

## خشک کردن لایه نازک آلو توسط هوای گرم و ماکروویو: اثر فراسنجه‌های آزمایش بر سینتیک خشک کردن

\*شهرام نقی‌زاده رئیسی<sup>۱</sup>، آزاده قربانی حسن‌سرای<sup>۱</sup>، دنیا مقصدلو<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>گروه علوم و صنایع غذایی، واحد آیت‌الله امین، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۵/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۶/۲۸

\*مسئول مکاتبه: shahram9112006@outlook.com

### چکیده

خشک کردن یکی از روش‌های نگهداری می‌باشد که در آن، حذف رطوبت از طریق انتقال همزمان حرارت و جرم صورت می‌گیرد. بهره‌وری کم انرژی و مدت زمان طولانی خشک کردن با هوای داغ، مطالعه در مورد استفاده از تکنیک‌های نوین خشک کردن نظیر ماکروویو را ضروری ساخته است. در این تحقیق، نمونه‌های آلو توسط مایکروویو و نیز با روش هوای داغ در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد با توان ۱۸۰ وات، در ۲ تکرار خشک گردیدند. سپس جهت بررسی میزان رطوبت از دست رفته در حین فرآیند، وزن نمونه‌ها در فاصله‌های زمانی ۵ و ۲ دقیقه به ترتیب برای تیمارهای خشک شده به روش هوای داغ و ماکروویو ثبت شد. آنگاه سینتیک خشک کردن با ۱۲ مدل تجربی و بر اساس چهار شاخص آماری شامل ضریب تبیین ( $R^2$ )، مجموع مربعات خطا (SSE)، مربع کای ( $\chi^2$ ) و ریشه متوسط خطای داده‌ها (RMSE) با یکدیگر مقایسه گردیدند. طبق نتایج حاصله، بهترین مدل جهت برازش داده‌های خشک کردن با هوای داغ، مدل میدلی بوده است. مدل مذکور، برای داده‌های مربوط به خشک کردن توسط ماکروویو نیز برازش مناسبی را نشان داد. در واقع، این مدل دارای بالاترین ضریب تبیین و کمترین مجذور میانگین مربعات خطا، کای مربع و مجموع مربعات خطا، نسبت به سایر مدل‌ها بود.

**واژه‌های کلیدی:** خشک کردن با هوای داغ، خشک کردن با ماکروویو، آلو، سینتیک.

### مقدمه

کم‌تری داشته و دارای رنگ قرمز متمایل به ارغوانی می‌باشند. قطر آلو از ۶ سانتی‌متر و طعم آن از ترش تا شیرین متغیر است. این محصول به دلیل درصد رطوبت بالا، دارای فعالیت متابولیکی زیادی بوده که پس از برداشت محصول نیز ادامه می‌یابد و موجب فاسدشدن آن می‌گردد. به طور معمول، این میوه به دلیل داشتن فصل برداشت

آلو میوه‌ای تک‌هسته‌ای با نام علمی پرونوس دومستیکا از خانواده روزاسه است (نونز و همکاران، ۲۰۰۸). گونه‌های متفاوتی از این میوه در دنیا وجود دارد که از نظر رنگ، شکل و اندازه تنوع زیادی دارند. برخی از آن‌ها به رنگ زرد بوده و پرآب هستند. بعضی دیگر نیز رطوبت

کوتاه، به شکل خشک شده نگه‌داری و مصرف می‌شود (دویماز، ۲۰۰۴). خشک کردن احتمالاً یکی از قدیمی‌ترین روش‌هایی است که برای حفظ و نگهداری مواد غذایی توسط انسان استفاده گردید. میوه‌ها و سبزی‌ها برای جلوگیری از فعالیت میکروبی و آنزیمی و نیز کاهش کیفیت، خشک می‌شوند. در مواد خشک، کاهش فعالیت آبی موجب به حداقل رسیدن تغییرات فیزیکی و شیمیایی طی نگهداری و افزایش طول عمر آن‌ها می‌گردد. همچنین کاهش وزن و حجم محصول خشک شده سبب هزینه حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی کمتر آن‌ها می‌شود (دادالی و همکاران، ۲۰۰۷؛ دویماز و اسماعیل، ۲۰۱۱). خشک کردن یکی از مهم‌ترین فرآیندهای جداسازی است و اغلب به عنوان یک مرحله تولید نهایی قبل از فروش یا بسته‌بندی محصولات استفاده می‌گردد. انتقال جرم و حرارت به صورت همزمان در حالت غیرپایا طی فرآیند خشک شدن رخ می‌دهد. جهت طراحی خشک‌کن ایده آل و محصول خشک شده باکیفیت، درک مکانیسم انتقال جرم و حرارت مانند نفوذ رطوبت، انرژی فعال‌سازی و مصرف انرژی که به فراسنجه‌های خشک شدن مانند دما، سرعت و رطوبت نسبی هوای خشک کردن مربوط هستند، ضروری می‌باشد (چایجان و کاوه، ۲۰۱۴؛ یونال و ساچیلیک، ۲۰۱۱). سینتیک خشک کردن میوه‌ها و سبزی‌ها به طور گسترده‌ای با استفاده از روش خشک کردن لایه‌نازک تعیین می‌شود. مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک کردن و

ارائه مناسب‌ترین شرایط عملیاتی برای طراحی تجهیزات، مهم‌ترین مزایای تکنولوژی خشک کردن لایه‌نازک به شمار می‌آید (اونوود و همکاران، ۲۰۱۶). مطالعات بسیاری در زمینه سینتیک خشک کردن و مدل‌سازی ویژگی‌های خشک شدن میوه‌ها و سبزی‌های مختلف در فرآیند خشک کردن لایه نازک موجود است. در پژوهش‌های مختلف به ذرت (دویماز و پالا، ۲۰۰۳)، انجیر (بابالیس و بلسیوتیس، ۲۰۰۴)، سیب طلایی (منگس و ارتکین، ۲۰۰۶)، میوه زرشک (آغباشلو و همکاران، ۲۰۰۸)، گیلاس (دویماز و اسماعیل، ۲۰۱۱)، مکعب‌های سیب‌زمینی شیرین (سینگ و پاندی، ۲۰۱۲)، انگور فرنگی (واسکوئز پارا و همکاران، ۲۰۱۳)، برگه‌های هلو (ژو و شن، ۲۰۱۴) و برش‌های کدوتنبل (سرمت و همکاران، ۲۰۱۶) پرداخته شد. با این حال، مطالعه‌ای در مورد سینتیک خشک کردن لایه‌نازک میوه آلو با هوای داغ و ماکروویو مشاهده نگردید. هدف از این پژوهش بررسی انتقال جرم در فرآیند خشک کردن لایه‌نازک آلو و انتخاب بهترین مدل ریاضی برای منحنی‌های خشک کردن آن است.

### مواد و روش‌ها

**مواد:** میوه آلو در اواسط تابستان از بازار محلی (آمل، ایران) خریداری شد. به طور کلی، آلوهای با اندازه تقریباً یکسان (قطر متوسط ۳/۶۱ سانتی‌متر و وزن ۳۶ گرم) مورد استفاده قرار گرفتند. رطوبت اولیه آلو با استفاده از روش

منعکس ماکروویو در مگنترون ضروری بود. میزان از دست دادن رطوبت، با گذاشتن و توزین ظرف در ترازوی دیجیتال حین فواصل زمانی معین (۲ دقیقه) اندازه‌گیری گردید. زمانی که ماده به وزن ثابت و محتوی رطوبت تعادلی رسید، پذیرفته شد و در فواصل زمانی ۲ دقیقه از نمونه عکس‌برداری صورت پذیرفت.

**اندازه‌گیری انتقال جرم:** جهت بررسی انتقال جرم، در فواصل زمانی لازم نمونه از خشک‌کن خارج و توسط ترازو توزین گردید. اختلاف جرم اولیه و هر مرحله نشان دهنده میزان رطوبت خارج شده بود.

**مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن:** به منظور مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن داده‌های آزمایشگاهی از مدل‌های جدول (۱) استفاده گردید. مدل‌سازی توسط نرم‌افزار سیگما پلات انجام یافت.

در اکثر پژوهش‌ها، مدل سینتیک خشک‌کردن بر اساس شاخص رطوبت نسبی MR بیان می‌شود که علت آن، کاهش رطوبت به منظور پیدا کردن مناسب‌ترین مدل خشک شدن پراکندگی و خوش‌فرم کردن داده‌ها است. در طول آزمایش حین جریان خشک‌کردن، نمودار تغییرات رطوبت برحسب زمان، برای یک دمای ثابت هوای ورودی به محفظه خشک‌کن رسم می‌گردد. منحنی که بدین ترتیب به دست می‌آید را منحنی پیشروی خشک‌کردن می‌نامند. در خشک‌کردن لایه‌نازک شکل منحنی را می‌توان با تقریب خوبی توسط مدل‌های ریاضی بیان نمود.

استاندارد (AOAC، ۱۹۹۰) توسط خشک‌کردن تحت خلأ در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت در حضور سولفات منیزیم تعیین شد. برای به دست آوردن یک میانگین دقیق، این آزمون سه بار تکرار گردید.

**خشک‌کردن نمونه‌ها با هوای داغ:** خشک‌کردن توسط هوای داغ، در آن (مدل BF120E، فن آزما گستر، ایران) با دمای ۷۰ درجه سلسیوس انجام گرفت. در هر دما نمونه تا رسیدن به رطوبت نهایی و ثابت شدن دو وزن متوالی آن خشک گردید. نمونه حین خشک‌کردن، در فواصل زمانی مشخص ۵ دقیقه که با توجه به بررسی مدت زمان کل خشک‌کردن تعیین شد، از خشک‌کن خارج و وزن آن به منظور بررسی تغییرات جرم برحسب زمان ثبت گردید. تمام آزمون‌ها در ۲ تکرار انجام پذیرفت. سپس سینی‌های محتوی محصول در داخل طبقات یک خشک‌کن، در معرض هوای خشک قرار گرفتند. هوا هنگام ورود به خشک‌کن توسط یک حرارت دهنده (گرم‌کننده) در مدخل ورودی گرم شد تا از بین سینی‌ها و بالای محصول عبور نماید.

**خشک‌کردن نمونه‌ها با ماکروویو:** خشک‌کردن نمونه‌ها در ماکروویو خانگی (مدل GE280، سامسونگ، کره) با قدرت خروجی ۱۸۰ وات و ضخامت ثابت نمونه بررسی شد. نمونه در طول پیش تیمار برای جذب انرژی ماکروویو، داخل یک ظرف پتری دیش در مرکز آن چرخان ماکروویو قرار گرفت. وجود چرخان جهت رسیدن به عمل بهینه آن برای کاهش سطح

## جدول ۱- مدل سازی سینتیک خشک کردن

مرجع	مدل	نام مدل
ایلدیز و همکاران، ۲۰۰۱	$MR = \exp(-kt)$	نیوتن
کینگزلی و سینگ، ۲۰۰۷	$MR = \exp(-kt^n)$	پیچ
اوزدمیر و دورس، ۱۹۹۹	$MR = \exp[(-kt)^n]$	پیچ اصلاح شده
ژانگ و لیتچفیلد، ۱۹۹۱	$MR = a \exp(-kt)$	هندرسون و پاییس
دویماز، ۲۰۰۸	$MR = a \exp(-kt) + c$	لگاریتمی
لاسهاسنی و همکاران، ۲۰۰۴	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	دوجمله‌ای
شرف الدین و همکاران، ۱۹۸۰	$MR = a \exp(-kt) + \exp(-mt)$	دوجمله‌ای نمایی
وانگ و سینگ، ۱۹۷۸	$MR = 1 + at + bt^2$	ونگ و سینگ
کاسم، ۱۹۹۸	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	تقریب پخش
دویماز، ۲۰۰۷	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	میدلی و همکاران
دویماز، ۲۰۱۲	$MR = \exp(-(\frac{t}{k})^n)$	ویبول
طغرل و پهلوان، ۲۰۰۴	$MR = \exp(a(\frac{t}{k^2})^n)$	پیچ اصلاح شده معادله ۲

مساحت سطح محصول ( $m^2$ )،  $K_m$  ضریب انتقال جرم بخار آب ( $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ )،  $R_0$  ثابت جهانی گازها ( $J \cdot mol^{-1} \cdot k^{-1}$ )،  $M$  محتوی رطوبتی محصول برپایه خشک و  $T_{abs}$  دمای مطلق ( $K$ ) می‌باشند. عبارت  $As(P_v - P_{va})$  نیروی مؤثر خارجی ناشی از شرایط محیطی را نشان می‌دهد، درحالی‌که عبارت  $(1/K_m As)$  پارامتر مقاومتی محصول است. فشار بخار جزئی را می‌توان به صورت رابطه برحسب رطوبت نسبی بیان کرد:

$$\frac{d_M}{d_t} = -AP_s(\phi_F - \phi_K) \quad (۲)$$

در رابطه (۲)  $P_s$  فشار بخار اشباع در دمای معین هوا،  $\phi_F$  رطوبت نسبی روی سطح جسم،  $\phi_K$  رطوبت نسبی واسطه خشک کردن (هوا) و  $t$  زمان برحسب ساعت ( $h$ ) می‌باشند.

در مدل کردن خشک کردن به روش همرفتی، فرض بر این است که نسبت حجم هوا به حجم محصول بی‌نهایت بزرگ است؛ بنابراین به جز نوع و اندازه محصول، محتوی رطوبتی و دمای هوای خشک‌کننده، اثر بقیه فاکتورهای مؤثر در نرخ خشک کردن ناچیز و قابل اغماض می‌باشد. با توجه به تئوری عمومی خشک کردن، نرخ آب خارج شده از محصول با فاکتورهایی همچون اختلاف فشارهای بخار بین هوای خشک‌کننده و سطح مرطوب، مساحت سطح محصول، ضریب انتقال جرم و سرعت هوای خشک‌کننده متناسب است:

$$\frac{d_M}{d_t} = \frac{P_v P_{va}}{(1/K_m A_s) R_0 T_{abs}} = \frac{K_m A_s P_v P_{va}}{R_0 T_{abs}} \quad (۱)$$

در رابطه (۱)،  $P_v$  فشار بخار در محصول ( $N \cdot m^{-2}$ )،  $P_{va}$  فشار بخار هوای خشک‌کننده ( $N \cdot m^{-2}$ )،  $A_s$

مدل سینتیک خشک کردن محصول، با ده مدل از بین مدل‌های استاندارد ارائه شده در مقالات معتبر دنیا برازش شدند. محاسبه ضریب تبیین  $R^2$  بیشینه یکی از ساده‌ترین ملاک‌ها برای تعیین بهترین مدل است که علاوه بر آن، پارامترهای آماری نظیر کمترین مقدار مربع کای ( $\chi^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (MSE) نیز جهت تعیین بهترین مدل انتخاب گردیدند و روابط آن‌ها به صورت معادلات (۶)، (۷)، (۸) و (۹) ارائه شده است:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{expj} - MR_{pre,i})}{\sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})} \quad (6)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{expj} - MR_{pre,i})^2}{n - p} \quad (7)$$

$$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MR_{expj} - MR_{pre,i}) \right)^{0.5} \quad (8)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})^2 \quad (9)$$

در روابط (۶) تا (۹)  $MR_{expj}$  مبین آمین نسبت رطوبتی مشاهده شده،  $MR_{pre,i}$  مبین آمین نسبت رطوبتی پیش‌بینی شده،  $n$  تعداد مشاهدات و  $p$  تعداد ثابت‌ها در مدل می‌باشد (آرال و بسه، ۲۰۱۶).

### نتایج و بحث

با به دست آوردن نسبت رطوبت در دما و قدرت خشک کردن، ضرایب، ثابت‌ها و شاخص‌های

مطابق رابطه (۳)، تغییرات مقدار رطوبت در روی تک دمای جذب تقریباً خطی است و می‌توان نوشت:

$$\frac{dM}{dt} = -K(M - M_e) \quad (3)$$

با جدا کردن متغیرها و انتگرال‌گیری از زمان در محدوده 0 و t و محتوی رطوبتی (M) در محدوده  $M_0$  (رطوبت اولیه محصول) و  $M_e$  (رطوبت تعادلی محصول) به معادله (۴) رسیدیم:

$$\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt) \quad (4)$$

طرف چپ معادله، نسبت رطوبت (MR) را که مشخص‌کننده فرآیند خشک کردن است نشان می‌دهد. علامت منفی k نشان‌دهنده کاهش محتوی رطوبتی با زمان می‌باشد که در ابتدای خشک کردن بزرگ‌تر بوده و سپس به آهستگی کاهش پیدا کرد. هر قدر اثر کاهش k بیشتر باشد، طول مدت خشک کردن طولانی‌تر خواهد بود. اگرچه نسبت رطوبت به صورت رابطه (۵)

تعریف می‌گردد، برای خشک کردن طولانی مدت  $M_e$  نسبت به  $M_0$  و  $M_t$  به قدری کوچک است که می‌توان از آن صرف‌نظر کرد؛ بنابراین  $\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$  به  $\frac{M_t}{M_0}$  ساده می‌شود. نرخ خشک کردن نیز از رابطه (۵) محاسبه گردید:

$$Drying Rate = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (5)$$

نسبت‌های رطوبتی حاصله طی آزمایش‌های مختلف، به منظور بررسی و انتخاب مناسب‌ترین



را مناسب‌تر تفسیر می‌کند و در تیمارهایی که سایر مدل‌ها نیز شاخص آماری مناسب داشتند، نمودار آنها فرایند طبیعی خشک شدن را در مقایسه با داده‌های تجربی به خوبی نشان نمی‌دهد. در این تیمارها سایر مدل‌هایی که از نظر شاخص‌های آماری شرایط بهتری داشتند، انتخاب و نمودار آن‌ها رسم شد. در نهایت مدلی که شاخص آماری قابل‌قبول داشت و فرایند طبیعی خشک شدن را بهتر نشان می‌داد، انتخاب گردید.

آماری برای آلودگی خشک‌شده محاسبه گردید. مدل‌های رگرسیونی مختلف براساس مقادیر  $R^2$ ،  $SSE$ ،  $\chi^2$  و  $RMSE$  ارزیابی شدند. جداول (۲) و (۳) ضرایب مدل‌ها را نشان می‌دهند. جداول (۴) و (۵) نیز بیانگر دقت برازش مدل‌ها بر اساس متوسط شاخص‌های آماری در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و توان ۱۸۰ وات می‌باشند. نتایج تحلیل‌ها نشان داد در هر دو تیمار، مدل میدلی با فراسنجه‌های آماری بهتر، داده‌های واقعی

جدول ۲- ضرایب مدل‌ها حین خشک شدن در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد

معادله	نام مدل
$MR = \exp(-0.01t)$	نیوتن
$MR = \exp(-0.001t^{1.435})$	پیچ
$MR = \exp((-0.01t)^1)$	پیچ اصلاح شده
$MR = 1.126\exp(-0.012t)$	هندرسون و پاییس
$MR = 1.368\exp(-0.008t) - 0.288$	لگاریتمی
$MR = 0.584\exp(-0.012t) + 0.542\exp(-0.012t)$	دوجمله‌ای
$MR = 0.126\exp(-0.012t) + \exp(-0.012t)$	دوجمله‌ای نمایی
$MR = 1 - 0.008t + 1.478E - 005t^2$	ونگ و سینگ
$MR = -83.497 \exp(-0.003t) + (1 + 83.497) \exp(-1.021 * 0.003t)$	تقریب پخش
$MR = 1.002 \exp(-8.648E - 004t^{1.584}) + 4.654E - 004t$	میدلی و همکاران
$MR = \exp(-(\frac{t}{95.399})^{1.435})$	ویبول
$MR = \exp(-0.006(\frac{t}{(1.597^2)})^{1.435})$	پیچ اصلاح شده معادله ۲

جدول ۳- ضرایب مدل‌ها حین خشک شدن در توان ۱۸۰ ماکروویو

معادله	نام مدل
$MR = \exp(-0.025t)$	نیوتن
$MR = \exp(-3.005E - 5t^{2.953})$	پیچ
$MR = \exp((-0.025t)^1)$	پیچ اصلاح شده
$MR = 1.223 \exp(-0.032t)$	هندرسون و پابیس
$MR = 4508.807 \exp(-4.925E - 6t) - 4507.652$	لگاریتمی
$MR = 0.653 \exp(-0.032t) + 0.570 \exp(-0.032t)$	دوجمله‌ای
$MR = 0.223 \exp(-0.032t) + \exp(-0.032t)$	دوجمله‌ای نمایی
$MR = 1 - 0.006t - 3.024E - 004t^2$	ونگ و سینگ
$MR = -9116.153 \exp(-1.381E - 6t) + (1 + 9116.153) \exp(-2.4 * 1.381E - 6t)$	تقریب پخش
$MR = 0.971 \exp(-7.065E - 6t^{3.415}) + 0.002t$	میدلی و همکاران
$MR = \exp(-(\frac{t}{34.002})^{2.953})$	ویبول
$MR = \exp(-0.004(\frac{t}{(2.249)^2})^{2.953})$	پیچ اصلاح شده معادله ۲

جدول ۴- مقایسه دقت برازش مدل‌ها بر اساس متوسط شاخص‌های آماری در دمای ۷۰ درجه سلسیوس

نام مدل	R <sup>2</sup>	SSE	χ <sup>2</sup>	RMSE
نیوتن	۰/۹۵۱	۰/۰۰۴۳۹۱	۰/۰۰۴۵۱۷	۰/۰۶۶۲۶۶
پیچ	۰/۹۹۲	۰/۰۱۱۴۷۲	۰/۰۱۱۸	۰/۱۰۷۱۰۷
پیچ اصلاح شده	۰/۹۵۱	۰/۰۰۴۳۱۹	۰/۰۰۴۵۱۷	۰/۰۶۶۲۶۶
هندرسون و پابیس	۰/۹۷۴	۰/۰۰۲۲۸۷	۰/۰۰۲۳۵۲	۰/۰۴۷۸۲۱
لگاریتمی	۰/۹۸۵	۰/۰۰۲۰۲۳	۰/۰۰۲۰۸۱	۰/۰۴۴۹۷۹
دوجمله‌ای	۰/۹۷۴	۰/۰۰۲۲۸۷	۰/۰۰۲۳۵۲	۰/۰۴۷۸۲۱
دوجمله‌ای نمایی	۰/۹۷۴	۰/۰۰۲۲۸۷	۰/۰۰۲۳۵۲	۰/۰۴۷۸۲۱
ونگ و سینگ	۰/۹۷۹	۰/۰۰۲۰۶۴	۰/۰۰۲۱۲۳	۰/۰۴۵۴۲۷
تقریب پخش	۰/۹۷۷	۰/۰۰۲۳۱۲	۰/۰۰۲۳۷۹	۰/۰۴۸۰۸۸
میدلی و همکاران	۰/۹۹۵	۰/۰۰۰۴۷۶	۰/۰۰۰۴۸۹	۰/۰۲۱۸۱۱
ویبول	۰/۹۹۲	۰/۰۰۰۶۷۶	۰/۰۰۰۶۹۶	۰/۰۲۶۰۰۹
پیچ اصلاح شده معادله ۲	۰/۹۹۲	۰/۰۰۱۱۸۵	۰/۰۰۱۲۱۹	۰/۰۳۴۴۲۳

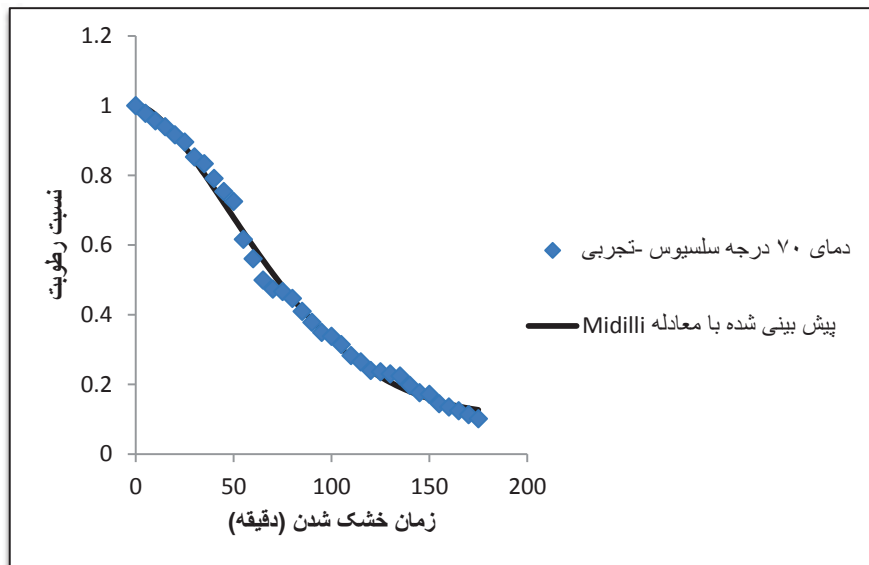
جدول ۵- مقایسه دقت برازش مدل‌ها بر اساس متوسط شاخص‌های آماری در توان ۱۸۰

نام مدل	$R^2$	SSE	$\chi^2$	RMSE
نیوتن	۰/۷۷۰	۰/۰۲۵۴۶۱	۰/۰۲۶۴۸	۰/۰۱۵۹۵۶۶
پیچ	۰/۹۹۲	۰/۰۰۰۸۲	۰/۰۰۰۸۵۳	۰/۰۲۸۶۳۸
پیچ اصلاح شده	۰/۷۷۰	۰/۰۲۵۴۶۱	۰/۰۲۶۴۸	۰/۰۱۵۹۵۶۶
هندرسون و پایس	۰/۸۴۱	۰/۰۱۷۷۲۸	۰/۰۱۸۴۳۷	۰/۱۳۳۱۴۶
لگاریتمی	۰/۹۴۶	۰/۰۰۶۳۰۱	۰/۰۰۶۵۵۳	۰/۰۷۹۳۷۷
دوجمله‌ای	۰/۸۴۱	۰/۰۱۷۷۲۸	۰/۰۱۸۴۳۷	۰/۱۳۳۱۴۶
دوجمله‌ای نمایی	۰/۸۴۱	۰/۰۳۰۴۵۶	۰/۰۳۱۶۷۵	۰/۱۷۴۵۱۸
ونگ و سینگ	۰/۹۵۶	۰/۰۰۴۴۰۹	۰/۰۰۴۵۸۵	۰/۰۶۶۳۹۹
تقریب پخش	۰/۸۹۱	۰/۰۱۲۷۳۲	۰/۰۱۳۲۴۱	۰/۱۱۲۸۳۶
میدلی و همکاران	۰/۹۹۵	۰/۰۰۰۶۵۲	۰/۰۰۰۶۷۸	۰/۰۲۵۵۳۴
ویبول	۰/۹۹۲	۰/۰۰۰۸۲	۰/۰۰۰۸۵۳	۰/۰۲۸۶۴۴
پیچ اصلاح شده معادله ۲	۰/۹۹۲	۰/۰۰۱۳۲۵	۰/۰۰۱۳۷۸	۰/۰۳۶۴۰۷

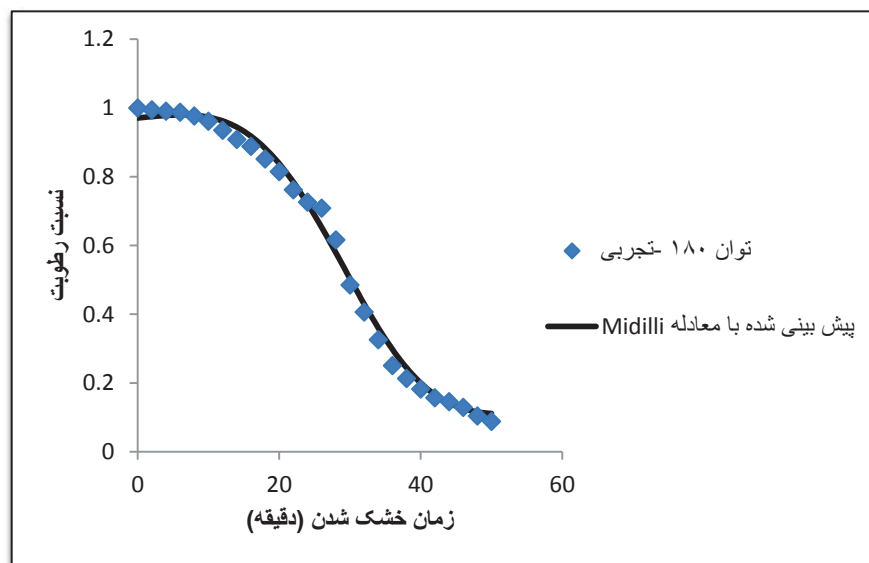
حاصل از مدل‌سازی، فرایند شبیه‌سازی از طریق برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های حاصل انجام گردید. نتایج مربوط به روش هوای داغ با معادله میدلی در شکل (۱) و یافته‌های حاصل از خشک‌کردن توسط ماکروویو با معادله میدلی در شکل (۲) مشاهده می‌گردد. نتایج حاصله بیانگر آن است که مدل میدلی می‌تواند برای خشک شدن آلو توسط هوای داغ و ماکروویو بهترین گزینه باشد. در این شکل‌ها دیده می‌شود که مقادیر پیش‌بینی شده نزدیک به داده‌های آزمایشگاهی تغییر می‌کند که این امر مبین انطباق مناسب این مقادیر با داده‌های آزمایشگاهی بوده و مدل میدلی برای خشک‌کردن آلو مناسب است.

از آنجا که نسبت رطوبت (MR) برای توصیف مدل‌های متفاوت خشک شدن ضروری می‌باشد، میزان آن با مدل‌های مختلف خشک‌کردن برازش شد. با توجه به پارامترهای آماری مشاهده می‌گردد که در تمام دماها و توان‌های آزمایش‌شده از بین مدل‌های تجربی، مدل میدلی دارای بالاترین مقدار  $R^2$  و کمترین مقادیر  $\chi^2$  و RMSE می‌باشد که با نتایج برخی از محققان مطابقت دارد. نتایج آماری به دست آمده برای خشک‌کردن کدوی سبز با استفاده از روش هوای داغ نشان می‌دهد که مدل میدلی دارای بالاترین  $R^2$  و کمترین  $\chi^2$ ، RMSE است (مشکانی و همکاران، ۱۳۹۰). براساس ضرایب مدل‌های





شکل ۱- مدل سازی سینتیک خشک کردن آلو در آون با معادله میدلی



شکل ۲- مدل سازی سینتیک خشک کردن آلو در ماکروویو با معادله میدلی

۱۳۸۸). می توان علت این امر را بدین صورت بیان نمود که منحنی خشک کردن در مرحله خشک کردن با ماکروویو شیب تندی به خود می گیرد که ناشی از سرعت زیاد خشک کردن در این مرحله است. در واقع مکانیسم گرمایش ماکروویو حجمی باعث می شود که فرآیند

درباره سیر نزولی خشک کردن، سرعت خشک کردن در روش ماکروویو برای نمونه های خشک شده بسیار بیشتر از روش جابجایی است؛ در نتیجه زمان مورد نیاز برای کاهش مقدار مساوی رطوبت، کمتر از زمان لازم برای این کاهش در روش جابجایی می باشد (ده بوره و اسمعیلی،

گرمایش نسبت به روش‌های معمول گرمایش مانند جابه‌جایی یا هدایت خیلی سریع‌تر انجام شود؛ علاوه بر این گرما در درون ماده تولید می‌گردد در حالی که در روش‌های متداول، گرما از سطح خارجی محصول از طریق هدایت یا نفوذ منتقل می‌شود. در طول خشک‌کردن متداول با هوای گرم، ابتدا رطوبت از سطح جسم خارج شده، سپس آب از داخل محصول توسط نفوذ به سطح انتقال می‌یابد اما در خشک‌کردن با ماکروویو تولید حرارت حجمی منجر به افزایش فشار بخار داخلی می‌گردد، آن‌گاه جریان مایع به طرف سطح جسم رانده شده و سرعت خشک‌کردن بالا می‌رود. طی خشک‌کردن نمونه‌های موز در هر دو مرحله خشک‌کردن با هوای داغ و خشک‌کردن با ماکروویو، مرحله آهنگ ثابت خشک‌کردن مشاهده نگردید و خشک‌شدن موز به طور کامل در مرحله آهنگ نزولی رخ داد؛ یعنی آهنگ خشک‌کردن موز به تدریج کاهش می‌یابد که علت آن چروکیدگی بافت موز و بروز پدیده سخت شدن سطحی برش‌های موز است. این پدیده به دلیل ژلاتینه شدن سریع نشاسته روی سطح برش‌ها اتفاق می‌افتد که خود باعث کاهش آهنگ انتقال رطوبت در مراحل انتهایی فرآیند خشک‌کردن می‌شود (زیرجانی و توکلی‌پور، ۱۳۸۹). در مطالعه رهنما و همکاران (۱۳۹۰) نیز منحنی فرآیند خشک‌شدن بر اساس نسبت رطوبت در دماهای مختلف، برای داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل میدلی و همکاران به عنوان بهترین

مدل نشان داده شده است. داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل، بسیار به هم نزدیک بودند، به طوری که منحنی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل، بر روی یکدیگر منطبق شدند. در پژوهشی دیگر، تحلیل رگرسیونی چند متغیره در محیط نرم‌افزار متلب انجام پذیرفت و بهترین مدلی که می‌توانست سینتیک خشک شدن توت سفید را توصیف کند، با توجه به بیشترین مقدار  $R^2$  و کمترین مقادیر  $\chi^2$  و RMSE انتخاب گردید. با مقایسه مقادیر  $R^2$ ،  $\chi^2$  و RMSE مشخص شد که مدل میدلی بهترین مدل بود که می‌توانست رفتار خشک شدن توت سفید را پیش‌بینی نماید (خفاجه و همکاران، ۱۳۹۳). همچنین از میان ۱۵ مدل لایه‌نازک جهت پیش‌گویی رفتار خشک‌کردن ماکروویو انبه، مدل میدلی نیمه تجربی برای بیان داده‌های آزمایشی یافت شد. این مدل برای پیش‌گویی محتوی رطوبت به عنوان کاربرد زمان خشک‌کردن در تمام قدرت‌های ماکروویو توانا است (مورتی، ۲۰۱۲). در خشک‌کردن نوعی ماست چکیده با هوای گرم نیز مدل میدلی و همکاران به عنوان مناسب‌ترین مدل گزارش گردید (قادری و همکاران، ۱۳۹۱). با توجه به نتایج به دست آمده، نرخ از دست دادن رطوبت در روش ماکروویو به مراتب بیشتر از روش آون می‌باشد و با افزایش توان، میزان از دست دادن رطوبت کاهش می‌یابد. افزایش توان خروجی ماکروویو، رطوبت نسبی محصول را بیشتر کاهش می‌دهد؛ زیرا به نظر می‌رسد که با افزایش توان خروجی از ماکروویو،

نمونه‌های خشک‌شده با روش ماکروویو نسبت به روش خشک‌کردن با هوای داغ، زمان خشک‌کردن کمتری رخ می‌دهد. برای نمونه‌های آلو، مدل میدلی بهترین مدل در تمام حالت‌های مورد آزمایش بود. انتخاب این مدل به دلیل مقادیر بالای  $R^2$  و مقادیر پایین  $SSE$ ،  $\chi^2$  و  $RMSE$  در تمام شرایط آزمایش بوده است. از این نتایج می‌توان برای پیش‌بینی تغییر شرایط میوه در حین فرآوری و نیز به عنوان یک ابزار کنترل کیفیت برای نظارت بر فرآوری استفاده کرد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، انرژی ماکروویو می‌تواند به طور موفقیت‌آمیزی جهت تهیه آلوی خشک‌شده بکار گرفته شود.

### سپاسگزاری

نتایج منتشر شده در این مقاله، از طرحی پژوهشی با بودجه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد آیت ا... آملی به دست آمده است. بدین وسیله پژوهشگران مراتب سپاس خود را از این حمایت مالی ابراز می‌دارند.

دمای درون محفظه و شدت پرتوهای ماکروویو افزایش یافته که باعث کاهش بیشتر میزان رطوبت نمونه می‌گردد. به عبارت دیگر، توان بالاتر باعث انتقال بیشتر جرم و حرارت و نهایتاً کاهش رطوبت شدیدتر می‌شود. خفاجه و همکاران (۱۳۹۳) گزارش کردند که در شروع روند خشک‌کردن، رطوبت اولیه کشک زیاد بوده و آهنگ از دست دادن رطوبت زیاد گردید. به تدریج با گذشت زمان، میزان رطوبت محصول کاهش یافته و نرخ کاهش رطوبت به طور طبیعی کمتر شد. در واقع نمونه‌ها بیشتر رطوبت خود را در اوایل فرآیند خشک شدن از دست می‌دهند و در نتیجه زمان زیادی برای از دست دادن رطوبت باقی‌مانده لازم است (خفاجه و همکاران، ۱۳۹۳).

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از میزان نسبت رطوبت محصول، نشان‌دهنده افزایش یافتن تغییرات کاهش محتوی رطوبتی و کاهش یافتن زمان خشک شدن با افزایش دما و افزایش قدرت است. برای

### منابع

۱. خفاجه، ح.، بناکار، ا.، زارعین، م. و خوش تقاضا، م.ه. ۱۳۹۳. بررسی سینتیک و انرژی مصرفی خشک‌کردن توت سفید در خشک‌کن ماکروویو. علوم و صنایع غذایی ایران، ۱۱(۴۵)، ۱۵۰-۱۴۳.
۲. ده بوره، ر. و اسمعیلی، م. ۱۳۸۸. تأثیر فرآیند خشک‌کردن نهایی با ماکروویو و هوای داغ بر پارامترهای خشک‌کردن انگور خشک‌شده. پژوهش‌های صنایع غذایی ایران، ۵(۲)، ۱۲۲-۱۰۸.
۳. رهنما، م.، خوش تقاضا، م.ه. و قبادیان، ب. ۱۳۹۰. میزان رطوبت تعادلی و گرمای ایزوستریک جذب و دفع خرمای استعمران. علوم و صنایع غذایی، ۸(۱)، ۳۰-۱۹.

۴. زیرجانی، ل. و توکلی پور، ح. ۱۳۸۹. تأثیر پیش فرآیندهای مختلف در فرآیند خشک کردن موز توسط ماکروویو. *نوآوری در علوم و فناوری غذایی (علوم و فناوری غذایی)*، ۲(۱)، ۶۴-۵۳.
۵. قادری، ع.، عباسی، س. و حمیدی، ز. ۱۳۹۱. انتخاب مدل ریاضی مناسب برای سینتیک خشک شدن ماست در خشک کن ماکروویو- خلاصه پژوهش و نوآوری در علوم و صنایع غذایی، ۱(۲)، ۱۵۲-۱۳۹.
۶. مشکانی، س.م.، پورفلاح، ز.، توکلی پور، ح. محمدی، م. و نهاردانی، م. ۱۳۹۰. بررسی سینتیک خشک کردن لایه ای نازک کدوی سبز با فرآیند جابه جایی هوای داغ. *علوم و فناوری غذایی*، ۴(۳)، ۸۲-۷۵.
7. Aghbashlo, M., Kianmerhr, H. and Samimi-Akhijahani, H. 2008. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). *Energy Conversion and Management*, 49, 2865-2871.
8. AOAC. 1990. *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. 15th ed. AOAC, Arlington, USA.
9. Aral, S. and Beşe, A.V. 2016. Convective drying of hawthorn fruit (Crataegus spp.): effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. *Food Chemistry*, 210, 577-584.
10. Babalis, S.J. and Belessiotis, V.G. 2004. Influence of drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin- layer drying of figs. *Food Engineering*, 65, 449-458.
11. Chayjan, R.A. and Kaveh, M. 2014. Physical parameters and kinetic modeling of fix and fluid bed drying of terebinth seeds. *Food Processing and Preservation*, 38, 1307-1320.
12. Dadali, G., Demirhan, E. and Özbek, B. 2007. Color change kinetics of spinach undergoing microwave drying. *Drying Technology*, 25, 1713-1723.
13. Doymaz, I. 2004. Effect of dipping treatment on air drying of plums. *Food Engineering*, 64, 465-470.
14. Doymaz, I. 2007. Air-drying characteristics of tomatoes. *Food Engineering*, 78(4), 1291-1297.
15. Doymaz, İ. 2008. Convective drying kinetics of strawberry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(5), 914-919.
16. Doymaz, I. 2012. Drying of Pomegranate Seeds Using Infrared Radiation. *Food Science and Biotechnology*, 21, 1269-1275.
17. Doymaz, I. and Ismail, O. 2011. Drying characteristics of sweet cherry. *Food and Bioproducts Processing*, 89, 31-38.
18. Doymaz, I. and Pala, M. 2003. The thin-layer drying characteristics of corn. *Food Engineering*, 60, 125-130.
19. Kassem, A.S. 1998. Comparative studies on thin layer drying models for wheat. In: *Proceedings of the 13th International Congress on Agricultural Engineering* (Vol. 6, pp. 2-6). Rabat. Morocco.
20. Kingsly, A.R.P. and Singh, D.B. 2007. Drying kinetics of pomegranate arils. *Food Engineering*, 79(2), 741-744.
21. Lahsani, S., Kouhila, M., Mahrouz, M. and Jaouhari, J.T. 2004. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Food Engineering*, 61(2), 173-179.
22. Menges, H. O. and Ertekin, C. 2006. Mathematical modeling of thin layer drying of golden apples. *Food Engineering*, 77, 119-125.

23. Murthy, K., Pandurangapp, T. and Manohar, B., 2012. Microwave drying of mango ginger (*Curcuma amada* Roxb): prediction of drying kinetics by mathematical modelling and artificial neural network. *Food Science and Technology*, 47(6), 1229-1236.
24. Nunes, C., Saraiva, J.A. and Coimbra, M.A. 2008. Effect of candying on cell wall polysaccharides of plums (*Prunus domestica* L.) and influence of cell wallenzymes. *Food Chemistry*, 111, 538-548.
25. Onwude, D. I., Hashin, N., Janius, R.B., Nawi, N.M. and Abdan, K. 2016. Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15, 559–618.
26. Özdemir, M. and Devres, Y.O. 1999. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Food Engineering*, 42(4), 225-233.
27. Seremet, L., Botez, E., Nistor, O., Andronoium, D.G. and Mocanu, G. 2016. Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices. *Food Chemistry*, 195, 104–109.
28. Sharaf-Elden, Y.I., Blaisdell, J.L. and Hamdy, M.Y. 1980. A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, 23(5), 1261–1265, 1271.
29. Singh, N.J. and Pandey, K.R. 2012. Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas* L.). *Food and Bioproducts Processing*, 90, 317–322.
30. Toğrul, İ.T. and Pehlivan, D. 2004. Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Food Engineering*, 65(3), 413-425.
31. Unal, H.G. and Sacilik, K. 2011. Drying characteristics of hawthorn fruits in a convective hot-air dryer. *Food Processing and Preservation*, 35, 272–279.
32. Vàsquez-Parra, J.E., Ochoa-Martinez, C.I. and Bustos-Parra, M. 2013. Effect of chemical and physical pretreatments on the convective drying of cape gooseberry fruits (*Physalis peruviana*). *Food Engineering*, 119, 648–654.
33. Wang, C.Y. and Singh, R.P. 1978. A single layer drying equation for rough rice. *American Society of Agricultural Engineers*, 78-3001, 33.
34. Yaldiz, O., Ertekin, C. and Uzun, H.I. 2001. Mathematical modeling of thin layer drying of sultana grapes. *Energy*, 26, 457-465.
35. Zhang, Q. and Litchfield, J.B. 1991. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology*, 9(2), 383-395.
36. Zhu, A. and Shen, X. 2014. The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices. *Heat and Mass Transfer*, 72, 347–351.

## Thin layer drying of plum fruit using hot air and microwave: Effect of experimental parameters on drying kinetics

\*Sh. Naghizadeh Raeisi<sup>1</sup>, A. Ghorbani Hasan-Saraei<sup>1</sup>, D. Maghsoudlou<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Food Science and Technology, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.

Received: 11-8-2017; Accepted: 19-9-2017

### Abstract

Drying is one of the preservation techniques in which moisture removal through simultaneous heat and mass transfer occurs. Due to low energy efficiency and prolonged time of hot air drying, the new drying techniques such as microwave must be employed. Two different heating/drying processes were employed for production of dried Plum. The Plum was dried by microwave heating and oven at atmospheric pressure. The drying curves obtained were processed for drying rates to find the most convenient model among the 12 different expressions proposed by earlier authors. In addition, the various statistical parameters such as:  $R^2$ , reduced chi-square, SSE and root mean square error (RMSE) were used to determine the quality of the fit. Based on the results, Midilli model was found to be the best model fitted to the experimental hot air drying data at all temperature levels. In the case of experimental microwave drying data, also the Midilli model showed the best fitting results. These models exhibited the highest value of  $R^2$  and the least RMSE,  $\chi^2$  and SSE comparing to the other models.

**Keywords:** Hot air drying, Microwave drying, Plum, Kinetics.