



## سینتیک خشک کردن فیلم‌های زیست تخریب پذیر به روش مایکروویو

محمد قربان پور<sup>۱\*</sup>، مهرا ن یوسفی<sup>۲</sup>

۱. دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

۲. کارشناس ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

(تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۱۳، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۶/۱۱/۲۵، تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۱۴)

### چکیده

خشک کردن یکی از روش‌های نگه‌داری می‌باشد که کاهش رطوبت از طریق انتقال همزمان حرارت و جرم صورت می‌گیرد. در این تحقیق سینتیک خشک کردن فیلم زیست تخریب پذیر بر پایه کارگینان به روش مایکروویو به‌عنوان روشی جدید، سریع و به‌نسبت کم هزینه مورد بررسی قرار گرفت و مناسب‌ترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک شدن معرفی شد. بدین منظور خشک کردن فیلم‌ها با استفاده از مایکروویو در توان‌های ۳۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ W انجام شد. هم‌چنین کیفیت برازش ۱۰ مدل ریاضی بر داده‌های آزمایش بر اساس پارامترهای ضریب تبیین ( $R^2$ ) مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و مربع کای ( $\chi^2$ ) ارزیابی گردید. مقایسه مدل‌های مختلف نشان داد مدل میدلی برای تخمین تغییرات رطوبت و توصیف رفتار خشک شدن فیلم می‌تواند مناسب‌ترین مدل باشد. هم‌چنین بیش‌ترین میزان ضریب نفوذ رطوبتی موثر در توان ۹۰۰ W به میزان  $7/41 \times 10^{-5}$  و کم‌ترین میزان ضریب نفوذ رطوبتی موثر در توان ۳۵۰ W به میزان  $2/78 \times 10^{-5}$  به دست آمد. نتایج نشان داد که توان مایکروویو بر سرعت خشک شدن اثر مهمی دارد و با افزایش توان خشک‌کن، زمان خشک کردن کاهش می‌یابد. نرخ اولیه خشک کردن برای توان ۹۰۰ W برابر  $8/9 \text{ g/min}$  و برای توان ۳۵۰ W برابر  $3/4 \text{ g/min}$  بود. طولانی‌ترین زمان فرایند خشک شدن در توان ۳۵۰ W مشاهده شد که ۵۰ min به طول انجامید. هم‌چنین، زمان خشک کردن فیلم‌ها با این روش نسبت به روش متداول (هوای گرم  $25^\circ\text{C}$ )، حدود ۹۷٪ کم شده بود که کاهش قابل توجهی است.

واژه‌های کلیدی: سینتیک، خشک کردن، فیلم زیست تخریب پذیر، خشک کن مایکروویو.

## ۱. مقدمه

مدل ریاضی بر داده‌های آزمایش بر اساس پارامترهای ضریب تبیین ( $R^2$ )، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و مربع کای ( $\chi^2$ ) ارزیابی گردید.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. تجهیزات آزمایشگاهی

از یک اجاق میکروویو خانگی قابل برنامه ریزی با حجم ۳۰ لیتر شرکت فلر ساخت کشور آلمان، با حداکثر توان خروجی ۹۰۰ W و فرکانس ۲۴۵۰ MHz استفاده شد.

### ۲.۲. تهیه و خشک کردن فیلم‌ها

فیلم‌های کاپا کارگینان (شرکت سیگما-آلد ریچ - آمریکا) به روش قالب‌گیری محلول تهیه شد [۲، ۳]. برای این منظور ابتدا محلول ۲ درصد وزنی- وزنی کاراگینان آماده و طی ۲۰ min در دمای  $90^\circ\text{C}$  حرارت دهی شد. پس از گذشت زمان مذکور، محلول تا دمای  $35^\circ\text{C}$  خنک شده و در نهایت ۳۰ mL از محلول نهایی توسط پیپت بر روی پتری دیش پلاستیکی با قطر ۸ سانتی متر به آرامی ریخته و توسط مایکروویو در توان‌های مختلف ۳۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ W خشک شدند. خشک کردن نمونه‌ها تا رسیدن به رطوبتی کمتر از ۱۰٪ ادامه پیدا کرد. تغییرات رطوبت با توزین فیلم‌ها در فاصله‌های زمانی مشخص توسط ترازوی دیجیتال با دقت  $\pm 0.1\text{ g}$  اندازه‌گیری شد. فیلم‌های خشک‌شده به آرامی از پلیت‌ها جدا و در کیسه‌های پلاستیکی از جنس پلی‌اتیلن نگهداری شدند [۹].

### ۳.۲. پایه تئوری

#### ۱.۳.۲. مدل‌سازی منحنی‌های خشک کردن

مدل‌سازی ریاضی فرایند خشک کردن برای طراحی، بهبود سیستم‌های خشک‌کن موجود و حتی کنترل فرایند استفاده می‌شود. داده‌های خشک کردن نهایی با روش مایکروویو با ۱۰ مدل ریاضی در جدول (۱) برآزش شدند. برای مدل‌سازی سینتیک خشک کردن فیلم‌ها از نسبت رطوبت استفاده شد. نسبت رطوبت، مقدار رطوبت نمونه را در هر لحظه نسبت به رطوبت اولیه و نهایی بیان کرده و از معادله (۱) به دست می‌آید:

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

افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی در خصوص انباشت و تجمع پلاستیک‌ها و تقاضای مصرف‌کنندگان برای محصولات غذایی سالم با ماندگاری بالا، موجب توجه روزافزون صنایع بسته‌بندی مواد غذایی به بسپارهای زیستی و فیلم‌های خوراکی شده است. بسپارهای زیستی یا پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر با داشتن ویژگی‌هایی مانند تجزیه‌پذیری، امکان تولید از ضایعات و سازگاری با محیط‌زیست، اثرات مطلوب زیست‌محیطی به همراه دارند. کاراگینان از جمله پلی ساکاریدهای طبیعی است که کاربرد آن در زمینه تولید فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی محافظت‌کننده از ماده غذایی در مقابل تبادل رطوبت، نور و اکسیژن به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است [۱-۳]. برای تهیه فیلم با استفاده از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر به‌طور معمول از روش قالب‌گیری محلول استفاده می‌شود. در این روش ماده پلیمری با پرکننده‌های مناسب ترکیب، محلول نهایی توسط پیپت بر روی یک ظرف به آرامی ریخته و برای زمانی بیش از ۲۴ h در گرم‌خانه در دمای بین  $25^\circ\text{C}$  تا  $35^\circ\text{C}$  خشک می‌شوند. در این روش خشک کردن از انتقال حرارت به روش‌های جابه‌جایی و یا هدایتی استفاده می‌شود. پایین بودن بازده انرژی و طولانی بودن زمان خشک کردن از معایب مهم این روش می‌باشد [۴-۶]. به‌منظور برطرف نمودن این مشکلات و در نتیجه رسیدن به فرایند مؤثر و سریع‌تر انتقال حرارت، استفاده از مایکروویو برای خشک کردن توسعه یافته است. در خشک کردن با مایکروویو حرارت در سرتاسر ماده تولید می‌گردد. امواج مایکروویو با ارتعاش مولکولی دو قطبی ایجاد حرارت می‌کنند. پس از جذب انرژی مایکروویو و تبدیل آن به انرژی حرارتی، حرارت توسط فرایندهای جابه‌جایی و هدایت به تمام قسمت‌های ماده غذایی منتقل می‌شود. اگرچه مطالعات زیادی در مورد استفاده از مایکروویو در خشک کردن میوه‌ها [۷] و استخراج ترکیبات گیاهان [۸] صورت گرفته، اما بر اساس جستجوی ما تاکنون هیچ تحقیقی در مورد نرخ خشک کردن فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر با مایکروویو نشده است. هدف از این تحقیق بررسی سینتیک خشک کردن فیلم زیست-تخریب‌پذیر کاراگینان در خشک‌کن مایکروویو می‌باشد. بدین منظور خشک کردن فیلم‌ها با استفاده از مایکروویو در توان‌های ۳۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ W انجام شد. در ادامه، کیفیت برآزش ۱۰

(m) می باشد. برای زمان های خشک شدن طولانی معادله (۶) ساده تر شده، و جملات در سری نامحدود سریعاً همگرا شده و در بیش تر موارد با اولین جمله سری تقریب زده شده و به صورت لگاریتمی نوشته می شود:

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L_0^2} \quad (7)$$

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به طور معمول با رسم داده های خشک شدن آزمایشی به صورت  $\ln(MR)$  در مقابل زمان خشک شدن  $t$  تعیین می شود که نمودار یک خط مستقیم با شیب  $(\pi^2 D_{eff})/(4L_0^2)$  می دهد [۱۱].

#### ۴.۲. تجزیه و تحلیل آماری

برای انجام محاسبه های آماری، هر کدام از آزمون ها حداقل در سه تکرار انجام و میانگین و انحراف معیار داده ها براساس روش های معمول انجام شد.

#### ۳. نتایج و بحث

##### ۱.۳. شکل ظاهری نمونه ها

نمونه ها دارای ظاهری شفاف و ساختاری ترد و شکننده بودند. فیلم های تهیه شده در توان های بالاتر دارای حباب بودند. ولیکن نمونه های تهیه شده در توان پائین تر مقدار حباب بسیار کمتری داشتند. دلیل حضور تعداد حباب زیادتر به دلیل جوشیدن محلول حین خشک کردن در توان های بالاتر می باشد. با توجه به استفاده نهایی فیلم های زیست تخریب پذیر که برای بسته بندی مواد غذایی می باشد، حضور حباب در فیلم تهیه شده، اشکال و ایراد بزرگی می باشد. از سوی دیگر وجود این حباب ها اثری معکوس و تخریبی بر روی خواص مکانیکی و به ویژه مقاومت کششی فیلم های تهیه شده خواهد داشت. پس استفاده از توان های پائین تر مایکروویو برای خشک کردن فیلم ها منجر به حباب کم تر و ظاهر مطلوب تر خواهد شد.

##### ۲.۳. منحنی کاهش رطوبت با زمان

شکل (۱) منحنی کاهش رطوبت فیلم ها در واحد زمان را در توان های تحت بررسی مایکروویو نشان می دهد. مطابق شکل، میزان رطوبت فیلم ها طی ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ min تحت به ترتیب ۳۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰W به حدود ۱۰ درصد می رسد. با توجه به شکل، با افزایش توان مایکروویو سرعت خروج رطوبت از فیلم

در این مدل ها MR نسبت رطوبت بدون بعد، M مقدار رطوبت محصول در هر زمان (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)،  $M_e$  محتوای رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد) و  $M_0$  مقدار رطوبت اولیه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد) است. مقدار  $M_e$  در مقایسه با M و  $M_0$  کوچک بوده لذا با در نظر نگرفتن  $M_e$  معادله (۱) به صورت معادله (۲) ساده می شود.

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

##### ۲.۳.۲. تعیین ضریب تبیین و آنالیز خطا

تناسب مدل های ریاضی با داده های آزمایشگاهی با سه معیار ضریب تبیین ( $R^2$ )، مربع کای ( $\chi^2$ ) و ریشه مربعات میانگین خطا (RMSE) ارزیابی شد.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-z} \quad (3)$$

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

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - M_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (5)$$

در روابط فوق ( $MR_{exp,i}$ ) رطوبت نسبی آزمایشگاهی  $i$  ام، ( $MR_{pre,i}$ ) رطوبت پیش بینی شده  $i$  ام، N تعداد مشاهدات و z تعداد ثابت های خشک شدن می باشند. بهترین برازشی که می تواند ویژگی های خشک شدن فیلم را توصیف کند، مدل دارای بیش ترین مقدار ضریب همبستگی  $R^2$  و کم ترین مقدار مربع میانگین خطای نسبی RMSE و مربع کای ( $\chi^2$ ) می باشد [۱۰].

##### ۳.۳.۲. محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

مشخصات خشک شدن محصولات بیولوژیکی با استفاده از قانون دوم نفوذ فیک توصیف می شود. کرانک این معادله را برای اجسام صفحه ای، کروی و استوانه ای شکل حل کرده است. با فرض این که توزیع رطوبت اولیه یکنواخت باشد و از تغییرات ضریب نفوذ، حجم و دانسیته صرف نظر شود می توان برای نمونه مورد مطالعه از معادله (۶) که برای اجسام صفحه ای صدق می کند استفاده کرد:

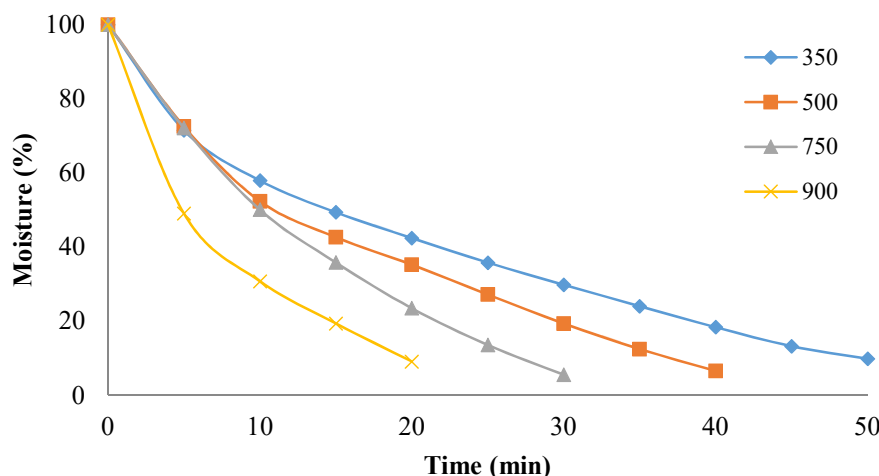
$$R = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L_0^2}\right) M \quad (6)$$

که  $D_{eff}$  ضریب نفوذ مؤثر ( $m^2/s$ ) و  $L_0$  نیم بعد صفحه بر حسب

جدول (۱) مدل‌های مورد استفاده برای برازش داده‌های تجربی

Table 1 Applied Models for fitting of experimental data

مدل Model	نام مدل Model name	شماره Number
$MR = \exp(-kt)$	lewis	1
$MR = a.\exp(-kt)$	Henderson -Pabis	2
$MR = a.\exp(-kt^n)+b.t$	Midilli	3
$MR = a.\exp(-kt)+(1-a).\exp(-gt)$	Verma	4
$MR = \exp(-kt^n)$	Page	5
$MR = a.\exp(-kt)+(1-a).\exp(-kbt)$	Approximation of diffusion	6
$MR = a.\exp(-kt)+c$	Logarithmic	7
$MR = 1+at+bt^2$	Wang and Singh	8
$MR = a.\exp(-kt)+(1-a).\exp(-kat)$	Two term exponential	9
$MR=a.\exp(-kt)+b.\exp(-gt)+c.\exp(-ht)$	Modified Henderson	10



شکل (۱) تأثیر توان‌های تحت بررسی مایکروویو بر کاهش رطوبت.

Fig. 1 Moisture vs. drying under different drying powers

مایکروویو از ۱۸۰ تا ۹۰۰ W، زمان خشک شدن از ۳۴ تا ۸ min کاهش می‌یابد [۱۲]. همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، فیلم‌های خشک شده با استفاده از توان‌های بالاتر مایکروویو دارای تعداد حباب زیادی بودند. در نتیجه افزایش توان مایکروویو طی فرایند خشک کردن موجب کاهش زمان خشک کردن و تضعیف خواص مکانیکی و ظاهری فیلم خواهد شد.

### ۳.۳. نرخ خشک کردن بر حسب زمان

شکل (۲) تأثیر توان‌های تحت بررسی مایکروویو بر نرخ خشک شدن فیلم‌ها را نمایش می‌دهد. طبق شکل، به ازای یک توان ثابت، در شروع فرایند خشک کردن، رطوبت اولیه محصول و نرخ از دست دادن رطوبت زیاد بود، ولی به تدریج با گذشت

زیست تخریب‌پذیر افزایش و زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش توان دستگاه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش زمان خشک کردن فیلم‌ها دارد. لازم به ذکر است در روش متداول که برای خشک کردن این فیلم‌ها استفاده می‌شود (استفاده از آن با دمای ۳۵-۲۵ °C) به مدت زمانی بیش از ۲۴ h نیاز است [۲]. بنابراین با استفاده از مایکروویو زمان خشک شدن در مقایسه با روش متداول کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. علت این است که در این روش، لایه سطحی و قسمت‌های داخلی به شدت گرم شده و در نتیجه باعث افزایش سرعت انتقال جرم و حرارت می‌گردد و رطوبت به سرعت خارج می‌شود. در مطالعات ازبک و دمیرهان در مورد خشک کردن برگ‌های نازک کرفس توسط مایکروویو نتایج حاکی از آن بود که با افزایش قدرت خروجی

که فرایند خشک کردن میوه آلبالو در مرحله نزولی اتفاق می افتد و توان خروجی مایکروویو و میزان فشار در خشک کن مایکروویو- خلا عامل مهمی در زمان خشک کردن میوه آلبالو و ثابت های مدل میدیلی است. با توجه به شاخص های مورد نظر، مدل میدیلی بهترین برازش با داده های آزمایشگاهی را نشان داد [۱۴]. در تحقیق انجام شده توسط خفاجه و همکاران، یک مدل ریاضی برای مدل کردن نرخ تبخیر توت سفید ارائه شد نرخ تبخیر بر حسب تابعی از زمان و توان بیان شد، نتایج نشان داد که مدل میدیلی بهترین مدل برای توصیف فرایند خشک کردن است [۱۵]. مطالعه انجام شده توسط ازبک و دادلی بر روی مدل سازی خشک کردن برگ نعنا به وسیله امواج مایکروویو در توان های ۱۸۰ تا ۹۰۰ W نشان داد که مدل میدیلی برازش مناسبی از فرایند خشک کردن داشت [۱۶].

با توجه به این که مدل میدیلی برای توان های ۳۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ W انتخاب شد ضرایب آن در جدول (۳) آورده شده است.

#### ۵.۳. تعیین ضریب نفوذ موثر

در بررسی حاضر برای محاسبه ضریب نفوذ موثر رطوبت، عملیات مربوط به خشک کردن مواد تا زمانی ادامه می یافت که اختلاف وزنی محسوسی بین دو توزین متوالی مشاهده نشود. سپس نسبت رطوبت (MR) نمونه های در حال خشک کردن با استفاده از معادله (۲) محاسبه شد. آنگاه با رسم نمودار  $\ln(MR)$  در مقابل زمان خشک کردن و تعیین شیب قسمت خطی نمودار (شکل ۳)، مقادیر ضریب نفوذ موثر رطوبتی ( $D_{eff}$ )، محاسبه و در جدول (۴) نشان داده شده است.

بیشترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۹۰۰ W به میزان  $1.0 \times 10^{-5}$  و کمترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۳۵۰ W به میزان  $2.78 \times 10^{-5}$  به دست آمد. ضریب نفوذ حرارتی موثر به دما و ترکیب مواد بستگی دارد. از آن جا که توان خروجی در خشک کن مایکروویو افزایش می یابد و دمای داخل محفظه زیاد می شود، در نتیجه میزان ضریب نفوذ حرارتی موثر در توان های بالاتر افزایش می یابد. کرولیس و همکاران نیز مقادیر ضریب نفوذ حرارتی موثر توت فرنگی را در توان های مختلف به دست آوردند که با نتایج فوق یکسان می باشد [۱۷].

زمان محتوای رطوبت محصول کاهش پیدا کرد و در نتیجه سرعت کاهش رطوبت نیز به طور طبیعی کاهش یافت. بنابراین شدت خشک کردن در ابتدای فرایند بیش تر از مراحل انتهایی است که این امر به دلیل زیاد بودن مقدار رطوبت در ابتدای فرایند خشک کردن و در نتیجه بالا بودن شدت تبخیر رطوبت از سطح فیلم است. در ادامه، با کاهش میزان رطوبت از شدت خشک شدن کاسته می شود. زیرا رطوبت از مرکز نمونه باید به سطح منتقل و سپس تبخیر گردد. هم چنین چروکیدگی سطح محصول در مراحل انتهایی خشک کردن باعث ایجاد یک مقاومت در انتقال آب به سطح محصول شده که این امر باعث کاهش شدت خشک کردن در مراحل پایانی خشک کردن می شود. با مقایسه نمودارهای حاصل از خشک کردن فیلم ها در توان های مختلف، افزایش توان مایکروویو تاثیر بسیار زیادی بر روی نرخ اولیه خشک کردن دارد. نرخ اولیه خشک کردن برای توان ۹۰۰ W برابر  $8/9$  g/min و برای توان ۳۵۰ W برابر  $3/4$  g/min بود.

#### ۴.۳. مدل سازی منحنی های خشک کردن

رطوبت نمونه ها در ابتدای فرایند خشک کردن  $75/89$  درصد بر پایه وزن مرطوب بود. پس از تعیین مقادیر نسبت رطوبت در توان های مختلف، ۱۰ مدل موجود در جدول (۱)، بر منحنی های خشک کردن حاصل از داده های آزمایشی برازش داده شدند. تحلیل رگرسیونی چند متغیره در محیط نرم افزار متلب انجام شد. بهترین مدلی که می تواند سینتیک خشک کردن فیلم را توصیف کند با توجه به بیشترین مقدار  $R^2$  و کمترین مقادیر  $\chi^2$  و RMSE انتخاب شد. در جدول (۲) مقادیر  $R^2$ ،  $\chi^2$  و RMSE آمده است. با مقایسه مقادیر این کمیت ها مشخص شد که مدل میدیلی بهترین مدل برای توان های ۳۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ W بود که می توانست رفتار خشک کردن فیلم زیست تخریب پذیر را پیش بینی کند.

ایزلی و همکاران بررسی اثر روش های مختلف خشک کردن را بر رنگ، محتوای فنل کل و ظرفیت آنتی اکسیدانی توت را مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش های خشک کردن با روش هوای داغ، مایکروویو و هوای داغ- مایکروویو صورت گرفت مدل ونگ و سینگ و مدل میدیلی بهترین مدل ها برای توصیف رفتار خشک کردن در تمامی روش ها بود [۱۳]. بر اساس رفتار خشک کردن میوه آلبالو به صورت لایه نازک در خشک کن مایکروویو- خلا در توان های مختلف و فشارهای مطلق متفاوت مشخص شد

جدول (۲) مقایسه میزان برازش داده‌های تجربی با مدل‌های نظری

Table 2 Comparing between the fittings of experimental data with theoretical models

Power توان	350 W			500 W			700 W			900 W		
	Model name	RMSE	$\chi^2$	R <sup>2</sup>	RMSE	$\chi^2$	R <sup>2</sup>	RMSE	$\chi^2$	R <sup>2</sup>	RMSE	$\chi^2$
lewis	0.0386	0.0016	0.9799	0.0247	0.0007	0.9915	0.0192	0.0004	0.992	0.0318	0.0013	0.992
Modified henderson	0.0316	0.0011	0.9846	0.0231	0.0826	0.9921	0.0184	0.0004	0.9927	0.0308	0.0012	0.9926
Page	0.0215	0.0005	0.9916	0.0185	0.0004	0.9927	0.0127	0.0002	0.9947	0.0101	0.0001	0.9987
Approximation of diffusion	0.0146	0.0002	0.9946	0.0185	0.0003	0.9935	0.0112	0.0001	0.9972	0.0107	0.0001	0.9977
Verma	0.0146	0.0002	0.9946	0.0185	0.0003	0.9935	0.0105	0.0001	0.9972	0.0074	0.00007	0.9989
Midilli	0.0048	0.0002	0.9997	0.0138	0.0003	0.9979	0.0050	0.0007	0.9998	0.0029	0.00003	0.9999
Logarithmic	0.0514	0.0033	0.9939	0.0242	0.0007	0.9923	0.094	0.0001	0.8806	0.0341	0.0023	0.9909
Wang and Singh	0.0606	0.0046	0.9502	0.0434	0.0025	0.9767	0.0164	0.0004	0.9972	0.0586	0.0068	0.9732
Two term exponential	0.0392	0.0019	0.9939	0.0231	0.0007	0.9917	0.0118	0.0002	0.9977	0.0112	0.0002	0.9985
Henderson – Pabis	0.0145	0.0002	0.9956	0.0230	0.0007	0.9935	0.0147	0.0003	0.9952	0.0128	0.0002	0.9963

جدول (۳) ضرایب مربوط به مدل میدیلی برای توان‌های مختلف

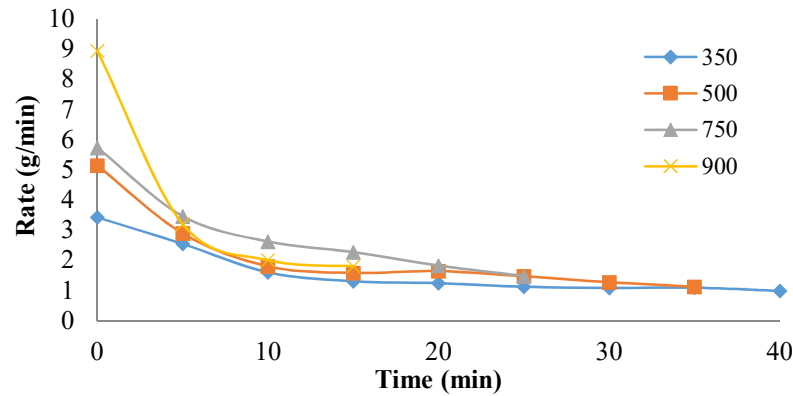
Table 3 Coefficient related to the Midilli model at different drying powers

Midilli model مدل میدیلی	350 W	500 W	700 W	900 W
A	1	1.002	1.001	1
B	-0.004996	-0.004617	-0.004184	-0.007712
K	0.1302	0.1302	0.0656	0.2576
n	0.5383	0.5383	0.9578	0.5642

جدول (۴) مقادیر ضریب نفوذ موثر در سطوح توانی مختلف

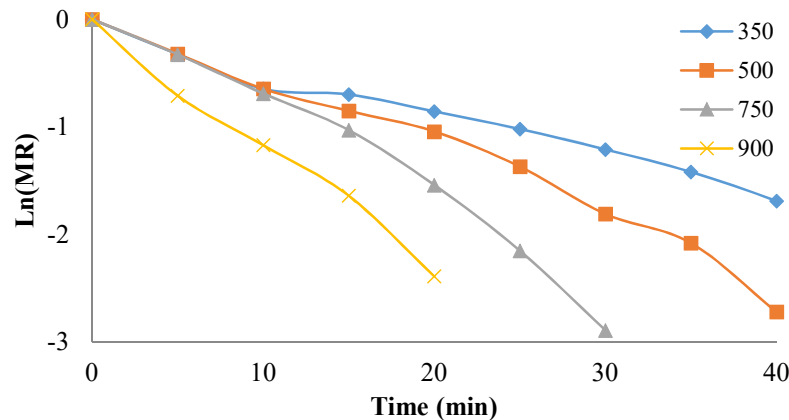
Table 4 Effective penetration coefficient at Different Power Levels

Power (W) توان (وات)	D <sub>eff</sub> × 10 <sup>5</sup> (m <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>
350	2.78	0.9855
500	4.02	0.9786
700	5.92	0.9734
900	7.41	0.9911



شکل (۲) تأثیر توان‌های تحت بررسی مایکروویو بر نرخ خشک شدن.

Fig. 2 Rate of drying vs. drying under different drying powers.



شکل (۳) نمودار Ln(MR) بر حسب زمان در سطوح توانی مختلف.

Fig. 4 Ln (MR) vs. time under different drying powers.

فرایند خشک شدن در توان ۳۵۰ W مشاهده شد که ۵۰ min به طول انجامید. هم‌چنین، زمان خشک کردن فیلم‌ها با این روش بسیار کوتاه بود. از روی معادلات به دست آمده در این بررسی می‌توان زمان خشک کردن فیلم‌ها را در توان‌های مختلف به دست آورد. به طوری که برای به دست آوردن زمان خشک کردن در یک توان مشخص، غیر از توان‌های آزمایش شده نیز می‌توان با استفاده از معادلات به دست آمده، زمان خشک کردن را به آسانی محاسبه کرد. لازم به ذکر است که با افزایش توان، سرعت خشک کردن افزایش می‌یابد.

#### ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق یک مدل ریاضی برای مدل کردن نرخ خشک کردن فیلم زیست تخریب پذیر ارائه شده است. نتایج نشان داد که مدل میدلی بهترین مدل برای توصیف فرایند خشک کردن است که میزان  $R^2$  اغلب در حدود ۰/۹۹۹۷ تا ۰/۹۹۹۹ و میزان مربع کای  $\chi^2$  و مربع میانگین خطای نسبی به ترتیب در حدود ۰/۰۰۰۰۲ تا ۰/۰۰۰۰۳ و ۰/۰۰۰۲۹ تا ۰/۰۱۳۸ بود. از آنجا که سرعت خشک کردن رابطه مستقیمی با توان خروجی مایکروویو دارد، مشاهده شد که با افزایش توان مایکروویو زمان خشک کردن کاهش می‌یابد. نرخ اولیه خشک کردن برای توان ۹۰۰ W برابر  $8/9 \text{ g/min}$  و برای توان ۳۵۰ W برابر  $3/4 \text{ g/min}$  بود. بیشترین میزان ضریب نفوذ رطوبتی موثر در توان ۹۰۰ W به میزان  $7/41 \times 10^{-5}$  و کمترین میزان ضریب نفوذ رطوبتی موثر در توان ۳۵۰ W به میزان  $2/78 \times 10^{-5}$  به دست آمد. طولانی‌ترین زمان

## منابع

- [۱۴] قادری، ع؛ عباسی، س؛ متولی، ع؛ مینایی، س. (۱۳۹۰). انتخاب مدل ریاضی برای سینتیک خشک کردن میوه آلبالو در خشک‌کن مایکروویو-خلاق. *مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران*، جلد ۱۶، شماره ۲، ص ۶۴-۵۵.
- [۱۵] خفاجه، ح؛ بناکار، ا؛ زارعین، م؛ خوش تقاضا، م. ه. (۱۳۹۳). بررسی سینتیک و انرژی مصرفی خشک کردن توت سفید در خشک‌کن مایکروویو. *مجله علوم و صنایع غذایی*، جلد ۱۱، ص ۱۴۳-۱۵۰.
- [16] Özbek, B, Dadali, G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *J. Food Eng.*, 83(4), 541-549.
- [17] Krulis, M., Kühnert, S., Leiker, M., Rohm, H. (2005). Influence of energy input & initial moisture on physical properties of microwave-vacuum dried strawberries, *Eur. Food Res. Technol.*, 221(6), 803-808.
- [1] Mertens, B. (1992). Developments of nonthermal processes for food preservatio,. *Food Technol.*, 46(5), 124-133.
- [2] Nouri, A., Yaraki, M. T., Ghorbanpour, M., Agarwal, S., Gupta, V. K. (2018). Enhanced Antibacterial effect of chitosan film using Montmorillonite/CuO nanocomposite, *Int. J. Biol. Macromol.* 109, 1219-1231.
- [3] Nouri, A., Yaraki, M. T., Ghorbanpour, M., Wang, S. (2010). Biodegradable κ-carrageenan/nanoclay nanocomposite films containing Rosmarinus officinalis L. extract for improved strength and antibacterial performance. *Int. J. Biol. Macromol.*, 115,227-235.
- [4] Adu, B. & Otten, L. (1996). Effect of increasing hygroscopicity on the microwave heating of solid foods, *J. Food Eng.*, 27(1), 35-44.
- [5] Motevalli, A., Minaei, S., Soufi, M.D., Ghobadian, B., Khostaghava, M.H (2013). Investigaion of thermal utilization efficiency in different drying methods of Pomegranate Arils, *Intl. J. Agron. Plant Prod.*, 4(8), 2046-2043.
- [6] Schiffmann, R.F. (1992). Microwave processing in the US food industry: Dielectric and ohmic sterilization, *Food Technol.*, 46(12), 50-52.
- [7] Evin, D. (2011). Microwave drying and moisture diffusivity of white mulberry: experimental and mathematical modeling, *J. Mech. Sci. Technol.*, 25(10), 2711-2718.
- [8] Azadmard-Damirchi, S., Habibi-Nodeh, F., Hesari, J., Nemati, M., Achachlouei, B.F (2010). Effect of pretreatment with microwaves on oxidative stability and nutraceuticals content of oil from rapeseed, *Food Chem.*, 121(4), 1211-1215.
- [9] Cárdenas, G., Díaz, J., Meléndrez, M. F., & Cruzat, C. (2008). Physicochemical properties of edible films from chitosan composites obtained by microwave heating, *Polym. Bull.*, 61(6), 737-748.
- [10] Ertekin, C, Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model, *J. Food Eng.*, 63(3), 349-359.
- [11] Lopez, A., Iguaz, A., Esnoz, A., Virseda, P. (2000). Thin-layer drying behaviour of vegetable wastes from wholesale market, *Drying Technol.*, 18(4-5), 995-1006.
- [12] Demirhan, E., Özbek, B. (2011). Thin-layer drying characteristics and modeling of celery leaves undergoing microwave treatment, *Chem. Engin. Commu.* ,198(7), 957-975.
- [13] İzli, N., Yıldız, G., Ünal, H., Işık, E., Uylaşer, V. (2014). Effect of different drying methods on drying characteristics, colour, total phenolic content & antioxidant capacity of goldenberry (*Physalis peruviana* L.), *Int. J. Food Sci. Technol.* 49(1), 9-17.