

Study on the Mass Transfer and Drying Kinetics of *Allium stipitatum* by Microwave Method

HABIB ABBASI¹, NARGES LAYEGHINIYA¹, FATEMEH BIBAK¹, SAFOORA KARIMI^{1*}

1. Department of Chemical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

(Received: Apr. 6, 2020- Revised: May. 14, 2020- Accepted: May. 30, 2020)

ABSTRACT

Shallot (*Allium stipitatum*) is one of the native plants of Iran with antioxidant and antimicrobial properties. In this study, the effect of microwave method (in the powers of 450, 600, 750 and 900W) on drying characteristics of Shallot was investigated. Process kinetics study showed that among 10 common mathematical models, two term model was the best choice in the power range of 450 to 900W. As the power of the microwave increased, the drying time was decreased and its drying rate was increased. The minimum drying time was 18 minutes at 900 W, which was 95.5% less than hot air drying time (400 minutes). The results showed that with increasing microwave power, the diffusion coefficient increases and the activation energy decreases. The maximum effective moisture diffusivity was obtained $1.2 \times 10^{-7} (m^2/s)$ and the minimum activation energy was obtained 5.3 W/g for microwave power of 900 W. The optimum power was 450W in terms of total color change (ΔE) and 900W in terms of browning index (BI).

Keywords: Activation energy, Color parameters, Microwave method, Drying kinetics, diffusivity

بررسی انتقال جرم و سینتیک خشک کردن موسیر به روش مایکروویو

حبیب اله عباسی^۱، نرگس لایقی نیا^۱، فاطمه بی باک^۱، صفورا کریمی^{۱*}

۱. گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۱۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۲/۲۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۳/۱۰)

چکیده

موسیر یکی از گیاهان بومی ایران با خواص آنتی‌اکسیدانی و ضد میکروبی است. در این پژوهش، تأثیر روش مایکروویو (در توان‌های ۴۵۰، ۶۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ وات) بر مشخصه‌های خشک کردن موسیر بررسی گردید. بررسی سینتیک فرآیند نشان داد که از بین ۱۰ مدل ریاضی متداول، مدل دو جمله‌ای بهترین انتخاب در محدوده‌ی توان ۴۵۰ وات تا ۹۰۰ وات بود. با افزایش توان مایکروویو، زمان خشک شدن کاهش و سرعت آن افزایش یافت. کمترین زمان خشک کردن در ۹۰۰ وات و برابر ۱۸ دقیقه بود که در مقایسه با خشک کردن با هوای گرم (۴۰۰ دقیقه) ۹۵/۵٪ کاهش داشت. نتایج نشان داد با افزایش توان مایکروویو ضریب نفوذ افزایش و انرژی فعال‌سازی کاهش می‌یابد. بیشترین ضریب نفوذ، $1/2 \times 10^{-7}$ مترمربع بر ثانیه و کمترین انرژی فعال‌سازی، ۵/۳ وات بر گرم برای توان ۹۰۰ وات به دست آمد. توان بهینه از لحاظ تغییر رنگ کل ۴۵۰ وات و از نظر شاخص قهوه‌ای شدن ۹۰۰ وات بود.

واژه‌های کلیدی: انرژی فعال‌سازی، پارامترهای رنگ، روش مایکروویو، سینتیک خشک کردن، نفوذپذیری.

مقدمه

موسیر با نام علمی (*Allium stipitatum*) گیاهی از سرده سیر می‌باشد. این گیاه بومی ایران بوده و در چمنزارها و دامنه رشته کوه‌های زاگرس به صورت وحشی می‌روید (Ebrahimi et al., 2009). برگ‌ها و پیازهای جامد قسمت‌های خوراکی آن هستند که به دلیل طعم خاص آن در بسیاری از مناطق ایران به عنوان طعم دهنده مواد غذایی و افزودنی به ماست، دوغ و ترشی استفاده می‌شود. پیاز موسیر به دلیل مقادیر زیاد ترکیبات گوگرددار، دارای خواص آنتی‌اکسیدانی و ضد میکروبی قوی است (Azadi, et al., 2008). این گیاه فقط در اواسط بهار رشد می‌کند. بنابراین، نگهداری موسیر برای مدت طولانی با استفاده از روش‌های کارآمد مانند خشک کردن روشی برای استفاده از آن در سایر فصل‌ها می‌باشد.

میوه‌ها و سبزیجات برای داشتن یک وعده غذایی سالم ضروری هستند، اما به دلیل بالا بودن مقدار رطوبت این محصولات (اکثراً بالای ۸۰ درصد) آنها به شدت به فساد میکروبی حساس هستند (Maisnam et al., 2017). از طرفی، امروزه حفظ و نگهداری طولانی مدت مواد غذایی به منظور استفاده بلند مدت از آنها ضروری می‌باشد. بنابراین روش‌های مختلف حفظ و نگهداری این محصولات مانند خشک کردن ضروری بوده و باید پس از برداشت محصول انجام شود.

خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین و رایج‌ترین روش‌های حفظ و نگهداری مواد غذایی است که باعث کاهش میزان آب، محدود کردن فعالیت میکروبیولوژیکی و افزایش ماندگاری محصولات می‌شود (Lee & Kim, 2009). میزان کمتر آب، هزینه حمل و نقل را کاهش داده و ذخیره‌سازی و تحویل محصول را آسان‌تر می‌کند (İlter et al., 2018). امروزه، بازار میوه و سبزیجات خشک در بسیاری از کشورهای جهان با طیف گسترده‌ای از صنایع غذایی به سرعت در حال رشد است (با نرخ رشد حدود ۳ درصد) (Karam et al., 2016). از این رو در این پژوهش یکی از روش‌های کارآمد خشک کردن بر روی موسیر مورد ارزیابی قرار گرفته است. متداول‌ترین روش‌های خشک کردن شامل روش خورشیدی، هوای گرم، انجمادی، اسمزی، خلاء، بستر سیال، بستر فورانی و خشک کردن مایکروویو و ترکیبی از این روش‌ها است (Sagar & Kumar, 2010). خشک کردن با هوای گرم رایج‌ترین روش خشک کردن است که اساس آن قرار دادن نمونه در جریان مداوم هوای گرم به منظور از بین بردن رطوبت است (Arslan & Özcan, 2011). پیچیدگی‌های این روش شامل تفاوت در مکانیسم‌های انتقال جرم، گرما، آب و انرژی است (Łechtańska et al., 2015). عدم سمیت و یکنواخت بودن محصولات از مهم‌ترین ویژگی‌های خشک کردن به روش هوای گرم است. همچنین استفاده از این روش حداقل یک سال عمر محصولات زراعی را افزایش می‌دهد، اما بررسی‌ها نشان داده است که

مایکروویو، هوای گرم، مادون قرمز و خشک کردن انجمادی را با هدف دستیابی به برترین کیفیت زعفران بررسی کردند و سرانجام دریافتند که خشک کردن مایکروویو به دلیل مصرف زمان و انرژی کمتر بهترین روش برای این ماده است.

مدل سازی فرآیند خشک کردن برای بهینه سازی فرآیند، طراحی تجهیزات و بهبود کیفیت محصول امری ضروری است (Aykın-Dinçer *et al.*, 2019). برخی محققان سینتیک خشک کردن محصولات غذایی از قبیل کنگر (Evin, 2012)، سیر (İlter *et al.*, 2018)، برگ نعناع (Horuz *et al.*, 2017)، بامیه (Aamir & Boonsupthip, 2017) و پیاز (Demiray *et al.*, 2017) را مورد بررسی قرار داده اند. با توجه به بررسی های انجام شده، هیچ گونه اطلاعاتی در پیرامون رفتار خشک کردن گیاه موسیر به روش مایکروویو در مقالات موجود نمی باشد. از این رو، روش مایکروویو برای فرآیند خشک کردن موسیر در این پژوهش استفاده شده است.

بنابراین تحقیق حاضر با هدف بررسی منحنی های خشک کردن و سینتیک خشک کردن برش های موسیر به روش مایکروویو و مقایسه آن با روش هوای گرم انجام شد. همچنین تأثیر توان مایکروویو بر (۱) سرعت خشک کردن (۲) ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (۳) انرژی فعال سازی و (۴) پارامترهای رنگی نمونه های موسیر مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش ها

آماده سازی نمونه

پیازهای موسیر تازه که در آزمایش های خشک کردن استفاده شدند از یک بازار محلی در شهر دزفول ایران خریداری و تا زمان شروع آزمایش در یخچال و در دمای 4 ± 0.2 درجه سلسیوس نگهداری شدند. برای تمام آزمایش ها، ابتدا نمونه های دارای پوست با آب شهری و با دست شسته شده و آلودگی های موجود بر روی نمونه حذف گردید و سپس پوست موسیر از روی نمونه حذف گردید. سپس، نمونه پوست گیری شده در یک صافی ریخته شده و آب مقطر بر روی نمونه ها دوش شد تا آلودگی های احتمالی باقی مانده نیز حذف گردد. سپس به برش هایی با ضخامت یکسان خرد شدند. میانگین ضخامت نمونه ها برابر ۴ میلی متر بوده است. متوسط وزن برش ها $3/5$ گرم بود. برای تعیین میزان رطوبت اولیه از روش استاندارد هوای گرم آون استفاده شد. به همین منظور، حدود ۲۶ گرم از موسیرهای خرد شده در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۲ ساعت در یک آون (آون آزمایشگاهی شرکت آترا، سری ACE400L) قرار داده شد و پس از خنک شدن، با استفاده از ترازوی دیجیتال با حساسیت یک هزارم گرم (شرکت

محصولات بدست آمده از این فرآیند از خصوصیات کیفی بالایی از قبیل محتوای غذایی، شکل، رنگ و طعم برخوردار نیستند (Onwude *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017). در این روش، به علت درجه حرارت بالا و مدت زمان طولانی فرآیند، هزینه های عملیاتی افزایش یافته و همچنین، کیفیت محصولات حاصل از این روش نیز کاهش می یابد (Sagar & Kumar, 2010). علاوه بر این، راندمان پایین انرژی مهم ترین نقطه ضعف این روش می باشد (Maskan, 2000). از این رو لازم است که برخی از روش های جدید خشک کردن برای رفع مشکلات ذکر شده توسعه یابند.

انرژی مایکروویو برای فرآیندهای دمایی از قبیل گرم کردن، پختن، پاستوریزه کردن، استریلیزه کردن و خشک کردن استفاده می شود (Hojjati *et al.*, 2015). کاربرد امروزه، انرژی مایکروویو برای خشک کردن محصولات زراعی به دلیل کاهش زمان و حفظ کیفیت محصول مورد توجه قرار گرفته و جایگزینی مناسب و مهم در صنعت فرآوری گیاهان است (Ahmed *et al.*, 2013). در این روش (مانند خشک کردن به روش هوای گرم) نیرو محرکه ای انتقال رطوبت اختلاف فشار بخار آب بین بخش های داخلی و سطحی محصول است (Maskan, 2001a). مایکروویوها امواج الکترومغناطیسی هستند که طول موج آنها در محدوده $1 \text{ m} - 1 \text{ mm}$ است و هنگامی که مواد غذایی در معرض این امواج قرار می گیرند، رطوبت آنها به سرعت از بین می رود (Lv, Lv, Jin, Cui, & Su, 2019). خشک کردن به روش مایکروویو در مقایسه با خشک کردن به روش هوای گرم، دارای توزیع دمایی یکنواخت تر و بازده انرژی بالاتری است که منجر به افزایش بازدهی حذف رطوبت می شود (Maskan, 2000). دیگر مزایای روش مایکروویو که می توان به آنها اشاره کرد عبارتند از: ایجاد ساختار پفکی در نمونه، سرعت خشک شدن بالاتر (Alibas, 2007; Jia *et al.*, 2019)، جلوگیری از دمای بالای سطح، صرفه جویی در مصرف انرژی (Torrington *et al.*, 2001) و کاهش فضای خشک کن (Maskan, 2000). بنابراین، خشک کردن مایکروویو به عنوان روشی مؤثر برای خشک کردن مواد غذایی معرفی می شود.

تاکنون روش مایکروویو برای خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی مانند کیوی (Maskan, 2001b)، موز (Maskan, 2000)، سیب زمینی (Bouraoui *et al.*, 1994) و برنج قهوه ای (Shen *et al.*, 2020) استفاده شده است. به عنوان مثال Horuz & Maskan (2015) فرآیند خشک کردن دانه های انار را به دو روش مایکروویو و هوای گرم، مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که در روش مایکروویو سرعت خشک شدن نسبت به روش هوای گرم بیشتر است. در پژوهشی دیگر Chen *et al.* (2020) روش های مختلف خشک کردن شامل تحت خلاء،

مقایسه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. بنابراین، هوای گرم در دمای ورودی ۵۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت ۲/۵ متر بر ثانیه بر روی نمونه‌ها دمیده شد.

مدل‌سازی ریاضی

به منظور مدل‌سازی ریاضی رفتار سینتیک خشک‌کردن برش‌های موسیر و یافتن بهترین مدل تجربی برای توصیف روند خشک‌کردن آن، ۱۰ مدل ریاضی شناخته‌شده خشک‌کردن لایه نازک مورد بررسی قرار گرفتند که در جدول (۱) درج شده‌اند. نسبت رطوبت بدون بعد (MR) در هر زمان در طول فرآیند خشک‌کردن با استفاده از معادله (۱) بدست آمد (Lemus-

Mondaca, Vega-Gálvez, Moraga, & Astudillo, 2015)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که MR ، M_t ، M_e و M_0 به ترتیب رطوبت نسبی (بدون بعد)، میزان رطوبت در زمان t ، رطوبت تعادلی و رطوبت اولیه بر مبنای ماده خشک ($g \text{ water}/g \text{ dry matter}$) است. در معادله (۱)، از آنجا که $M_e \ll M_0$ و $M_e \ll M_t$ (Aykın-Dinçer *et al.*, 2019) می‌توان معادله (۱) را به شرح زیر ساده کرد (Doymaz *et al.*, 2015):

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (\text{رابطه ۲})$$

BEL Engineering سری S-ES) وزن شدند. در نهایت میزان رطوبت نمونه‌های تازه 19 ± 0.2 کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک ($kg \text{ water}/kg \text{ dry matter}$) اندازه‌گیری شد.

تجهیزات خشک‌کردن و روش آزمایش

برای انجام آزمایشات میکروویو از یک دستگاه میکروویو خانگی قابل برنامه‌ریزی (سامسونگ مدل $sami14$ ، 2450 MHz) استفاده شده است که قادر به ایجاد امواج میکروویو است. این دستگاه دارای یک محفظه داخلی با ابعاد 397 در 219 در 400 میلی‌متر مکعب می‌باشد و از یک صفحه شیشه‌ای دوار به قطر 380 میلی‌متر تشکیل شده است. توان میکروویو در محدوده 100 تا 900 وات قابل تغییر است.

به منظور انجام آزمایشات، دو برش از نمونه‌های موسیر که در ضخامت‌های یکسان بریده شده بودند، بلافاصله وزن شده و روی صفحه دوار میکروویو قرار گرفتند. نمونه‌ها در معرض چهار توان خروجی میکروویو 450 ، 600 ، 750 و 900 وات قرار گرفته و در طی فرآیند تغییر وزن نمونه‌ها از طریق ترازوی دیجیتال هر 30 ثانیه یکبار ثبت شد. فرآیند خشک‌کردن تا نزدیک شدن میزان رطوبت نمونه‌ها به حدود $4/5$ درصد ادامه یافت. برای اطمینان از صحت نتایج، هر آزمایش سه بار در شرایط یکسان تکرار شد و میانگین داده‌های به دست آمده مورد بررسی قرار گرفت. به علاوه روش خشک‌کردن هوای گرم نیز به عنوان روش

جدول ۱- مدل‌های ریاضی رایج استفاده شده برای پیش‌بینی سینتیک خشک‌کردن.

شماره مدل	نام مدل	معادله مدل	مرجع
۱	نیوتن (لوپس)	$MR = \exp(-k t)$	(Lewis, 1921)
۲	پیچ	$MR = \exp(-k t^n)$	(Page, 1949)
۳	هندرسون و پابیس	$MR = a \exp(-k t)$	(Henderson, 1961)
۴	لگاریتمی	$MR = a \exp(-k t) + c$	(Yagcioglu, 1999)
۵	میدلی و همکاران	$MR = a \exp(-k t^n) + b t$	(Midilli, Kucuk, & Yapar, 2002)
۶	دو جمله‌ای	$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$	(Henderson, 1974)
۷	دوجمله‌ای نمایی	$MR = a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-k a t)$	(Sharaf-Eldeen, Blaisdell, & Hamdy, 1980)
۸	ورما و همکاران	$MR = a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-g t)$	(Verma, Bucklin, Endan, & Wratten, 1985)
۹	اصلاح شده هندرسون و پابیس	$MR = a \exp(-k t) + b \exp(-g t) + c \exp(-h t)$	(Karathanos, 1999)
۱۰	اصلاح شده پیچ	$MR = \exp(-k t^n)$	(Akpınar & Toraman, 2016)

از طریق معادله (۳) محاسبه می‌شود:

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (\text{رابطه ۳})$$

سرعت خشک‌کردن (DR) میزان رطوبت آزاد شده از سطح ماده خشک‌شده در واحد زمان است که نشان دهنده‌ی میزان تبخیر رطوبت از محصول است (Mujaffar & Sankat, 2015) که

در معادله فوق D_{eff} ضریب نفوذ موثر رطوبت (متر مربع بر ثانیه) و L نیمی از ضخامت نمونه (متر) است که در این کار برابر $10^{-3} \times 2$ متر می‌باشد. لازم به ذکر است که از آنجایی که در معادله‌ی (۸) کل جملات به جز اولین جمله صفر هستند، این معادله ساده شده (Darvishi et al., 2014) و فرم لگاریتمی آن به شکل زیر ارائه شده است:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\pi^2 \frac{D_{eff} t}{L^2}\right) \quad (\text{رابطه ۹})$$

بنابراین با ترسیم خط $\ln(MR)$ بر حسب t و با استفاده از شیب این خط می‌توان مقادیر D_{eff} را با استفاده از معادله‌ی زیر بدست آورد:

$$\text{slope} = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

انرژی فعال سازی

بر اساس معادله آرنیوس انرژی فعال سازی (E_a) در طی مرحله نزولی خشک کردن به صورت زیر تعیین می‌شود (Horuz et al., 2017):

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

که در آن، D_0 ثابت پیش‌نمایی معادله آرنیوس (متر مربع بر ثانیه)، E_a انرژی فعال‌سازی (کیلوژول بر مول. کلین) و T دمای هوا (کلین) است. لازم به ذکر است در روش خشک کردن میکروویو، دمای داخل محفظه میکروویو دقیقاً قابل اندازه‌گیری نیست. بنابراین، دادالی و ازبک (۲۰۰۸) (Dadali & Özbek, 2008) این معادله را اصلاح و فرم جدیدی برای آن پیشنهاد دادند که به صورت زیر می‌باشد:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a \cdot m}{P}\right) \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

که در آن m وزن برش‌های موسیر (گرم)، P توان میکروویو (وات) و E_a انرژی فعال‌سازی (وات بر گرم) است. فرم لگاریتمی آن را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\ln(D_{eff}) = -E_a \left(\frac{m}{P}\right) + \ln(D_0) \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

بنابراین می‌توان با رسم $\ln(D_{eff})$ بر حسب (m/P) یک خط مستقیم به دست آورد که انرژی فعال‌سازی از شیب این خط قابل تعیین است.

که M_t ، $M_{t+\Delta t}$ و Δt به ترتیب مقدار رطوبت در زمان $t+\Delta t$ بر حسب ماده خشک (g water/g dry matter)، مقدار رطوبت در زمان t بر حسب ماده خشک (g water/g dry matter) و فاصله زمانی خشک کردن بر حسب دقیقه است.

از نرم افزار (version 12.3, Systat Sigma Plot Software, Inc.) برای تجزیه و تحلیل رگرسیون و برازش داده‌های تجربی و ارزیابی پارامترهای معادله استفاده شده است. ضریب برازش (R^2) و مجذور میانگین مربعات خطا ($RMSE$) برای یافتن صحت مدل‌ها اندازه‌گیری گردید. لازم به ذکر است که مقدار بالاتر R^2 (نزدیکتر به یک) و مقدار کمتر $RMSE$ (نزدیک به صفر) بهترین مدل را نشان می‌دهند. پارامترهای ذکر شده را می‌توان با معادلات زیر محاسبه کرد (Azimi-Nejadian & Hoseini, 2019):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_m)} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن

$$MR_m = \frac{\sum_{i=1}^N MR_{pred,i}}{N} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

در معادلات فوق MR_{exp} و MR_{pred} به ترتیب مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده برای رطوبت نسبی برای هر تست i می‌باشند و MR_m میانگین مقدار رطوبت نسبی و N تعداد داده‌های آزمایش است.

ضریب نفوذ موثر رطوبت

قانون ناپایای دوم فیک یکی از ساده‌ترین مدل‌ها برای توصیف ویژگی‌های این محصولات در مرحله خشک کردن نزولی است که به صورت زیر تعریف شده است (Crank, 1975):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla[D_{eff}(\nabla M)] \quad (\text{رابطه ۷})$$

همچنین با توجه به اینکه در فرآیند خشک کردن برش‌های موسیر، نفوذ موثر رطوبت شعاعی و ثابت است، با استفاده از حل تحلیلی این معادله عبارت زیر تعیین می‌گردد (Lemus-Mondaca et al., 2015):

(رابطه ۸)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \exp\left(- (2n+1)\pi^2 \frac{D_{eff} t}{L^2}\right)$$

رنگ سنجی

رنگ‌سنجی نمونه‌های موسیر قبل و بعد از خشک شدن در سیستم CIE با استفاده از روش تصویربرداری دیجیتالی ذکر شده در مقالات (Kesbi, Sadeghi, & Mireei, 2016) انجام شد. پارامترهای رنگی L^* ، a^* و b^* به ترتیب بیانگر تیرگی-روشنی (۱۰۰-۰)، رنگ سبز ($-a^*$) تا قرمز ($+a^*$) و رنگ آبی ($-b^*$) تا زرد ($+b^*$) می‌باشد. نمونه‌های تازه قبل از هر آزمایش و خشک شده بعد از هر آزمایش در یک جعبه خاص که برای گرفتن عکس توسط دوربین دیجیتال (Canon، SX 540 Hs، و کیفیت ۲۰/۴ مگاپیکسل) تهیه شده است، قرار داده شدند. جعبه متشکل از دو لامپ LED می‌باشد که در جلوی یکدیگر قرار گرفته‌اند، به علاوه یک سطح صاف که دارای ۳۴ سانتی‌متر ارتفاع از کف جعبه است، جهت قرار دادن نمونه و یک سوراخ در بالای جعبه برای گرفتن عکس تعبیه شده است. در نهایت مقادیر L^* ، a^* و b^* توسط نرم افزار ImageJ (1.52a) تعیین گردید.

یکی دیگر از پارامترهای رنگ‌سنجی، تغییر رنگ کل، ΔE است که به صورت زیر تخمین زده شده است:

(رابطه ۱۵)

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2}$$

موسیرهای تازه به عنوان مرجع در نظر گرفته شده و زیروند "0" به آن‌ها اختصاص داده شد. همچنین مقدار پارامتر $Chroma$ میزان اشباع رنگ را مشخص می‌کند و متناسب با دوام رنگ است و به روش زیر محاسبه می‌شود (Maskan, 2001b):

$$Chroma = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

(رابطه ۱۶)

علاوه بر این، زاویه رنگ، $Hue\ angle$ ، و شاخص قهوه‌ای شدن، BI ، بر اساس روابط زیر تعیین می‌گردد (Maskan, 2001b):

$$Hue\ angle = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right)$$

(رابطه ۱۷)

$$(BI) = \frac{100(x - 0.31)}{0.17}$$

(رابطه ۱۸)

که x عبارت است از:

$$x = \frac{(a^* + 1.75L^*)}{(5.645L^* + a^* - 3.012b^*)}$$

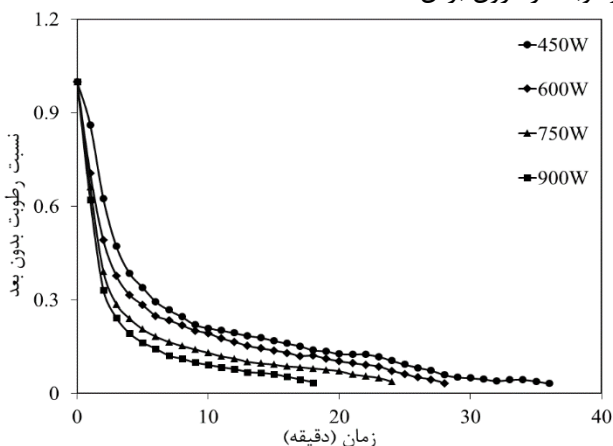
(رابطه ۱۹)

ذکر این نکته ضروری است که زاویه رنگ بزرگتر از 90° رنگ سبتری را نشان می‌دهد و زاویه رنگ کوچکتر از 90° رنگ قرمز نارنجی را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

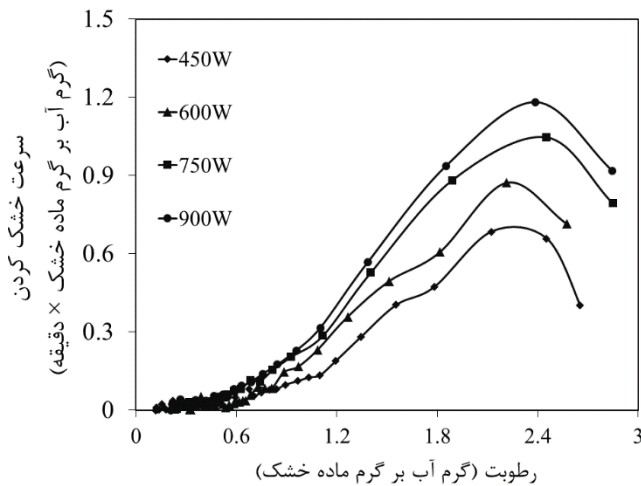
منحنی‌های خشک کردن

نمونه‌های تازه موسیر به طور متوسط تا رطوبت نسبی نزدیک به ۴/۵ درصد خشک شدند. منحنی‌های خشک کردن موسیر به روش مایکروویو در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. قبل از خشک شدن، سطح ذرات نمونه‌ها کاملاً با یک لایه نازک آب پوشیده شده بود که به صورت آب غیرپیوندی است. پس از برقراری تماس بین سطح مواد و امواج مایکروویو، دمای مورد نیاز برای تبخیر آب تأمین شده و انتقال همزمان جرم و گرما باعث خشک شدن نمونه می‌شود. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در فرآیند خشک کردن میزان رطوبت با زمان کاهش می‌یابد. بدیهی است که با افزایش توان مایکروویو، میزان رطوبت نمونه کاهش یافته و زمان خشک شدن نیز کاهش می‌یابد (Andrés et al., 2004). این امر به دلیل القای گرمای حجمی توسط مایکروویو به درون نمونه‌ها است که منجر به تسریع خروج بخار شده و افزایش نرخ خشک کردن را موجب می‌گردد (Kesbi et al., 2016). به عبارت دیگر توان مایکروویو بالاتر، باعث انتقال بیشتر جرم و گرما در برش‌های موسیر می‌شود که این امر نتیجه تولید بیشتر گرما در آنها است. از این رو، اختلاف فشار بخار بزرگی بین مرکز و سطح برش ایجاد می‌شود (Horuz et al., 2017). نتایج مشابهی برای چندین ماده‌ی غذایی نیز با استفاده از روش خشک کردن مایکروویو مانند گوجه فرنگی (Al-Harahsheh et al., 2009)، کنگر (Evin, 2012)، بامیه (Aamir & Boonsupthip, 2017) و پوره سیر (İlter et al., 2018) مشاهده شده است. در آغاز فرآیند، شیب منحنی نسبت به سایر قسمت‌ها بیشتر است که به دلیل رطوبت زیاد و گرمایش حجمی است که پیش‌تر مورد بحث قرار گرفت، سپس این شیب به تدریج کاهش یافته که دلیل آن حذف رطوبت از درون برش‌ها است.



شکل ۱- منحنی تغییرات رطوبت موسیر در فرآیند خشک کردن به روش مایکروویو در توان‌های مختلف.

انرژی بیشتر مایکروویو و به دلیل نفوذ رطوبت بیشتر است. رفتار مشابهی در مورد برخی از مواد مانند تفاله‌ی سیب (Wang *et al.*, 2007)، کنگر علوفه‌ای (Evin, 2012)، لواشک از گیل (Suna, 2019) و سیب زمینی (Azimi-Nejadian & Hoseini, 2019) به دست آمد. بیشینه سرعت خشک شدن در توان ۹۰۰ وات بدست آمد. اطلاعات حاصل از شکل (۳) نشانگر آن است که فرآیند خشک کردن در مرحله نزولی رخ داده است و هیچ مرحله‌ای با نرخ ثابت خشک کردن در هیچ یک از توان‌ها رخ نداده است که این امر بیانگر این مساله است که مکانیسم نفوذ، مکانیسم غالب برای حذف آب از برش‌های موسیر است و نتایج حاصل با نتایج سایر محققان مطابقت دارد (Horuz *et al.*, 2017; Kesbi *et al.*, 2016; Maskan, 2000; Suna, 2019).



شکل ۳- نمودار سرعت خشک شدن برش‌های موسیر تحت مایکروویو در توان‌های مختلف.

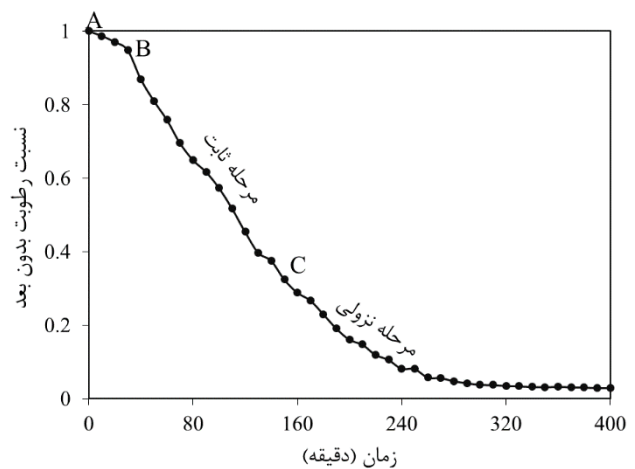
مدل‌سازی ریاضی رفتار خشک کردن

در این مطالعه ۱۰ مدل لایه نازک انتخاب و داده‌های تجربی با استفاده از آن‌ها برازش شد تا بهترین و مناسب‌ترین مدل انتخاب گردد. در جدول ۲ نتایج حاصل از برازش برای هر مدل ارائه شده است. مدل دارای بالاترین R^2 و کمترین $RMSE$ به عنوان بهترین مدل برای توصیف فرآیند خشک کردن برش‌های موسیر تحت فرآیند خشک کردن مایکروویو انتخاب گردید. مدلی که برای تمام توان‌های مایکروویو به طور همزمان دارای بیشترین مقدار R^2 و کمترین میزان $RMSE$ بوده است، مدل دو جمله‌ای (مدل شماره ۶) بود که به شرح زیر می‌باشد (Sharaf-Eldeen *et al.*, 1980):

$$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t) \quad (\text{رابطه } ۲۰)$$

پارامترهای تخمین زده شده مدل شامل ثابت خشک کردن، k_1 و k_2 و ثابت‌های خشک کردن بدون بعد، a و b ، در جدول ۲ به همراه R^2 و $RSME$ مربوطه برای همه آزمایش‌ها گزارش شده است.

کمترین زمان خشک کردن مربوط به توان مایکروویو ۹۰۰ وات می‌باشد، که در آن زمان خشک شدن ۱۸ دقیقه بود که در مقایسه با زمان خشک کردن به روش هوای گرم که در مدت زمان ۴۰۰ دقیقه به همان میزان رطوبت رسید، کاهش ۹۵/۵ درصد به دست آمد. منحنی خشک کردن موسیر تحت هوای گرم با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد هوای گرم در شکل ۲ نشان داده شده است. بطور کلی فرآیند خشک کردن در سه مرحله اتفاق می‌افتد که در شکل ۲ به خوبی نشان داده شده است. شکل منحنی در قسمت AB نشان می‌دهد که سطح نمونه توسط یک لایه مایع در دمای زیر دمای تعادل پوشیده شده است. در این مرحله، از آنجا که تبخیر رطوبت به مقدار گرمایی برابر با گرمای نهان تبخیر مایع نیاز دارد، سطح مایع بعد از مدتی به دمای تعادل می‌رسد. بنابراین مقدار گرمای منتقل شده از هوای اطراف به سطح آب برابر با مقدار گرمای لازم برای تبخیر خواهد بود. بنابراین رطوبت ثابت می‌ماند و سپس نرخ خشک شدن در قسمت BC تقریباً ثابت است تا نقطه C که به آن نقطه بحرانی گفته می‌شود. پس از نقطه C، نرخ خشک کردن روند کاهشی می‌یابد و این بخش، مرحله نزولی خشک شدن نامیده می‌شود.



شکل ۲- نمودار خشک شدن برش‌های موسیر تحت هوای داغ با دمای ۵۰°C.

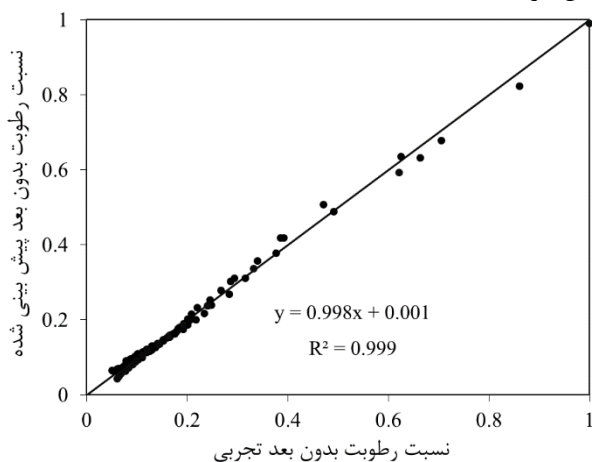
سرعت خشک شدن برش‌های موسیر در توان‌های مختلف مایکروویو خروجی محاسبه و برحسب رطوبت ترسیم شد که در شکل (۳) قابل مشاهده می‌باشد. مطابق این شکل در فرآیند خشک کردن، سرعت اولیه خشک شدن افزایش می‌یابد که به دلیل رطوبت زیاد نمونه‌ها و در نتیجه جذب انرژی بیشتر می‌باشد و این افزایش جذب انرژی منجر به افزایش دمای برش‌ها و در نتیجه افزایش سرعت خشک شدن می‌شود. سپس رطوبت نمونه کاهش یافته و به تبع آن جذب انرژی نیز کاهش می‌یابد و در نتیجه سرعت خشک شدن کاهش می‌یابد. با افزایش توان مایکروویو، سرعت خشک شدن افزایش می‌یابد که این امر به سبب جذب

جدول ۲- ثوابت و انحرافات استاندارد مدل های لایه نازک خشک کردن موسیر تحت مایکروویو با توان های مختلف

شماره مدل	450W	600W	750W	900W
1	$k=0.17$ $R^2=0.96$ $RMSE=0.25$	$k=0.20$ $R^2=0.974$ $RMSE=0.329$	$k=0.32$ $R^2=0.97$ $RMSE=0.28$	$k=0.33$ $R^2=0.96$ $RMSE=0.27$
2	$n=0.67$ $k=0.33$ $R^2=0.97$ $RMSE=0.18$	$n=0.484$ $k=0.510$ $R^2=0.967$ $RMSE=0.182$	$n=0.58$ $k=0.56$ $R^2=0.97$ $RMSE=0.21$	$n=0.61$ $k=0.54$ $R^2=0.97$ $RMSE=0.19$
3	$a=0.84$ $k=0.15$ $R^2=0.97$ $RMSE=0.24$	$a=0.702$ $k=0.120$ $R^2=0.961$ $RMSE=0.286$	$a=0.85$ $k=0.26$ $R^2=0.97$ $RMSE=0.27$	$a=0.86$ $k=0.27$ $R^2=0.96$ $RMSE=0.26$
4	$a=0.91$ $c=0.08$ $R^2=0.98$ $RMSE=0.17$	$a=0.80$ $c=0.01$ $R^2=0.98$ $RMSE=0.17$	$a=0.90$ $c=0.11$ $R^2=0.98$ $RMSE=0.16$	$a=0.89$ $c=0.10$ $R^2=0.97$ $RMSE=0.16$
5	$b=0.01$ $a=1.07$ $R^2=0.98$ $RMSE=0.17$	$a=1.03$ $b=0.01$ $R^2=0.98$ $RMSE=0.15$	$a=1.04$ $b=0.01$ $R^2=0.98$ $RMSE=0.17$	$a=1.03$ $b=0.01$ $R^2=0.98$ $RMSE=0.16$
6	$b=0.74$ $a=0.31$ $RMSE=0.11$ $R^2=1.00$	$b=0.69$ $a=0.31$ $R^2=1.00$ $RMSE=0.09$	$b=0.22$ $a=0.82$ $R^2=1.00$ $RMSE=0.11$	$b=0.76$ $a=0.27$ $R^2=0.99$ $RMSE=0.10$
7	$a=0.29$ $k=0.45$ $R^2=0.96$ $RMSE=0.21$	$a=0.25$ $k=0.59$ $R^2=0.98$ $RMSE=0.30$	$a=0.29$ $k=0.81$ $R^2=0.96$ $RMSE=0.26$	$a=0.28$ $k=0.86$ $R^2=0.96$ $RMSE=0.24$
8	$a=0.29$ $g=0.34$ $R^2=0.99$ $RMSE=0.13$	$a=0.31$ $g=0.60$ $R^2=0.99$ $RMSE=0.09$	$a=0.21$ $g=0.62$ $R^2=0.99$ $RMSE=0.13$	$a=0.26$ $g=0.66$ $R^2=0.99$ $RMSE=0.13$
9	$a=0.38$ $b=0.37$ $R^2=0.99$ $RMSE=0.13$	$a=0.41$ $b=0.28$ $R^2=0.99$ $RMSE=0.11$	$a=0.37$ $b=0.44$ $R^2=0.99$ $RMSE=0.13$	$a=0.42$ $b=0.35$ $R^2=0.99$ $RMSE=0.12$
10	$k=0.06$ $n=1$ $R^2=0.98$ $RMSE=0.16$	$k=0.10$ $n=0.97$ $R^2=0.97$ $RMSE=0.17$	$k=0.32$ $n=1.03$ $R^2=0.96$ $RMSE=0.22$	$k=0.10$ $n=0.09$ $R^2=0.97$ $RMSE=0.20$

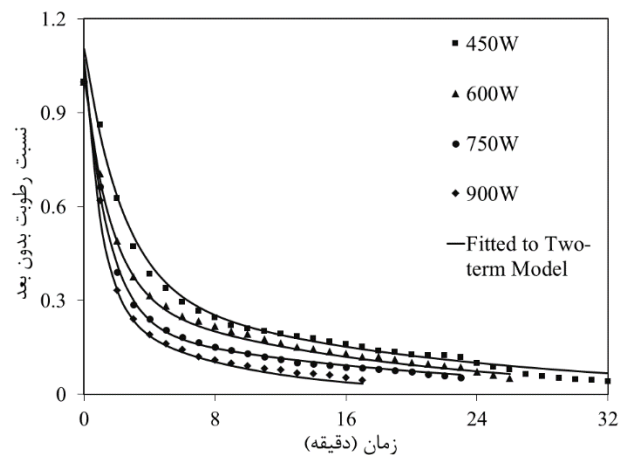
h, g, n, k, c, b, a: ثوابت معادلات سینتیکی خشک کردن؛ R^2 : ضریب تعیین؛ $RMSE$: خطای جذر میانگین مربعات

شکل ۵ مقایسه‌ی داده‌های برازش شده با استفاده از مدل دو جمله‌ای با مقادیر تجربی به دست آمده را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این مقایسه نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های مدل دو جمله‌ای و داده‌های خشک کردن تجربی به طور کلی در اطراف یک خط مستقیم قرار می‌گیرند. این امر بیانگر آن است که مدل دو جمله‌ای در توصیف ویژگی‌های خشک کردن برش‌های موسیر تحت امواج مایکروویو در محدوده توان ۴۵۰ تا ۹۰۰ وات به خوبی عمل کرده است.



شکل ۵- مقایسه داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل دو جمله‌ای با داده‌های تجربی.

شکل منحنی‌های خشک کردن بر اساس مدل دو جمله‌ای که بهترین مدل برای برازش داده‌های تجربی موسیر برای توان‌های مختلف مایکروویو بود در شکل ۴ نشان داده شده است. این مدل توانسته به طور موفقیت آمیزی برای توصیف رفتار خشک کردن چندین محصول دیگر از قبیل ذرت (Sharaf-Eldeen et al., 1980), انجیر (Babalıs et al., 2006) و گلابی (Lahsasni et al., 2004) عمل کند.



شکل ۴- مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده داده‌های رطوبت نسبی توسط مدل دو جمله‌ای برای موسیر تحت روش مایکروویو در توان‌های مختلف.

بررسی انرژی فعالسازی

مقادیر انرژی فعالسازی برش‌های موسیر در توان‌های مختلف میکروویو محاسبه شدند. کمترین مقدار به دست آمده برای توان میکروویو ۹۰۰ وات برابر ۵/۳ وات بر گرم و بیشترین مقدار برای توان ۴۵۰ وات برابر ۵/۸ وات بر گرم به دست آمد. با افزایش توان میکروویو مقدار انرژی فعالسازی کاهش یافته است، زیرا با افزایش توان میکروویو نفوذپذیری رطوبت بیشتر شده و انرژی مورد نیاز برای شروع نفوذ از بخش‌های داخلی نمونه کمتر خواهد شد. مقادیر به دست آمده در مطالعه حاضر، با مقادیر به دست آمده برای چندین محصول غذایی که مقادیر آنها در جدول ۳ آورده شده است قابل مقایسه بوده و در محدوده آنها می‌باشد.

جدول ۳- مقادیر انرژی فعالسازی گزارش شده در مقالات برای مواد غذایی مختلف و مقایسه با مقدار به دست آمده برای موسیر.

نام ماده	شرایط خشک شدن	انرژی فعالسازی، E_a (W/g)	مرجع
موسیر	توان ۴۵۰ تا ۹۰۰ وات	۵/۵-۳/۸	کار حاضر
برگ نعناع	توان ۲۰۰ تا ۸۰۰ وات	۱/۹	Torki- Harchegani et al., (2016)
سیب زمینی شیرین	توان ۱۸۰ تا ۹۰۰ وات	۹/۲۳-۲/۵	Harish et al.,) (2014)
برش‌های پیاز	توان ۸۰ تا ۲۴۰ وات	۲/۶-۲/۱	Süfer et al.,) (2017)

ارزیابی پارامترهای رنگ

پارامترهای رنگ نمونه تازه و نمونه‌های خشک شده در توان‌های مختلف میکروویو در جدول ۴ آورده شده است. در نمونه‌های تازه موسیر، مقادیر پایین L^* نشان دهنده رنگ روشن در نمونه‌های تازه می‌باشد. مقدار پایین a^* نشان دهنده رنگ سبز روشن و مقدار پایین b^* نشان دهنده رنگ قرمزی اندک در نمونه‌های تازه موسیر است. همچنین مقدار پارامتر زاویه رنگ که برای نمونه تازه موسیر برابر ۱/۲۳۰- بوده است، نشان دهنده رنگ نارنجی-قرمز نمونه تازه است.

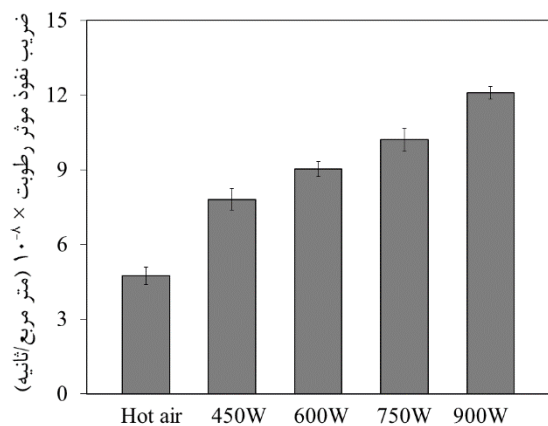
جدول ۴- پارامترهای رنگ برش‌های موسیر در توان‌های مختلف میکروویو و هوای داغ.

نمونه تازه						
Hue angle	Chroma	b_0	a_0	L_0		
-۱/۲۳	۰/۲۷	۰/۲۶	-۰/۱۰	۰/۸۹		
توان میکروویو						
BI	ΔE	Hue angle	Chroma	b^*	a^*	L^*
۱۷۴/۸۷	۰/۳۹	-۱/۴۲	۰/۲۶	۰/۲۵	-۰/۰۴	۰/۳۸
۲۰۴/۱۵	۰/۳۷	-۱/۴۵	۰/۴۴	۰/۴۴	-۰/۰۵	۰/۶۰
۲۵۳/۹۶	۰/۴۰	-۱/۵۵	۰/۴۰	۰/۴۰	-۰/۰۱	۰/۵۰
۱۴۳/۹۶	۰/۵۲	-۱/۴۲	۰/۴۸	۰/۴۷	-۰/۰۷	۰/۷۹

بررسی ضریب نفوذ موثر رطوبت

مقادیر نفوذپذیری موثر رطوبت به روش شیب خط محاسبه شده و در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. کمترین مقدار برابر 8×10^{-8} متر مربع بر ثانیه برای توان میکروویو ۴۵۰ وات و بیشترین مقدار برابر 7×10^{-7} متر مربع بر ثانیه برای توان ۹۰۰ وات به دست آمد. مقادیر ذکر شده با افزایش توان میکروویو افزایش یافتند. این افزایش به دلیل فعالیت نفوذپذیری آب به علت افزایش توان میکروویو و بنابراین افزایش دمای نمونه است، زیرا نفوذ رطوبت به دما وابسته است. این رفتار مشابه رفتار نفوذپذیری چندین محصول تحت خشک کردن میکروویو می‌باشد که در مقالات آورده شده است (Azimi-Nejadian & Hoseini, 2019; Demiray et al., 2017; Evin, 2012)

لازم به ذکر است که هیچ گزارشی برای نفوذپذیری رطوبت موسیر در مقالات ذکر نشده است. این مقدار برابر 8×10^{-8} متر مربع بر ثانیه تحت خشک کردن هوای گرم در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد برای موسیر به دست آمد که در محدوده کلی ضریب نفوذ 6×10^{-6} - 11×10^{-6} متر مربع بر ثانیه برای محصولات غذایی است (Zogzas et al., 1996). مقادیر به دست آمده ضریب نفوذ برای روش میکروویو بزرگتر از مقادیر به دست آمده برای روش هوای گرم هستند که عملکرد بهتر روش میکروویو برای خشک کردن موسیر را نشان می‌دهد.



شکل ۶- مقادیر ضریب نفوذ موثر رطوبت (D_{eff}) تحت میکروویو با توان‌های مختلف و هوای داغ در دمای ۵۰°C.

خشک کردن در چهار توان مایکروویو ۴۵۰، ۶۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ وات انجام شد. با برازش کردن ۱۰ مدل رایج مورد استفاده برای پیش‌بینی سینتیک خشک کردن مواد غذایی، نتایج نشان داد که مدل دو جمله‌ای سینتیک خشک کردن مایکروویو موسیر در محدوده توان ۴۵۰ تا ۹۰۰ وات را بهتر از سایر مدل‌ها نشان می‌دهد. این مدل رفتار خشک کردن موسیر را با بالاترین مقدار حاصل از آزمایشات نشان داد که با افزایش توان مایکروویو، زمان خشک شدن کاهش یافته و سرعت خشک شدن نیز افزایش یافته است. کمترین زمان خشک کردن مربوط به توان مایکروویو ۹۰۰ وات به دست آمد، که در آن زمان خشک شدن ۱۸ دقیقه بود که در مقایسه با زمان خشک کردن به روش هوای گرم که در مدت زمان ۴۰۰ دقیقه انجام شد، کاهش ۹۵/۵ درصد به دست آمد. مقدار ضریب نفوذ موثر رطوبت و انرژی فعالسازی در توان‌های مختلف محاسبه و با افزایش توان مایکروویو ضریب نفوذ افزایش و انرژی فعالسازی کاهش یافت. بیشترین ضریب نفوذ برای توان مایکروویو ۹۰۰ وات برابر $10^{-7} \times 1/2$ متر مربع بر ثانیه و کمترین انرژی فعالسازی برابر ۵/۳ وات بر گرم به دست آمد. پارامترهای رنگ نیز مورد بررسی قرار گرفت و بهترین توان از لحاظ تغییر رنگ کل، توان ۴۵۰ وات و از نظر شاخص قهوه‌ای شدن، توان ۹۰۰ وات بود. با توجه به نتایج به دست آمده، توان ۹۰۰ وات به عنوان توان بهینه خشک کردن مایکروویو موسیر، از نظر زمان، ضریب نفوذ موثر رطوبت، انرژی فعالسازی و شاخص قهوه‌ای شدن خواهد بود.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

اختلاف رنگ کل، ΔE ، یک پارامتر مهم برای ارزیابی رنگ نمونه در طول فرآیند خشک شدن می‌باشد. همانطور که در جدول ۴ آورده شده است، با افزایش توان مایکروویو مقدار تغییر رنگ کلی افزایش یافته است. بنابراین از نظر تغییر رنگ کل، توان ۴۵۰ وات بهترین توان برای خشک کردن موسیر در محدوده توان ۴۵۰ تا ۹۰۰ وات می‌باشد. پارامتر *Chroma* میزان پایداری رنگ را نشان می‌دهد و هرچه با نمونه تازه اختلاف کمتری داشته باشد، محصول دارای کیفیت رنگ مناسب‌تری می‌باشد. با توجه به مقدار محاسبه شده این پارامتر، واضح است که نمونه خشک شده در توان ۴۵۰ وات کمترین اختلاف با نمونه تازه را نشان می‌دهد. شاخص قهوه‌ای شدن، *BI*، که نشان‌دهنده خلوص رنگ قهوه‌ای است، به عنوان یک پارامتر مهم مربوط به قهوه‌ای شدن آنزیمی و غیرآنزیمی گزارش شده است (Maskan, 2001b). مقدار این شاخص در طول فرآیند خشک شدن افزایش می‌یابد. این مقادیر با افزایش توان مایکروویو افزایش یافت، به جز در مورد توان ۹۰۰ وات که در این توان کمترین اختلاف شاخص با حالت نمونه تازه به دست آمد. علت آن می‌تواند به دلیل کمتر بودن زمان فرآیند و در نتیجه کم بودن زمان کافی برای افزایش قهوه‌ای شدن برش‌های موسیر در این توان مشخص باشد. بنابراین از نظر قهوه‌ای شدن، توان ۹۰۰ وات بهترین توان می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر روش مایکروویو بر مشخصه‌های خشک کردن موسیر به عنوان روشی موثر در زمان و سرعت خشک کردن مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور آزمایشات

نمادها

M_0	رطوبت اولیه (g water/g dry matter)	a	ثابت خشک کردن بدون بعد
$MR_{pred, i}$	رطوبت نسبی پیش‌بینی شده برای هر تست i	a^*	پارامتر رنگ
MR_m	مقدار متوسط رطوبت نسبی	b	ثابت خشک کردن بدون بعد
n	ثابت خشک کردن بدون بعد	b^*	پارامتر رنگ
N	تعداد داده‌های آزمایشی	BI	شاخص قهوه‌ای شدن
r	شعاع نمونه (m)	D_{eff}	ضریب نفوذ موثر رطوبت (m^2/s)
R^2	ضریب تعیین	D_0	ثابت پیش‌نمایی معادله آرنیوس (m^2/s)
$RMSE$	مجذور میانگین مربعات خطا	E_a	انرژی فعالسازی (kJ/mol)
R	ثابت جهانی گازها ($kJ/molK$)	k	ثابت خشک کردن (l/min)
T	دمای هوای گرم (K)	L^*	پارامتر رنگ
t	زمان (min)	MR	رطوبت نسبی بدون بعد
ΔE	تغییر رنگ کل	M_t	محتوای رطوبت در زمان t (g water/g dry matter)
		M_e	رطوبت تعادلی (g water/g dry matter)

REFERENCES

Aamir, M., & Boonsupthip, W. (2017). Effect of microwave drying on quality kinetics of okra. *Journal of Food Science and Technology*, 54(5),

1239-1247.

Ahmed, N., Singh, J., Chauhan, H., Anjum, P. G. A., & Kour, H. (2013). Different drying methods: Their

- applications and recent advances. *International Journal of Food Nutrition and Safety*, 4(1), 34-42.
- Akpinar, E. K., & Toraman, S. (2016). Determination of drying kinetics and convective heat transfer coefficients of ginger slices. *Heat and Mass Transfer*, 52(10), 2271-2281.
- Al-Harshseh, M., Ala'a, H., & Magee, T. (2009). Microwave drying kinetics of tomato pomace: Effect of osmotic dehydration. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(1), 524-531.
- Alibas, I. (2007). Microwave, air and combined microwave-air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT-Food Science and Technology*, 40(8), 1445-1451.
- Andrés, A., Bilbao, C., & Fito, P. (2004). Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air-microwave dehydration. *Journal of Food Engineering*, 63(1), 71-78.
- Arslan, D., & Özcan, M. (2011). Dehydration of red bell-pepper (*Capsicum annum L.*): Change in drying behavior, colour and antioxidant content. *Food and Bioprocess Processing*, 89(4), 504-513.
- Aykin-Dinçer, E., Kılıç-Büyükkurt, Ö., & Erbaş, M. (2020). Influence of drying techniques and temperatures on drying kinetics and quality characteristics of beef slices. *Heat and Mass Transfer*, 56(1), 315-320.
- Azadi, H. G., Ghaffari, S. M., Riazi, G. H., Ahmadian, S., & Vahedi, F. (2008). Antiproliferative activity of chloroformic extract of Persian Shallot, *Allium hirtifolium*, on tumor cell lines. *Cytotechnology*, 56(3), 179-185.
- Azimi-Nejadian, H., & Hoseini, S. S. (2019). Study the effect of microwave power and slices thickness on drying characteristics of potato. *Heat and Mass Transfer*, 55(10), 2921-2930.
- Babalıs, S. J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N., & Belessiotis, V. G. (2006). Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *Journal of Food Engineering*, 75(2), 205-214.
- Bouraoui, M., Richard, P., & Durance, T. (1994). Microwave and convective drying of potato slices. *Journal of Food Process Engineering*, 17(3), 353-363.
- Chen, D., Xing, B., Yi, H., Li, Y., Zheng, B., Wang, Y., & Shao, Q. (2020). Effects of different drying methods on appearance, microstructure, bioactive compounds and aroma compounds of saffron (*Crocus sativus L.*). *LWT*, 120, 108913.
- Crank, J. (1979). *The mathematics of diffusion*. Oxford university press.
- Dadali, G., & Özbek, B. (2008). Microwave heat treatment of leek: drying kinetic and effective moisture diffusivity. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(8), 1443-1451.
- Darvishi, H., Khoshtaghaza, M. H., & Minaei, S. (2014). Drying kinetics and colour change of lemon slices. *International Agrophysics*, 28(1), 1-6.
- Demiray, E., Seker, A., & Tulek, Y. (2017). Drying kinetics of onion (*Allium cepa L.*) slices with convective and microwave drying. *Heat and Mass Transfer*, 53(5), 1817-1827.
- Doymaz, I., Kipcak, A. S., & Piskin, S. (2015). Microwave drying of green bean slices: drying kinetics and physical quality. *Czech Journal of Food Sciences*, 33(4), 367-376.
- Ebrahimi, R., Zamani, Z., & Kashi, A. (2009). Genetic diversity evaluation of wild Persian shallot (*Allium hirtifolium Boiss.*) using morphological and RAPD markers. *Scientia Horticulturae*, 119(4), 345-351.
- Evin, D. (2012). Thin layer drying kinetics of *Gundelia tournefortii L.* *Food and Bioprocess Processing*, 90(2), 323-332.
- Harish, A., Vivek, B., Sushma, R., Monisha, J., & Krishna Murthy, T. (2014). Effect of microwave power and sample thickness on microwave drying kinetics elephant foot yam (*Amorphophallus Paoniifolius*). *American Journal of Food Science and Technology*, 2(1), 28-35.
- Henderson, S. (1974). Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE*, 17(6), 1167-1168.
- Henderson, S. (1961). Grain Drying Theory, I: Temperature Effect on Drying Coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6(3), 169-174.
- Hojjati, M., Noguera-Artiaga, L., Wojdyło, A., & Carbonell-Barrachina, Á. A. (2015). Effects of microwave roasting on physicochemical properties of pistachios (*Pistaciavera L.*). *Food Science and Biotechnology*, 24(6), 1995-2001.
- Horuz, E., Bozkurt, H., Karataş, H., & Maskan, M. (2017). Drying kinetics of apricot halves in a microwave-hot air hybrid oven. *Heat and Mass Transfer*, 53(6), 2117-2127.
- Horuz, E., & Maskan, M. (2015). Hot air and microwave drying of pomegranate (*Punica granatum L.*) arils. *Journal of Food Science and Technology*, 52(1), 285-293.
- İlter, I., Akyıl, S., Devseren, E., Okut, D., Koç, M., & Ertekin, F. K. (2018). Microwave and hot air drying of garlic puree: drying kinetics and quality characteristics. *Heat and Mass Transfer*, 54(7), 2101-2112.
- Jia, Y., Khalifa, I., Hu, L., Zhu, W., Li, J., Li, K., & Li, C. (2019). Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: A comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques. *Food and Bioprocess Processing*, 118, 67-76.
- Karam, M. C., Petit, J., Zimmer, D., Djantou, E. B., & Scher, J. (2016). Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. *Journal of Food Engineering*, 188, 32-49.
- Karathanos, V. T. (1999). Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39(4), 337-344.
- Kesbi, O. M., Sadeghi, M., & Mireei, S. A. (2016).

- Quality assessment and modeling of microwave-convective drying of lemon slices. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 9(3), 216-223.
- Lahsani, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., & Jaouhari, J. (2004). Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, 61(2), 173-179.
- Łechtańska, J., Szadzińska, J., & Kowalski, S. (2015). Microwave-and infrared-assisted convective drying of green pepper: Quality and energy considerations. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 98, 155-164.
- Lee, J. H., & Kim, H. J. (2009). Vacuum drying kinetics of Asian white radish (*Raphanus sativus* L.) slices. *LWT-Food Science and Technology*, 42(1), 180-186.
- Lemus-Mondaca, R., Vega-Gálvez, A., Moraga, N. O., & Astudillo, S. (2015). Dehydration of *S tevia rebaudiana* B ertonni Leaves: Kinetics, Modeling and Energy Features. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(5), 508-520.
- Lewis, W. K. (1921). The rate of drying of solid materials. *Industrial & Engineering Chemistry*, 13(5), 427-432.
- Lv, W., Lv, H., Jin, X., Cui, Z., & Su, D. (2019). Effects of ultrasound-assisted methods on the drying processes and quality of apple slices in microwave drying. *Drying Technology*, 38(13), 1806-1816.
- Maisnam, D., Rasane, P., Dey, A., Kaur, S., & Sarma, C. (2017). Recent advances in conventional drying of foods. *Journal of Food Technology and Preservation*, 1(1).
- Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44(2), 71-78.
- Maskan, M. (2001a). Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48(2), 177-182.
- Maskan, M. (2001b). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48(2), 169-175.
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503-1513.
- Mujaffar, S., & Sankat, C. (2015). Modeling the Drying Behavior of Unsalted and Salted Catfish (*A rius* sp.) Slabs. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 1385-1398.
- Onwude, D. I., Hashim, N., & Chen, G. (2016). Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. *Trends in Food Science & Technology*, 57, 132-145.
- Page, G. E. (1949). Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin layers MS Thesis, Purdue University. Pedersen, CO, 1989.
- Sagar, V., & Kumar, P. S. (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 47(1), 15-26.
- Sharaf-Eldeen, Y. I., Blaisdell, J., & Hamdy, M. (1980). A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, 5(4), 1261-1265.
- Shen, L., Wang, L., Zheng, C., Liu, C., Zhu, Y., Liu, H., Xu, H. (2020). Continuous microwave drying of germinated brown rice: Effects of drying conditions on fissure and color and modeling of moisture content and stress inside kernel. *Drying Technology*, 1-29.
- Süfer, Ö., Sezer, S., & Demir, H. (2017). Thin layer mathematical modeling of convective, vacuum and microwave drying of intact and brined onion slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(6), e13239.
- Suna, S. (2019). Effects of hot air, microwave and vacuum drying on drying characteristics and in vitro bioaccessibility of medlar fruit leather (pestil). *Food Science and Biotechnology*, 28(5), 1465-1474.
- Torki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Pirbalouti, A. G., & Sadeghi, M. (2016). Dehydration behaviour, mathematical modelling, energy efficiency and essential oil yield of peppermint leaves undergoing microwave and hot air treatments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 407-418.
- Torrington, E., Esveld, E., Scheewe, I., van den Berg, R., & Bartels, P. (2001). Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms. *Journal of Food Engineering*, 49(2-3), 185-191.
- Verma, L. R., Bucklin, R., Endan, J., & Wratten, F. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*, 28(1), 296-301.
- Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X., & Hu, X. (2007). Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. *Journal of Food Engineering*, 80(2), 536-544.
- Yagcioglu, A. (1999). *Drying characteristic of laurel leaves under different conditions*. Paper presented at the Proceedings of the 7th International congress on agricultural mechanization and energy, 1999.
- Zhang, M., Chen, H., Mujumdar, A. S., Tang, J., Miao, S., & Wang, Y. (2017). Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(6), 1239-1255.
- Zozas, N., Maroulis, Z., & Marinou-Kouris, D. (1996). Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, 14(10), 2225-2253.