



## بررسی تغییرات ضریب آهنگ ثابت خشک‌شدن در مدل‌های شبیه‌سازی با استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف

علی متولی<sup>۱\*</sup>، فاطمه هدایتی<sup>۲</sup>

۱. استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری  
۲. دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

(تاریخ دریافت: 95/8/27، تاریخ پذیرش: 95/10/12)

### چکیده

خشک‌کردن میوه‌ها یکی از راه‌کارهای افزایش ماندگاری و استفاده از آن در فصول مختلف سال است. یکی از این میوه‌ها، سیب می‌باشد که برای افزایش مدت ماندگاری آن یا باید در دمای یخچال نگهداری گردد و یا خشک‌شده و به‌عنوان چیپس سیب مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش تاثیر پیش‌تیمارهای مختلف شامل آبیگری اسمزی، آلتراسوند، بلانچینگ و میکروویو در سطوح مختلف و در سه سطح دمایی (45، 55 و 65°C) در خشک‌کن جریان هوای گرم، بر زمان خشک‌کردن، شیب منحنی‌های نسبت رطوبت و ضریب آهنگ ثابت خشک‌شدن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از به‌کارگیری این پیش‌تیمارها در دماهای مختلف نشان داد که بیش‌ترین زمان خشک‌شدن به میزان 345 دقیقه و در دمای 45°C و در حالت تیمار شاهد و کم‌ترین زمان خشک‌شدن به میزان 75 دقیقه در دمای 65°C و در حالت استفاده از پیش‌تیمار میکروویو با توان 360 W اتفاق افتاد. هم‌چنین بالاترین میزان ضریب آهنگ ثابت خشک‌شدن در پیش‌تیمار میکروویو در دمای 65°C به میزان 0/1021 min<sup>-1</sup> و پایین‌ترین میزان این ضریب در دمای 45°C و در تیمار شاهد به میزان 0/0091 min<sup>-1</sup> بود. تغییرات ضریب آهنگ ثابت خشک‌شدن نشان داد که استفاده از پیش‌تیمارهای میکروویو و فراصوت به علت تخریب بافت محصول و خروج سریع‌تر رطوبت سبب افزایش این ضریب نسبت به تیمار شاهد می‌گردند. هم‌چنین استفاده از پیش‌تیمارهای آبیگری اسمزی و بلانچینگ به علت تاثیر کم روی سرعت خروج رطوبت از محصول سبب تغییرات کمی در شیب منحنی‌های خشک‌شدن نسبت به حالت شاهد گردید و به دنبال آن ضریب آهنگ ثابت خشک‌شدن پایین بود.

واژه‌های کلیدی: سینتیک خشک‌کردن، لایه‌های سیب، خشک‌کن جریان هوای گرم، آهنگ ثابت خشک‌شدن.

## 1- مقدمه

و ارزیابی روش خشک کردن مناسب برای یک محصول خاص مورد نیاز می‌باشند. اگرچه مطالعات مدل‌سازی خشک کردن لایه نازک مهم است، اما هیچ مدل نظری که هر دو پارامتر عملی و محاسباتی را یکی کند وجود ندارد. بنابراین، مطالعات تجربی در خشک کردن لایه نازک مهم هستند و معادلات خشک کردن لایه نازک ابزاری مهم در مدل‌سازی ریاضی خشک کردن است. این مدل‌ها کاربردی هستند و به اندازه کافی نتایج خوبی را ارائه می‌دهند [6]. به‌طور کل ارزیابی مدل‌ها با توجه به پارامترهای مختلف از جمله نوع محصول، پیش تیمار اعمال شده بر محصول، پارامترهای خشک کردن و روش خشک کردن به کار گرفته شده انجام می‌پذیرد.

مدل‌های خشک کردن لایه نازک شامل نوع نظری، نیمه تجربی و تجربی می‌باشند که مدل‌های تئوری و نیمه تجربی استفاده شده به‌طور گسترده از قانون دوم انتشار فیک مشتق شده و فرم ساده شده آن بر مبنای قانون دوم فیک به دست می‌آید [6]. مدل‌های تجربی به شدت به شرایط تجربی، داده‌های تجربی و تجزیه و تحلیل ابعادی وابسته بوده و اطلاعات محدودی در مورد رفتار خشک شدن محصول داده و از آن‌ها می‌توان به سادگی برای شبیه‌سازی خشک کردن استفاده کرد [6، 7]. در مدل‌های نیمه تجربی و نظری فقط مقاومت خارجی در برابر انتقال رطوبت بین محصول و هوا در نظر گرفته می‌شود [8]. بر این اساس در مدل‌های نیمه تجربی به دلیل استفاده از داده‌های تجربی و نیاز کم‌تر به مفروضات، به‌طور گسترده در مدل‌سازی خشک کردن لایه نازک مواد غذایی استفاده می‌گردند [9].

پژوهش‌های فراوانی در ارتباط با مدل‌سازی ریاضی، سینتیک فرایند خشک کردن و بررسی تغییرات ضریب آهنگ ثابت خشک شدن در محصولات مختلف کشاورزی از جمله فلفل قرمز [10]، برنج [11، 12]، آوآکادو [13]، هویج [14]، برگ‌های نعناع [15]، کدو [16]، دانه‌های انار [17]، فلفل [18]، شوید [19]، لایه‌های سیر [20]، انگور بی‌دانه [21]، فیله کوسه [22] و کیوی [23] انجام شده است.

اکثر پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با ضریب آهنگ ثابت خشک شدن در محصولات مختلف کشاورزی در روش‌های مختلف خشک کردن صورت پذیرفت و بررسی‌های مختلف نشان داد که تاکنون مطالعه‌ای در ارتباط با تاثیر پیش تیمارهای

خشک کردن محصولات کشاورزی یکی از رایج‌ترین روش‌های نگهداری می‌باشد. این روش به‌عنوان یک عملیات مهم برای خروج رطوبت از طریق فرایند انتشار محسوب می‌گردد. کاربرد خشک کردن در طی چند قرن، به بخش‌های مختلف، مانند صنایع دارویی و صنایع چوب گسترش یافته است. در این راستا توسعه مدل‌های مناسب برای مطالعه فرایند خشک شدن و پدیده‌های انتشار آن، از جمله انتشار رطوبت و خروج رطوبت، از اهمیت بالایی برخوردار است. مدل‌های توسعه یافته در زمینه خشک کردن محصولات کشاورزی برای طراحی سیستم‌های جدید خشک کن و هم‌چنین تعیین شرایط بهینه خشک کردن و پیش‌بینی پدیده‌های انتقال هم‌زمان جرم و حرارت در طول فرایند خشک کردن استفاده می‌شود [1].

در این راستا، بر اساس داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌های خشک کردن لایه نازک، مدل منحنی خشک کردن می‌تواند در مورد (الف) یک محصول واحد در معرض هوای خشک و یا یک لایه از دانه‌ها و (ب) ضخامتی از دانه‌ها به‌صورت چند لایه در صورتی که دمای و رطوبت نسبی هوای خشک بتواند برای محاسبات فرایند خشک کردن در حالت ترمودینامیکی مشابه (بدون ایجاد گرادیان حرارتی و رطوبتی بین لایه‌های مختلف) در هر زمان از فرایند خشک کردن به کار رود، استفاده شود [2]. در نتیجه، به نظر می‌رسد که مدل‌های ریاضی ابزارهایی مفید برای پیش‌بینی سینتیک خشک کردن مواد زیستی حساس به حرارت باشند [3]. برای تعیین مدل مناسب در فرایند خشک کردن، منحنی‌های نسبت رطوبت خشک کردن می‌توانند تحت شرایط داده شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند [4]. اصل فرایند مدل‌سازی بر اساس به‌کارگیری مجموعه‌ای از معادلات ریاضی است که به اندازه کافی می‌تواند ویژگی‌های سیستم را توصیف کنند [5]. مدل‌های جامع از معادلات انتقال هم‌زمان جرم و حرارت همراه با متغیرهای خواص مواد غذایی و چروکیدگی و معادلات آن‌ها که دارای یک سیستم غیرخطی درجه دو، همراه با معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی است، استفاده می‌کنند [5]. از معادلات لایه نازک برای برآورد زمان خشک کردن محصولات مختلف و تعمیم منحنی زمان خشک کردن استفاده می‌شود. علاوه بر این، مدل‌ها برای انتخاب

مختلف بر ضریب آهنگ ثابت خشک شدن انجام نشده است. در این پژوهش در ابتدا سعی شد تا با برآزش مدل‌های مختلف ریاضی بر داده‌های آزمایشگاهی، ضرایب این مدل‌ها استخراج و در مرحله بعد به مقایسه ضرایب به دست آمده در پیش‌تیمارهای مختلف پرداخته شد و اثرات پیش‌تیمارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

دستگاه حمام فراصوت (Ultrasonic cleaner, KMH1) ساخت کشور چین) با فرکانس 40 kHz با توان 120 W استفاده گردید. با توجه به ثابت بودن سطح فرکانس دستگاه، نمونه‌های سیب درون آب مقطر با دمای 30°C قرار گرفته شد و در سه سطح زمانی 15، 30 و 45 دقیقه تحت تاثیر امواج فراصوت قرار گرفتند. به منظور یکنواختی عملیات پیش‌تیمار فراصوت، سطح آب مقطر در حمام فراصوت تا نقطه توصیه شده پر گردید.

## 2- مواد و روش‌ها

### 1-2- آماده‌سازی نمونه‌ها

سیب‌های مورد آزمایش در این پژوهش رقم زرد لبنانی از بازار تهیه و پس از جداسازی میوه‌های ناسالم و آسیب دیده تا زمان آزمایش در یخچال در دمای 4°C نگهداری گردید. لایه‌های سیب به شکل برگه‌های نازک به ضخامت 5 میلی‌متر به منظور تعیین رطوبت اولیه نمونه‌ها، از روش وزنی با استفاده از آون (روش وزنی) در دمای 105°C به مدت 4 ساعت استفاده شد و میزان رطوبت اولیه محصول 87٪ بر پایه تر به دست آمد [24]. در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر پیش‌تیمارهای مختلف بر ضرایب مدل‌های ریاضی، آزمایش‌های مختلف خشک‌کردن لایه‌های سیب در 3 دمای مختلف (45، 55 و 65°C) و در سرعت ثابت جریان هوای گرم 0/5 متر بر ثانیه در پیش‌تیمارهای مختلف از جمله پیش‌تیمار آبیگری اسمزی، فراصوت، آب داغ یا بلانچینگ و مایکروویو انجام پذیرفت.

### 2-2- پیش‌تیمار آبیگری اسمزی

محلول‌های اسمزی مورد استفاده در این پژوهش با غلظت‌های 30، 50 و 70٪ (وزنی-حجمی) ساکارز و گلوکز آماده‌سازی گردید. نسبت میوه به محلول‌های آماده شده در تمامی آزمایش‌ها 1 به 10 بود. نمونه‌های سیب آماده شده در محلول‌های اسمزی در دمای 30°C به مدت 60 دقیقه و با دور همزنی 100 دور بر دقیقه غوطه‌ور گردید. پس از اتمام فرایند پیش‌تیمار، نمونه‌های سیب از محلول اسمزی خارج شده و پس از خشک کردن سطحی، نمونه‌های سیب به محیط خشک‌کن منتقل گردید.

### 2-4- پیش‌تیمار بلانچینگ

برای اعمال پیش‌تیمار بلانچینگ، ابتدا آب داغ در سه سطح دمایی 70، 80 و 90°C آماده‌سازی گردید. به منظور اعمال انرژی یکسان توسط انرژی حرارتی روی لایه‌های سیب، نمونه‌ها به مدت 3 دقیقه در آب 70°C، به مدت 2/5 دقیقه در آب 80°C و به مدت 2 دقیقه در آب 90°C قرار داده شد. در آب داغ فرو برده شدند. نمونه‌های پیش‌تیمار شده با آب داغ بعد از اتمام فرایند پیش‌تیمار به مدت دو دقیقه روی آبکش قرار داده شد و بعد از آن با کاغذ خشک‌کن، نمونه‌ها خشک گردید و به درون خشک‌کن منتقل گردید.

### 2-5- پیش‌تیمار مایکروویو

نمونه‌های لایه شده سیب بعد از آماده‌سازی به منظور اعمال پیش‌تیمار مایکروویو در سطوح مختلف توانی (90، 180 و 360 W) درون محفظه مایکروویو قرار داده شدند. به منظور اعمال انرژی یکسان روی نمونه‌های توسط اشعه مایکروویو، پیش‌تیمار مایکروویو در سطح توان 90 W به مدت 10 دقیقه، در سطح توان 180 W به مدت 5 دقیقه و در سطح توان 360 W به مدت 2/5 دقیقه به نمونه‌ها اعمال گردید. بعد از اتمام فرایند پیش‌تیمار تمامی نمونه‌ها وزن گردید و سپس به محیط خشک‌کن منتقل شد. فرایند اعمال پیش‌تیمار با استفاده از یک مایکروویو خانگی مدل سولاردام (ساخت کشور کره) انجام پذیرفت.

### 2-6- مدل‌سازی فرایند خشک کردن

به منظور مدل‌سازی خشک‌شدن ورقه‌های سیب، از نسبت رطوبت نمونه‌ها در طی خشک‌شدن استفاده گردید. نسبت

### 3-2- پیش‌تیمار فراصوت

به منظور اعمال پیش‌تیمار فراصوت روی نمونه‌های سیب از

رطوبت با استفاده از رابطه (1) تعیین گردید [25].  
 $MR_{exp,i}$  نسبت رطوبت تجربی نام،  $MR_{pre,i}$  نسبت رطوبت پیشگویی شده نام،  $N$  تعداد مشاهدات و  $m$  تعداد ثابت‌های خشک شدن می‌باشد.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

**2-7- بررسی و تعیین مقادیر آهنگ ثابت خشک شدن**  
 به‌منظور تعیین مقادیر مختلف آهنگ ثابت خشک شدن، بعد از اتمام فرایند مدل‌سازی و استخراج تمامی ضرایب از مدل‌های مختلف، مقادیر  $k$  از تمامی مدل‌ها استخراج گردید. در جدول (1) پارامتر  $k$  در مدل‌های مختلف ریاضی نشان دهنده ضریب آهنگ ثابت خشک شدن در فرایند خشک کردن است که با برازش مدل‌های مختلف بر داده‌های آزمایشگاهی به‌دست می‌آید [10-12]. در این پژوهش پارامتر  $k$  با توجه به نتایج مدل‌سازی ریاضی و انتخاب بهترین مدل ریاضی تعیین گردید و پارامترهای آهنگ ثابت خشک شدن ( $k$ ) بهترین مدل ریاضی در نتایج ارائه گردید. ضریب آهنگ ثابت خشک شدن متناسب با روند خروج رطوبت از محصول است که در این تحقیق سعی بر آن است که تاثیر پیش‌تیمارهای مختلف بر این ضریب مورد بررسی قرار گیرد.

رطوبت نسبی (بی‌بعد)،  $M_t$  میزان رطوبت در هر لحظه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)،  $M_e$  رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)،  $M_0$  رطوبت اولیه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد) می‌باشد. با توجه سطح بالای رطوبت اولیه لایه‌های سیب، مقادیر  $M_e$  در مقایسه با مقادیر  $M_0$  برای زمان‌های طولانی خشک شدن بسیار کوچک هستند. بنابراین می‌توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به‌صورت معادله (2) ساده کرد [25].

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad (2)$$

به‌منظور انتخاب بهترین مدل‌های ریاضی، ابتدا 14 مدل ریاضی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش گردید و سپس 8 مدل با خصوصیات برازشی بهتر (بر اساس پارامترهای آماری) انتخاب گردید. 8 مدل برازش داده شده بر داده‌های آزمایشگاهی در جدول (1) آورده شده است.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- سینتیک خشک شدن

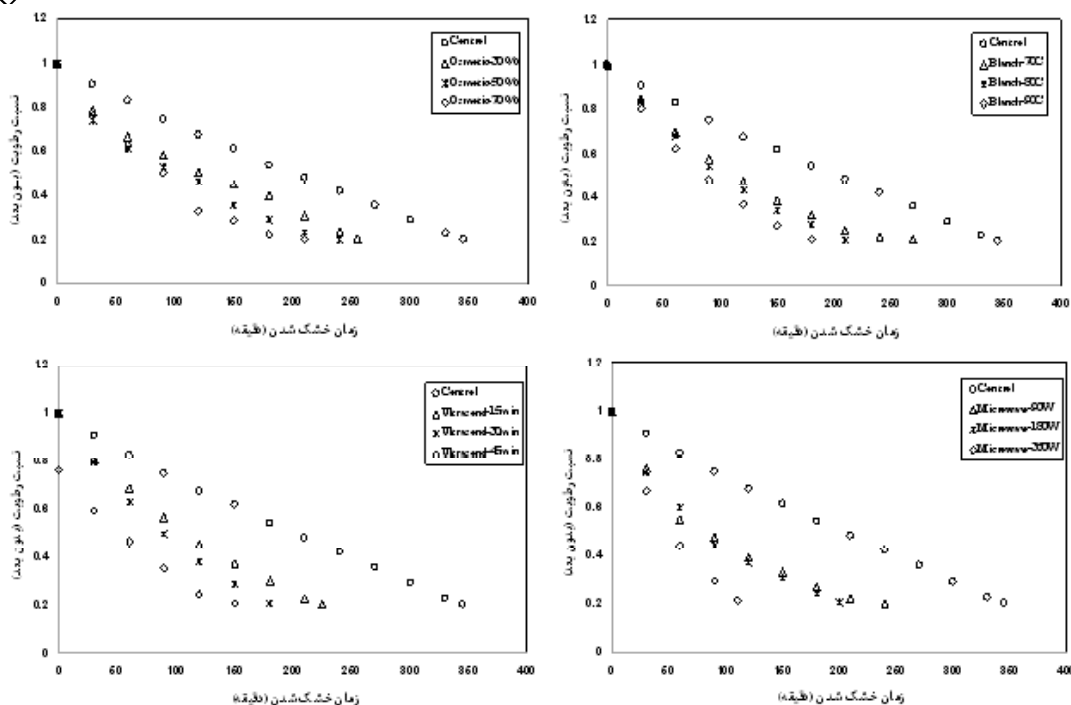
بررسی شکل‌های 1 تا 3 نشان می‌دهد که مرحله سرعت خشک کردن ثابت در فرایند خشک شدن لایه‌های سیب در تمامی تیمارها وجود ندارد و کل فرایند خشک شدن در دوره سرعت نزولی خشک شدن اتفاق می‌افتد. این امر نشان می‌دهد که پدیده فیزیکی انتشار، محتمل‌ترین سازوکار هدایت کننده خروج رطوبت می‌باشد. البته همان‌طور که با توجه به اشکال مختلف 1 تا 3 می‌توان دریافت که در مراحل ابتدایی خشک کردن شیب نزول سرعت خشک کردن زیاد و در مراحل بعدی این شیب کاهش می‌یابد. دلیل این امر می‌تواند زیاد بودن مقدار انتشار رطوبت در مراحل ابتدایی فرایند خشک کردن باشد. با گذشت زمان رطوبت محصول کاهش یافته و به دنبال آن میزان انتشار رطوبت از محصول کاهش یافته و سرعت خشک شدن لایه‌های سیب کم شده و به دنبال آن زمان خشک شدن افزایش می‌یابد که این امر در مراحل پایانی فرایند

مدل‌های مذکور با نسبت رطوبت‌های به‌دست آمده حاصل از آزمایش‌های مختلف به کمک نرم‌افزار MATLAB 2010 برازش داده شد و برای تعیین بهترین مدل از سه معیار ضریب تعیین ( $R^2$ )، مربع کای ( $\chi^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. بهترین برازشی که می‌تواند خصوصیات خشک شدن لایه‌های سیب را توصیف کند برازشی است که دارای بیش‌ترین ضریب همبستگی ( $R^2$ )، کم‌ترین مربع کای ( $\chi^2$ ) و کم‌ترین ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها (RMSE) باشد.

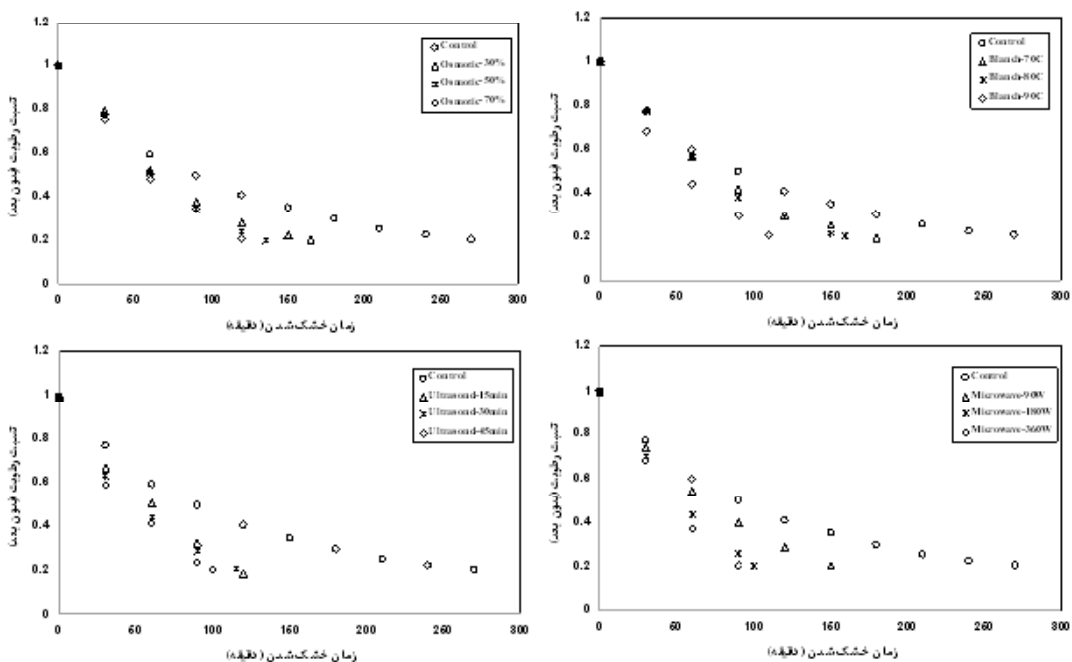
$$R^2 = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{pre} - MR_{exp,i})^2} \right] \quad (3)$$

$$C^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - m} \quad (4)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

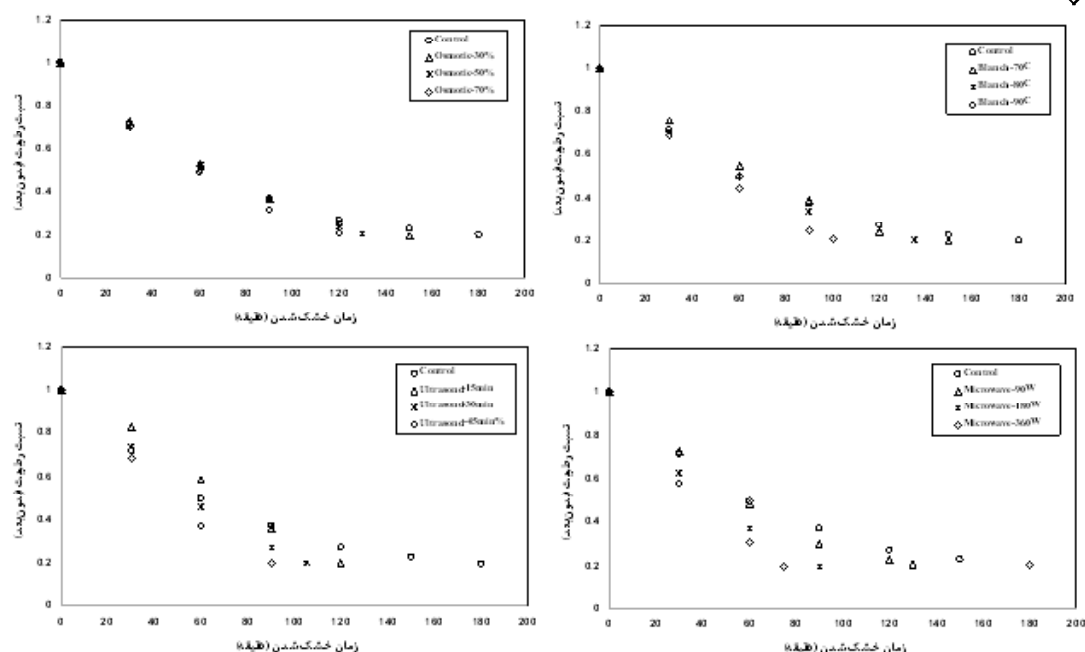


شکل (1) تغییرات نسبت رطوبت خشک شدن لایه‌های سیب با استفاده از پیش تیمارهای مختلف در دمای 45 °C



شکل (2) تغییرات نسبت رطوبت خشک شدن لایه‌های سیب با استفاده از پیش تیمارهای مختلف در دمای 55 °C

خشک شدن مشاهده می‌گردد. با مقایسه شکل‌های 1 تا 3 می‌توان دریافت که با افزایش دما زمان خشک شدن کاهش می‌یابد که دلیل این امر می‌تواند افزایش جنبش مولکول‌های آب موجود در محصول در اثر گرما و افزایش سرعت تبخیر آن باشد. از طرف دیگر با مقایسه این سه شکل و بررسی تاثیر پیش تیمارهای متفاوت در دماهای مختلف می‌توان دریافت که پیش تیمار مایکروویو نسبت به سه پیش تیمار دیگر (آبگیری اسمزه، آلتراسوند و بلانچینگ) می‌تواند سبب کاهش بیش‌تر زمان خشک شدن گردد. دلیل این امر می‌تواند این باشد که پیش تیمار مایکروویو لایه سطحی سیب را دچار تخریب کرده



شکل (3) تغییرات نسبت رطوبت خشک شدن لایه‌های سیب با استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف در دمای  $65^{\circ}\text{C}$

شرایط مورد آزمایش (دما، سرعت جریان هوا و نوع پیش‌تیمار) مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. اصل مدل‌سازی فرایند خشک‌شدن محصولات کشاورزی (لایه‌های سیب) بر اساس داشتن مجموعه‌ای از معادلات ریاضی دقیق و ساده‌ای است که آن‌ها (مدل‌های ریاضی) به اندازه کافی می‌تواند شرایط سیستم (شرایط مختلف سامانه خشک‌شدن و خشک‌ردن) را توصیف کنند. 8 مدل موجود در جدول (1)، بر منحنی‌های خشک شدن حاصل از داده‌های آزمایشی برازش داده شدند. سپس مدل‌های خشک‌شدن لایه نازک مختلف با توجه به مقادیر  $R^2$ ،  $\chi^2$  و RMSE ارزیابی شدند و بهترین مدل بر اساس مقادیر بیش‌تر  $R^2$  و مقادیر کم‌تر  $\chi^2$  و RMSE انتخاب شد. نتایج حاصل از برازش مدل‌های ریاضی بر داده‌های آزمایشی نشان داد که مدل پیچ بهترین برازش را بر داده‌های آزمایشی دارد. بهترین نتیجه حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های ارائه شده (ضرایب و شاخص‌های آماری) در تیمارهای مختلف در جدول‌های 2 تا 5 آورده شده است.

و این عامل سبب می‌شود که منافذ سطحی لایه سیب در این پیش‌تیمار نسبت به پیش‌تیمارهای دیگر و تیمار شاهد بزرگ‌تر بوده و رطوبت داخل ماده می‌تواند به سرعت از سطح لایه سیب خارج شود. علاوه بر آن به علت تخریب لایه سطحی توسط پیش‌تیمار مایکروویو، تجمع املاح حاصل از تبخیر رطوبت در لوله‌های موئین که سبب سخت شدن لایه سطحی شده و عمل خروج رطوبت را دچار مشکل می‌کند در این پیش‌تیمار کم‌تر بوده و رطوبت با سرعت بیش‌تری می‌تواند از محصول خارج گردد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین زمان خشک‌شدن در دمای  $50^{\circ}\text{C}$ ،  $40^{\circ}\text{C}$  و  $60^{\circ}\text{C}$  در تیمار شاهد به میزان 270، 345 و 180 دقیقه بود. هم‌چنین کم‌ترین زمان خشک‌شدن در دمای  $50^{\circ}\text{C}$  و  $60^{\circ}\text{C}$  در پیش‌تیمار مایکروویو با توان 360 وات به مدت 2/5 دقیقه به میزان 110، 90 و 75 دقیقه بود. نتایج مشابهی توسط سایر پژوهشگران در خشک‌کردن محصولات مختلف کشاورزی با استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف [10-23] ارائه شده است.

### 3-2- بررسی مدل‌های ریاضی

رطوبت ورقه‌های نازک سیب در شروع خشک شدن 87 درصد بر پایه تر بود. به‌منظور پیدا کردن مدل مناسب در فرایند خشک‌کردن، منحنی‌های خشک‌کردن می‌توانند تحت

3-3- بررسی تاثیرات دما و نوع پیش‌تیمار بر آهنگ ثابت خشک‌شدن لایه‌های سیب  
مقایسه شکل‌های 4 تا 6 نشان می‌دهد که مقادیر آهنگ ثابت

جدول (1) معادلات خشک کردن لایه نازک مورد استفاده

منبع	معادله مدل	نام مدل
[25]	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	میدیلی و همکاران
[26]	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	ورما و همکاران
[27]	$MR = a \exp(-kt)$	هندرسون و پابیس
[28]	$MR = a \exp(-kt) + c$	لگاریتمی
[29]	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	دو جمله‌ای
[30]	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	تقریب پخش
[31]	$MR = \exp(-kt^n)$	پیچ
[32]	$MR = \exp(-kt)$	نیوتن

جدول (2) شاخص های آماری مدل پیچ برای پیش تیمار اسمزی و دماهای مختلف آزمایشی

شاخص های آماری			دمای خشک کردن	شرایط خشک شدن
RMSE	$\chi^2$	R <sup>2</sup>		
0/0120	0/00014	0/9907	45	پیش تیمار اسمز با غلظت 30%
0/0118	0/00014	0/9887	55	
0/0429	0/0018	0/9840	65	
0/0101	0/0019	0/9791	45	پیش تیمار اسمز با غلظت 50%
0/0249	0/0006	0/9918	55	
0/457	0/0021	0/9817	65	
0/0257	0/00066	0/9946	45	پیش تیمار اسمز با غلظت 70%
0/0251	0/00063	0/9948	55	
0/0102	0/0001	0/9991	65	
0/0120	0/00014	0/9987	45	تیمار شاهد بدون پیش تیمار
0/0118	0/00014	0/9987	55	
0/0429	0/0018	0/9840	65	

**جدول (3)** شاخص‌های آماری مدل پیچ برای پیش‌تیمار فراصوت و دماهای مختلف آزمایشی

شاخص‌های آماری			دمای خشک کردن	شرایط خشک‌شدن
RMSE	$\chi^2$	R <sup>2</sup>		
0/0332	0/0011	0/9906	45	پیش‌تیمار فراصوت به مدت 15 دقیقه
0/0301	0/00091	0/9918	55	
0/0388	0/0015	0/9878	65	
0/0325	0/0011	0/9910	45	پیش‌تیمار فراصوت به مدت 30 دقیقه
0/0343	0/0012	0/9901	55	
0/0383	0/0015	0/9872	65	
0/0312	0/00097	0/9903	45	پیش‌تیمار فراصوت به مدت 45 دقیقه
0/0323	0/0010	0/9914	55	
0/0326	0/0010	0/9906	65	
0/0120	0/00014	0/9987	45	تیمار شاهد بدون پیش‌تیمار
0/0118	0/00014	0/9987	55	
0/0429	0/0018	0/9840	65	

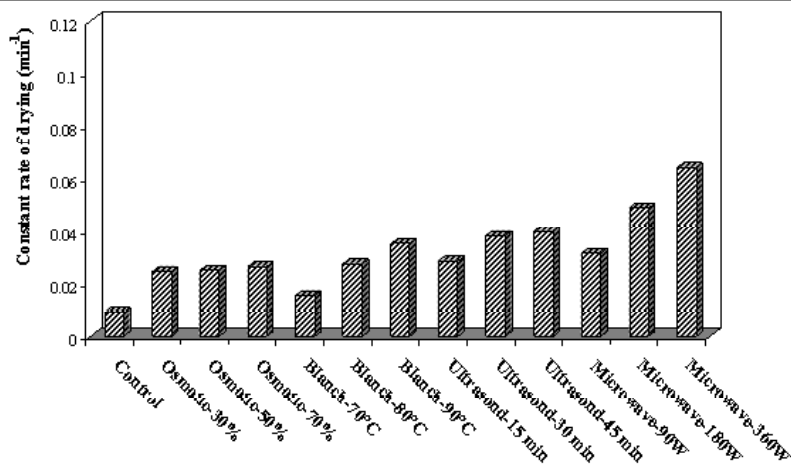
**جدول (4)** شاخص‌های آماری مدل پیچ برای پیش‌تیمار بلانچینگ و دماهای مختلف آزمایشی

شاخص‌های آماری			دمای خشک کردن	شرایط خشک‌شدن
RMSE	$\chi^2$	R <sup>2</sup>		
0/0970	0/009	0/9118	45	پیش‌تیمار بلانچینگ بادمای 70 °C
0/1292	0/01669	0/8314	55	
0/1165	0/01357	0/8734	65	
0/0725	0/0053	0/9537	45	پیش‌تیمار بلانچینگ بادمای 80 °C
0/0794	0/0063	0/9447	55	
0/1047	0/01097	0/8992	65	
0/0462	0/0015	0/9819	45	پیش‌تیمار بلانچینگ بادمای 90 °C
0/0657	0/0043	0/9631	55	
0/0943	0/0089	0/9182	65	
0/0120	0/00014	0/9987	45	تیمار شاهد بدون پیش‌تیمار
0/0118	0/00014	0/9987	55	
0/0429	0/0018	0/9840	65	

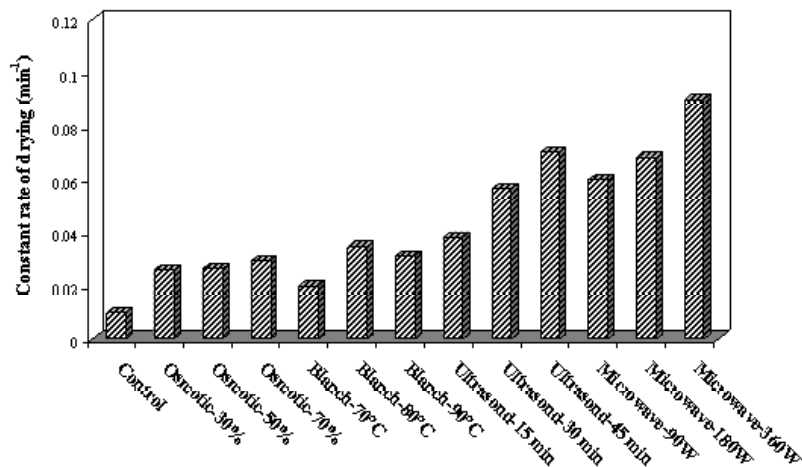


جدول (5) شاخص های آماری مدل پیچ برای پیش تیمار مایکروویو و دماهای مختلف آزمایشی

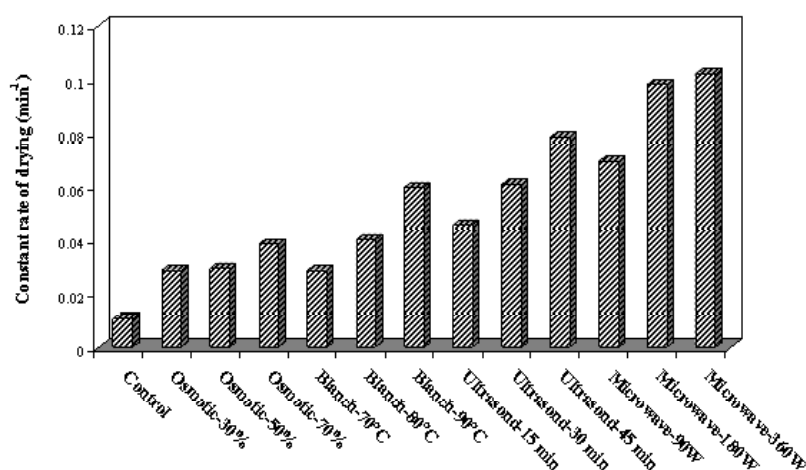
RMSE	شاخص های آماری		دمای خشک کردن	شرایط خشک شدن
	$\chi^2$	R <sup>2</sup>		
0/0100	0/0001	0/9901	45	پیش تیمار مایکروویو با توان 90 وات
0/0104	0/00011	0/9910	55	
0/0063	0/00004	0/9917	65	
0/0042	0/000017	0/9989	45	پیش تیمار مایکروویو با توان 180 وات
0/0121	0/00014	0/9986	55	
0/0133	0/00017	0/9982	65	
0/0091	0/00008	0/9942	45	پیش تیمار مایکروویو با توان 360 وات
0/0105	0/00011	0/9930	55	
0/0097	0/00009	0/9921	65	
0/0120	0/00014	0/9987	45	تیمار شاهد بدون پیش تیمار
0/0118	0/00014	0/9927	55	
0/0429	0/0018	0/9840	65	



شکل (4) تغییرات آهنگ ثابت خشک شدن با استفاده از پیش تیمارهای مختلف در دمای 45 °C



شکل (5) تغییرات آهنگ ثابت خشک شدن با استفاده از پیش تیمارهای مختلف در دمای 55 °C



شکل (6) تغییرات آهنگ ثابت خشک‌شدن با استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف در دمای 65 °C

خشک‌شدن لایه‌های سیب (k) با افزایش دما روند افزایشی دارد. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از عملیات پیش‌تیمار نیز می‌تواند سبب افزایش مقادیر آهنگ ثابت خشک‌شدن در مدل‌های ریاضی گردد. در این بین استفاده از پیش‌تیمارهای میکروویو و فراصوت نسبت به دو پیش‌تیمار دیگر (آبگیری اسمزی و بلانچینگ) می‌تواند سبب افزایش ضریب ثابت خشک‌شدن گردد. دلیل این امر می‌تواند تغییر زمان خشک‌شدن در اثر تغییرات دما و استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف باشد. افزایش دمای خشک‌کردن به دلیل افزایش گرادیان حرارتی در محصول در حال خشک‌شدن سبب خروج سریع‌تر رطوبت از محصول گردیده و زمان خشک‌شدن کاهش یافته و شیب منحنی خشک‌شدن افزایش می‌یابد که روی ضرایب مدل اثرگذار خواهد بود و مقدار آن‌ها را افزایش می‌دهد. در طول فرایند خشک‌کردن میوه‌ها و سبزی‌ها فروپاشی سلولی اتفاق می‌افتد، که نتیجه آن انسداد بیشتر حفرات محصول در حال خشک‌شدن است که این پدیده فرایند خشک‌کردن را با مشکل مواجه می‌کند و در این پژوهش می‌توان تاثیر آن را در تیمار شاهد مشاهده کرد. در مقابل، استفاده از امواج میکروویو سبب تخریب دیواره سلولی می‌گردد با اعمال اشعه میکروویو حرارت درون محصول افزایش یافته و به دنبال آن افزایش فشار بخار در نمونه‌ها به وجود آمده و نمونه‌ها باد می‌کند. این تخریب سبب خروج سریع‌تر رطوبت از محصول شده و به دنبال آن زمان خشک‌شدن کاهش یافته و شیب نمودار نسبت رطوبت-زمان افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند سبب افزایش ضریب آهنگ ثابت خشک‌شدن گردد. هم‌چنین استفاده از امواج فراصوت منجر به افزایش میزان خروج رطوبت از لایه‌های سیب طی فرایند خشک‌شدن می‌گردد که دلیل این امر به علت افزایش دما در لایه مرزی، تغییر فشار در اثر کاویتاسیون، توسعه میکروکانال‌ها در اثر ایجاد ترک در نتیجه تنش برشی حاصل از کاویتاسیون، اغتشاش در لایه مرزی و ایجاد تغییرات ساختمانی در محیط اشاره کرد. به‌کارگیری این پیش‌تیمار (آلتراسوند) نیز مانند پیش‌تیمار میکروویو سبب افزایش مقدار آهنگ ثابت خشک‌شدن در اثر کاهش زمان خشک‌شدن و افزایش شیب نمودار تغییرات رطوبت می‌گردد. هم‌چنین بررسی 4 تا 6 نشان داد که پیش‌تیمارهای بلانچینگ و آبگیری اسمزی می‌تواند تاثیر کم‌تری بر ضریب آهنگ ثابت خشک‌شدن داشته باشد. دلیل این امر آن است که استفاده از فرایند آبگیری اسمزی در عملیات پیش‌تیمار سبب ایجاد گرادیان غلظت بین ماده غذایی و محلول اسمزی شده و به دنبال آن دو جریان خلاف جهت هم به وجود می‌آید، که موجب خروج آب از بافت محصول به سمت محلول اسمزی شده و به دنبال آن مواد جامد از محلول به داخل بافت ماده غذایی نفوذ می‌کند. این امر سبب شده تا سطح رویی محصول و لوله‌های موبین پر از مواد قندی شده و خروج رطوبت از محصول در طول فرایند خشک‌شدن به سختی انجام گیرد و به دنبال آن زمان خشک‌شدن افزایش و شیب نمودار تغییرات رطوبت نسبت به زمان کاهش یابد و به دنبال آن آهنگ ثابت خشک‌شدن نیز کاهش یابد. هم‌چنین استفاده از پیش‌تیمار بلانچینگ سبب

خشک‌شدن لایه‌های سیب (k) با افزایش دما روند افزایشی دارد. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از عملیات پیش‌تیمار نیز می‌تواند سبب افزایش مقادیر آهنگ ثابت خشک‌شدن در مدل‌های ریاضی گردد. در این بین استفاده از پیش‌تیمارهای میکروویو و فراصوت نسبت به دو پیش‌تیمار دیگر (آبگیری اسمزی و بلانچینگ) می‌تواند سبب افزایش ضریب ثابت خشک‌شدن گردد. دلیل این امر می‌تواند تغییر زمان خشک‌شدن در اثر تغییرات دما و استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف باشد. افزایش دمای خشک‌کردن به دلیل افزایش گرادیان حرارتی در محصول در حال خشک‌شدن سبب خروج سریع‌تر رطوبت از محصول گردیده و زمان خشک‌شدن کاهش یافته و شیب منحنی خشک‌شدن افزایش می‌یابد که روی ضرایب مدل اثرگذار خواهد بود و مقدار آن‌ها را افزایش می‌دهد. در طول فرایند خشک‌کردن میوه‌ها و سبزی‌ها فروپاشی سلولی اتفاق می‌افتد، که نتیجه آن انسداد بیشتر حفرات محصول در حال خشک‌شدن است که این پدیده فرایند خشک‌کردن را با مشکل مواجه می‌کند و در این پژوهش می‌توان تاثیر آن را در تیمار شاهد مشاهده کرد. در مقابل، استفاده از امواج میکروویو سبب تخریب دیواره سلولی می‌گردد با اعمال اشعه میکروویو حرارت درون محصول افزایش یافته و به دنبال آن افزایش فشار بخار در نمونه‌ها به وجود آمده و نمونه‌ها باد می‌کند. این تخریب سبب خروج سریع‌تر رطوبت از محصول شده و به دنبال آن زمان خشک‌شدن کاهش یافته و شیب نمودار نسبت رطوبت-زمان افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند

و استفاده پیش تیمار در سطوح مختلف، لایه‌های سیب خشک گردید و نتایج زیر به دست آمد:

1- نتایج حاصل از برازش مدل‌های ریاضی بر داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که مدل پیچ بهترین برازش را بر داده‌ها دارد.

2- نتایج حاصل از داده‌های به دست آمده نشان داد که با افزایش دمای خشک کردن از 45 به 65 °C، شیب منحنی‌های خشک شدن افزایش و به دنبال آن ضریب آهنگ ثابت خشک شدن افزایش می‌یابد.

3- مقایسه استفاده از پیش تیمارهای مختلف نشان داد که بالاترین ضریب آهنگ ثابت خروج رطوبت مربوط به استفاده از پیش تیمار مایکروویو است در حالی که کمترین میزان ضریب آهنگ ثابت خروج رطوبت به تیمار شاهد مربوط می‌باشد.

4- نتایج نشان داد که استفاده از پیش تیمار آبیگری اسمزی به دلیل نفوذ مواد جامد به بافت سیب باعث کاهش خروج رطوبت از محصول شده و شیب منحنی خشک شدن نسبت به تیمار شاهد تغییر چندانی نخواهد داشت و در نتیجه پایینترین مقدار ضریب آهنگ ثابت خروج رطوبت را در بین پیش تیمارهای مختلف دارا می‌باشد.

تشکیل لایه سخت روی محصول در حال خشک شدن می‌گردد و این عامل سبب انسداد برخی از لوله‌های موئین در لایه‌های سیب می‌گردد و به دنبال آن خروج رطوبت از سطح محصول کاهش می‌یابد. این عامل سبب طولانی شدن زمان خشک شدن نسبت به سایر پیش تیمارها شده و شیب منحنی‌های خشک شدن کاهش یافته و به دنبال آن ضریب آهنگ ثابت خشک شدن در مدل‌های ریاضی کاهش می‌یابد. بالاترین میزان ضریب آهنگ ثابت خشک شدن در پیش تیمار مایکروویو در دمای 65 °C به میزان  $0/1021 \text{ min}^{-1}$  و پایینترین میزان این ضریب در دمای 45 °C و در تیمار شاهد به میزان  $0/0091 \text{ min}^{-1}$  بود.

نتایج مشابهی توسط سایر پژوهشگران در استفاده از پیش تیمارهای مختلف بر زمان خشک کردن ارائه گردید. نتایج به دست آمده در خشک کردن هویج [14]، کدو [16]، دانه‌های انار [17]، لفل [18] و دانه‌های انگور [21] نشان داد که در تمامی این محصولات با افزایش دمای خشک کردن و همچنین استفاده از پیش تیمار سبب افزایش مقدار ضریب آهنگ ثابت خشک شدن می‌گردد.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با به کارگیری دماهای (45، 55 و 65 °C)

#### منابع

- [1] Kucuk, H., Midilli, A., Kilic, A., Dincer, I. (2014). A Review on Thin-Layer Drying-Curve Equations, *Drying Tech.*, 32 (7), 757-773.
- [2] Jayasa, D.S., Cenkowskia, S., Pabisb, S., Muira, W.E. (1991). Review of thin-layer drying and wetting equations. *Drying Tech.*, 9(3), 551-588.
- [3] Chin, S.K., Law, C.L., Supramaniam, C.V.S., Cheng, P.G., Mujumdar, A.S. (2008). Convective drying of *Ganoderma tsugae* Murrill and effect of temperature on basidiospores. *Drying Tech.*, 26(12), 1524-1533.
- [4] Dikbasan, T. (2007). Determination of effective parameters for drying of apples. M.Sc. thesis, I zmir Institute of Technology, I zmir, Turkey.
- [5] Yucel, U., Alpas, H., Bayindirli, A. (2010). Evaluation of high pressure pretreatment for enhancing the drying rates of carrot, apple, and green bean. *J. Food Eng.*, 98(2), 266-272.
- [6] Erbay, Z., Icier, F. (2010). Thin-layer drying behaviors of olive leaves (*Olea europaea* L.). *J. Food Process Eng.*, 33(2), 287-308.
- [7] Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Tech.*, 20 (7), 1503-1513.
- [8] Akpinar, E.K., Sarsilmaz, C., Yildiz, C. (2004). Mathematical modelling of a thin layer drying of apricots in a solar energized rotary dryer. *Int. J. Energy*

- ment on drying time and quality of chilli pepper, *J. Food process. preserv.*, 34, 595-608.
- [19] Motevali, A., Younji, S., Amiri Chayjan, R., Aghilinategh, N., Banakar, A. (2013). Drying kinetics of dill leaves in a convective dryer. *Int. Agrophysics*, 27, 39-47.
- [20] Amiri Chayjan, R., Salari, K., Shadidi, B. (2012). Modeling some drying characteristics of garlic sheets under semi fluidized and fluidized bed conditions. *Res. Agri. Eng.*, 58 (2), 73-82.
- [21] Singh, S.P., Jairaj, K.S., Srikant, K. (2012). Universal drying rate constant of seedless grapes: A review. *Renew. Sust. Energy Rev.*, 16, 6295-6302.
- [22] Mujaffar, S., Sankat, C.K. (2005). The air drying behaviour of shark fillets. *Canadian Biosys. Eng.*, 47 (3), 11-21.
- [23] Darıcı, S., Şen, S. (2015). Experimental investigation of convective drying kinetics of kiwi under different conditions. *Heat Mass Trans.*, 51 (8), 1167-1176.
- [24] AOAC. (1995). Official temperatures of analysis of the association of official analytical chemists, 16<sup>th</sup> ed., Arlington, Virginia, 124-130.
- [25] Doymaz, I. (2007). Air drying characteristics of tomatoes. *J. Food Eng.*, 78, 1291-1297.
- [26] Verma, L.R., Bucklin, R.A., Endan, J.B., Wratten, F.T. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. *Trans. ASAE.*, 28, 296-301.
- [27] Chhinnan, M. S. (1984). Evaluation of selected mathematical models for describing thin-layer drying of in-shell pecans. *Trans. ASAE.*, 27, 610-615.
- [28] Dandamrongrak, R., Young, G., Mason, R. (2002). Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. *J. Food Eng.*, 95, 139-146.
- [29] Diamente, L.M., Munro, P.A. (1991). *Mathemati Res.*, 28(8), 739-752.
- [9] Seiedlou, S., Ghasemzadeh, H.R., Hamdami, N., Talati, F., Moghaddam, M. (2010). Convective drying of apple: Mathematical modeling and determination of some quality parameters. *Int. J. Agri. Bio.*, 12(2), 171-178.
- [10] Arora, S., Bharti, S., Sehgal, V.K. (2006). Convective Drying Kinetics of Red Chillies. *Drying Tech.*, 24 (2), 189-193.
- [11] Chen, H., Siebenmorgen, T.J., Marks, B.P. (1997). Relating Drying Rate Constant to Head Rice Yield Reduction of Long-Grain Rice. *Trans. ASAE.*, 40 (4), 1133-1139.
- [12] Soleymani, M., Shahedi, M. (2006). Study of Relating Drying Time and Drying Rate Constant (K) to Dryer Parameters and Milling Loss (Breakage) of Rice. *J. Sci. Tech. Agri. Natural Res.*, 10 (1), 211-222.
- [13] Avhad, M.R., Marchetti, J.M. (2016). Mathematical modelling of the drying kinetics of Hass avocado seeds, *Indust. Crops Products.*, 91 (30), 76-87.
- [14] Sutar, P.P., Prasad, S. (2007). Modeling Microwave Vacuum Drying Kinetics and Moisture Diffusivity of Carrot Slices, *Drying Tech.* 25 (10), 1695-1702.
- [15] Ozbek, B., Dadali, G. (2007). Thin-layer Drying Characteristics and Modelling of Mint Leaves Undergoing Microwave Treatment. *J. Food Eng.*, 83, 541-549.
- [16] Tunde-Akintunde, T.Y., Ogunlakin, G.O. (2013). Mathematical modeling of drying of pretreated and untreated pumpkin. *J. Food Sci. Tech.*, 50(4), 705-713.
- [17] Motevali, A., Minaei, S., Ahmadi, E., Azizi, M.H. (2012). Development of a model for drying of pomegranates by vacuum and microwave driers. *J. Agri. Sci. Tech.*, 14, 311-325.
- [18] Tunde-akintunde, T.Y. (2010). Effect of pretreat-

cal modeling of hot air drying of sweet potato slices. *Int. J. Food Sci. Tech.*, 26, 99.

[30] Ertekin, C., Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *J. Food Eng.*, 63, 349-359.

[31] Minaei, S., Motevali, A., Ahmadi, E., Azizi, M.H. (2012). Mathematical Models of Drying Pomegranate Arils in Vacuum and Microwave Dryers, *J. Agr. Sci. Tech.*, 14, 311-325.

[32] Ayensu, A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Sol. Energy*, 59, 121-126.