رابطه بین دمای فرایند ضریب نفوذ رطوبت می‌باشد. و با داشتن انرژی فعال‌سازی می‌توان ضریب نفوذ را برای دماهای مختلف تخمین زد (جدول 4).

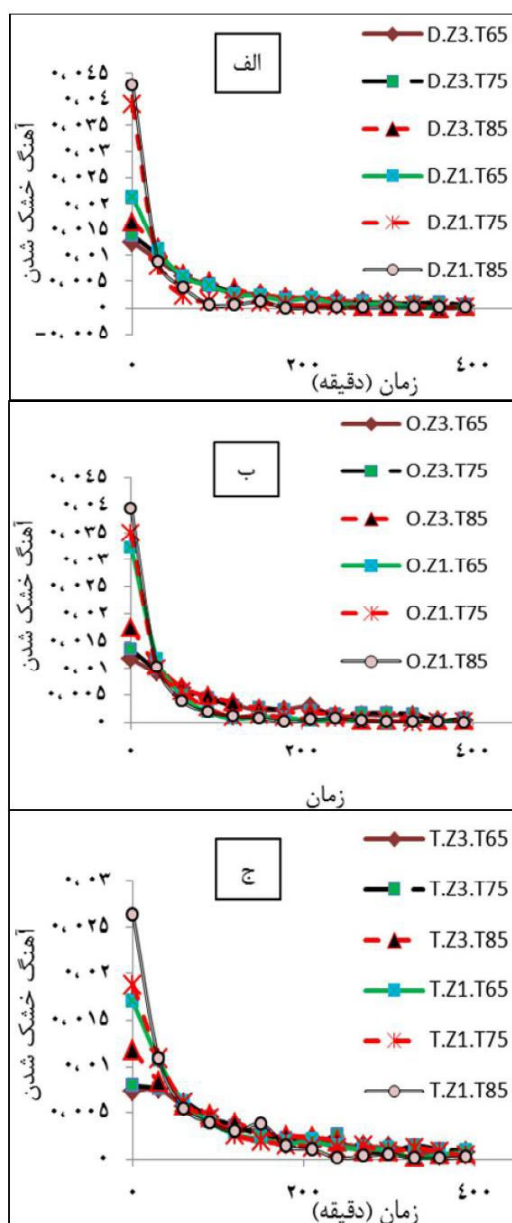
3-4- بررسی آهنگ خشک‌شدن

شکل 2، آهنگ خشک‌شدن تیمارهای مختلف را در طول خشک‌شدن نشان می‌دهد. با توجه به این اشکال، دوره

می‌توان نتیجه گرفت که، مدل پیچ دارای بالاترین مقدار R^2 و پایین‌ترین مقادیر SSE و RMSE نسبت به بقیه مدل‌های جدول 2 می‌باشد. میانگین مقادیر SSE، R^2 و RMSE مدل مذکور در بین تیمارهای مختلف، به ترتیب 0/0068، 0/999 و 0/0004 می‌باشد. بنابراین از بین 3 مدل مورد مطالعه، مدل پیچ به‌عنوان بهترین مدل برای پیش‌بینی سینتیک خشک‌شدن لایه نازک نمونه‌های کمه انتخاب شد. در شکل 3 برازش

تغییرات نسبت رطوبت تیمارهای مختلف با مدل پیچ در طول خشک‌شدن آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، انطباق خوبی بین مقادیر نسبت رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل پیچ و آزمایشی در همه تیمارهای مورد مطالعه وجود دارد.

جدول 6، پارامترهای ثابت مدل پیچ برای تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد که با استفاده از این‌ها ثابت‌ها می‌توان مدل



شکل 2 (الف-ج) آهنگ خشک‌شدن تیمارهای مختلف بر اساس جدول 1 در طول خشک‌شدن

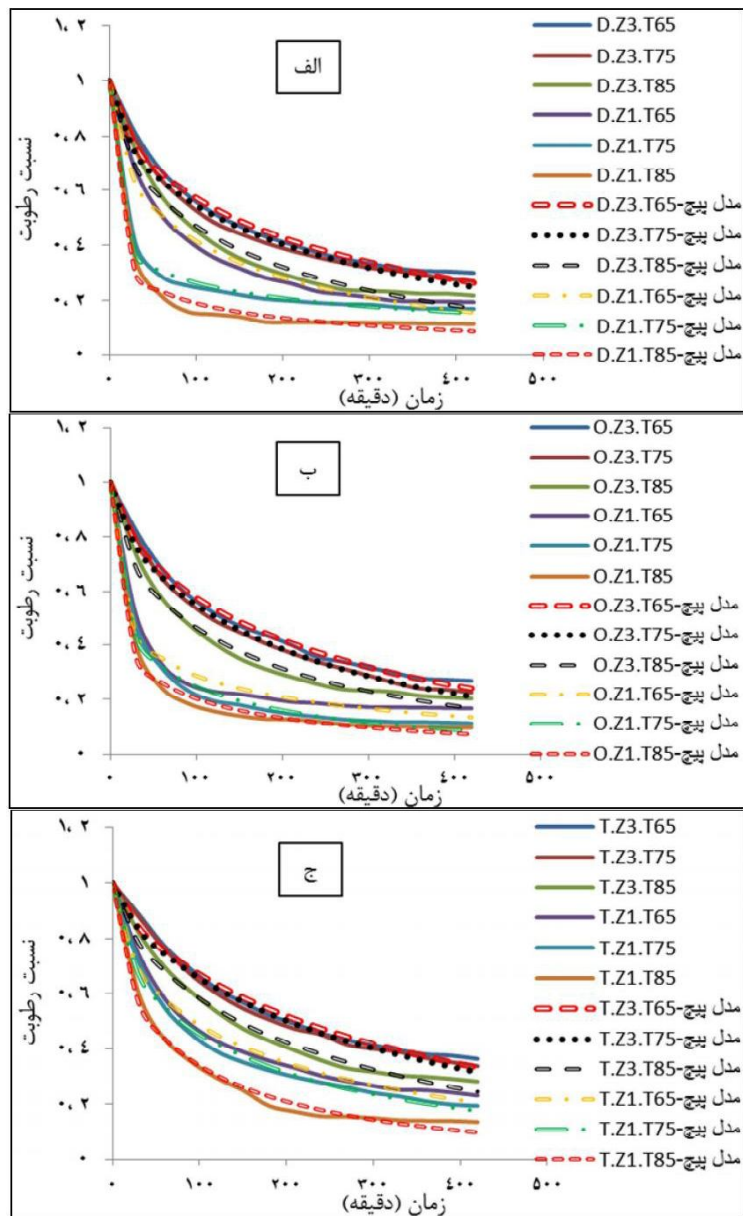
ریاضی پیش‌بینی‌کننده فرایند خشک‌کردن برای هر دو ماضخامت در نمونه‌های کمه با اشکال هندسی مختلف را به دست آورد. Akpinar (2006) با بررسی 13 مدل برای پیش‌بینی فرایند خشک‌کردن محصولات مختلفی هم‌چون سیب‌زمینی، سیب‌زمینی و کدو تنبل نشان داد که مدل میدلی بهترین مدل برای پیش‌بینی رفتار خشک‌کردن این محصولات می‌باشد [24]. هم‌چنین بررسی مدل‌سازی خشک‌کردن هویج توسط Doymaz (2004) در دمای 50-70 درجه سانتی‌گراد نشان داد که مدل پیچ برازش بهتری نسبت به سایر مدل‌ها برای پیش‌بینی فرایند خشک‌شدن دارد [3].

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر پارامترهای دما و ضخامت بر سینتیک شرایط مورد آزمایش انتخاب شد.

جدول (5) پارامترهای آماری مدل‌های 1، 2 و 3 بر اساس جدول 2 برای تیمارهای مختلف

تیمار	مدل 1			مدل 2			مدل 3		
	RMSE	SSE	R ²	RMSE	SSE	R ²	RMSE	SSE	R ²
DZ1T65	0/017	0/0022	0/9969	0/025	0/0046	0/9936	0/007	0/0005	0/9993
DZ1T75	0/049	0/0037	0/9865	0/022	0/0038	0/9948	0/007	0/0004	0/9994
DZ1T85	0/009	0/0006	0/9982	0/008	0/0005	0/9973	0/002	0/00005	0/9999
DZ3T65	0/016	0/0023	0/9896	0/009	0/0005	0/9992	0/009	0/0006	0/9991
DZ3T75	0/010	0/0008	0/9988	0/007	0/0003	0/9995	0/005	0/0002	0/9997
DZ3T85	0/009	0/0007	0/9971	0/010	0/0009	0/9988	0/003	0/0001	0/9999
OZ1T65	0/012	0/0011	0/9983	0/019	0/0026	0/9960	0/005	0/0002	0/9997
OZ1T75	0/005	0/0002	0/9987	0/014	0/0013	0/9980	0/014	0/0014	0/9978
OZ1T85	0/007	0/0003	0/9995	0/005	0/0001	0/9998	0/005	0/0001	0/9998
OZ3T65	0/007	0/0004	0/9985	0/003	0/0007	0/9979	0/003	0/0006	0/9999
OZ3T75	0/011	0/0010	0/9986	0/010	0/0008	0/9989	0/006	0/0002	0/9997
OZ3T85	0/008	0/0004	0/9994	0/014	0/0015	0/9977	0/015	0/0015	0/9976
TZ1T65	0/008	0/0005	0/9993	0/005	0/0001	0/9987	0/005	0/0002	0/9997
TZ1T75	0/008	0/0005	0/9974	0/008	0/0005	0/9993	0/004	0/0001	0/9998
TZ1T85	0/011	0/0011	0/9985	0/014	0/0016	0/9977	0/007	0/0003	0/9995
TZ3T65	0/008	0/0005	0/9993	0/012	0/0011	0/9983	0/012	0/0011	0/9982
TZ3T75	0/022	0/0018	0/9926	0/016	0/0033	0/9896	0/006	0/0003	0/9995
TZ3T85	0/09	0/0012	0/9985	0/018	0/0015	0/9925	0/009	0/0005	0/9996



شکل (3) الف-ج) نسبت رطوبت در طول خشک‌شدن تیمارهای مختلف بر اساس جدول 1 و برازش آن‌ها با مدل پیچ

جدول (6) مقادیر و ضرایب مدل پیچ برای تیمارهای مختلف

n	k	تیمار
0/5207	0/0797	DZ1T65
0/2383	0/4421	DZ1T75
0/2620	0/4948	DZ1T85
0/5998	0/0354	DZ3T65
0/5751	0/04306	DZ3T75
0/5872	0/05053	DZ3T85
0/3378	0/2611	OZ1T65
0/4051	-0/2143	OZ1T75
0/3522	0/3141	OZ1T85
0/6589	0/0265	OZ3T65
0/6627	0/02840	OZ3T75
0/5900	-0/05056	OZ3T85
0/5482	0/05747	TZ1T65
0/5492	0/06280	TZ1T75
0/5301	0/09375	TZ1T85
0/6987	0/01616	TZ3T65
0/6944	0/01734	TZ3T75
0/6633	0/02548	TZ3T85

منابع

- Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering* 73: 231-238.
- [6] Vega, A., Uribe, E., Lemus, R. and Miranda, M. (2007). Hot-air drying characteristics of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) and influence of temperature on kinetic parameters. *Food Science and Technology* 40:1698-1707.
- [7] Gowen, A., Abu-Ghannam, N., Frias, J. & Oliveira, J. (2006). Optimisation of dehydration and rehydration properties of cooked chickpeas (*Cicer arietinum* L.) undergoing microwave-hot air combination drying. *Food Science and Technology*, 17: 177-183.
- [1] ramazani, H. (1365). Preparation of of khashk, (1365) Agriculture and Natural Resources Research Organization, 25, 23- 27. [in Persian].
- [2] Mujumdar, A. S., and Law, C L. (2010). Drying Technology: Trends and Applications in Postharvest Processing. *Food Bioprocess Technol*, 3,843–852.
- [3] Doymaz, I. (2005). Sun drying of figs: an experimental study. *Journal of Food Engineering*, 71: 403-407.
- [4] Das, I., Das, S. K. and Bal, S., (2004). Specific energy and quality aspects of infrared (IR) dried parboiled rice. *Journal of Food Engineering*, 68: 249-255.
- [5] Sacilik, K., Keskin, R. and Elicin, A. K. (2006).

- temperature drying of shelled corn. Transactions of the ASAE, 16, 1136–1139.
- [19] Crank, J. (1975). Mathematics of diffusions (2nd ed.). London: Oxford University Press.
- [20] Sun, D. W. and Woods, J. L. (1994). Low temperature moisture transfer characteristics of wheat in thin layers, Transactions of the ASAE, 37, 1919:1926.
- [21] Guine, R. P. F. & Fernandes, R. M. C. (2006). Analysis of the drying kinetics of chestnut. Journal of Food Engineering, 76: 460-467.
- [22] Doymaz I. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. Journal of Food Engineering, 61: 359-364.
- [23] Mwithiga, G., and Olwal J. O. (2005). The drying kinetics of kale (*Brassica oleracea*) in a convective hot air dryer. Journal of Food Engineering, 71: 373-378.
- [24] Akpınar, E. K. (2006). Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. Journal of Food Engineering, 73:75–84.
- [8] Guine, R. P. F. & Fernandes, R. M. C. (2006). Analysis of the drying kinetics of chestnut. Journal of Food Engineering, 76: 460-467.
- [9] Seiedlou, S., Ghasemzadeh, H. R., Hamdami, N., Alati, F. T. & Moghaddam, M. (2010). Convective drying of apple: mathematical modeling and determination of some quality parameters. International Journal of Agriculture and Biology, 12: 171-178.
- [10] Babalis, S. J. & Belessiotis, V. G. (2004). Influence of drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. Journal of Food Engineering, 65, 449–458.
- [11] Meisami-asl, E., Rafiee, S., Keyhani, A. and Tabatabaefar, A. (2009). Mathematical modeling of moisture content of apple slice during drying. Pakistan Journal of Nutrition 8(6): 804-809.
- [12] Corzo, O., Bracho, N & Alvarez, C. (2008). Water effective diffusion coefficient of mango slices at different maturity stages during air drying. Journal of food engineering, 87, 479-484.
- [13] AOAC (1990). Official method of analysis. Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists (No. 934.06).
- [14] Wong, J.Y. (2001). Theory of Ground vehicles. (3rd ed). John Wiley and Sons, Inc.
- [15] Akgun, N. and Doymaz. I. (2005). Modeling of olive cake thin-layer drying process. Journal of food engineering. 68: 455-461.
- [16] Page GE. (1949). Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. [dissertation] Lafayette; Purdue University.
- [17] Hii, C.L, Law, C.L. and Cloke, M. (2009). Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. J Food Eng, 90:191-198.
- [18] Westerman, P. W., White, G. M., & Ross, I. J. (1973). Relative humidity effect on the high