



تعیین سینتیک خشک کردن موسیر تحت یک روش پیشنهادی ترکیبی مایکروویو-هوای داغ و بررسی اثر شرایط عملیاتی بر پارامترهای رنگی آن

صفورا کریمی^۱، فاطمه بی‌باک^۲، نرگس لایقی‌نیا^۲، حبیب اله عباسی^{۱*}

۱- استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، خوزستان

۲- کارشناس ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، خوزستان

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>موسیر از جمله مهم‌ترین گیاهان بومی ایران می‌باشد که به دلیل خواص درمانی بسیاری که دارد از دیرباز در سبذ غذایی مردم جایگاه ویژه‌ای دارد. تاثیر روش پیشنهادی ترکیبی مایکروویو- هوای گرم بر سینتیک و خواص ظاهری موسیر مورد بررسی قرار گرفت. در روش پیشنهادی، پس از ایجاد امواج مایکروویو (۶۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ وات) نمونه‌ها تحت فرآیند خشک کردن ترکیبی امواج مایکروویو و هوای گرم قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مدل لگاریتمی با داشتن مقادیر $R^2=0/996$ و $RMSE=0/002$ بهترین مدل برای مدل کردن سینتیک خشک کردن برش‌های موسیر تحت روش پیشنهادی بود. به علاوه تحلیل منحنی‌های خشک شدن نشان داد که افزایش توان مایکروویو موجب کاهش مدت زمان خشک شدن و افزایش سرعت فرآیند شد و در قسمت ترکیبی نیز تاثیر توان مایکروویو به دلیل انرژی بالاتر غالب بود. نقطه‌ی بهینه‌ی عملیاتی برای دستیابی به کم‌ترین میزان رطوبت و حداقل زمان خشک کردن در شوک ۹۰۰ وات و شرایط ترکیبی ۴۵۰ وات و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد رخ داد. افزایش توان مایکروویو سبب افزایش ضریب نفوذ موثر از $0/167 \times 10^{-8}$ به $0/283 \times 10^{-8}$ متر مربع بر ثانیه و کاهش متوسط انرژی فعالسازی از ۱۷/۴۲۹ به ۲/۰۷۴ کیلوژول بر مول شد. بهینه‌ی شرایط عملیاتی از لحاظ کیفیت ظاهری (رنگ‌سنجی) مربوط به خشک کردن با توان مایکروویو ۹۰۰ وات و شرایط ترکیبی ۴۵۰ وات و ۸۰ درجه سانتیگراد بود که این نقطه به عنوان نقطه بهینه معرفی شد. در مجموع روش ترکیبی پیشنهادی نسبت به روش مایکروویو تنها، روشی موثر برای حفظ ویژگی‌های کیفی محصول بوده است و استفاده از آن در خشک کردن موسیر توصیه می‌شود.</p>	<p>تاریخ های مقاله :</p> <p>تاریخ دریافت: ۹۹/۰۵/۱۵</p> <p>تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۶/۳۱</p> <p>کلمات کلیدی:</p> <p>پارامترهای رنگ، سینتیک خشک کردن، مایکروویو- هوای داغ، موسیر.</p> <p>DOI: 10.29252/fsct.18.01.10</p> <p>* مسئول مکاتبات: habbasi@jsu.ac.ir</p>

۱- مقدمه

موسیر با نام علمی *Allium stipitatum* یکی از گیاهان معطر سرده سیر و بومی برخی از مناطق غربی، جنوبی و مرکزی ایران است. پیاز این گیاه که قسمت خوراکی آن محسوب می‌شود، منبعیغنی از ویتامین‌ها، مواد معدنی و اسیدهای چرب ضروری است که سرشار از ویتامین C، پتاسیم، فیبر، اسید فولیک، کلسیم و آهن است [۴] و از دیرباز به عنوان ادویه و چاشنی در غذاها و نوشیدنی‌های مردم ایران کاربرد داشته است. همچنین گزارشاتی از خواص درمانی این گیاه مانند خاصیت آنتی‌اکسیدانی [۵،۶]، ضد سرطانی [۷]، ضد لختگی [۸،۹]، اثرات ضدقارچی [۱۰]، اثر محافظتی در بهبود عملکرد کبد [۱۱] و تنظیم کننده سیستم ایمنی بدن [۱۲،۱۳] تا کنون منتشر شده است. علاوه بر آن، در طب سنتی ایران از پیاز این گیاه جهت درمان اختلالات روماتیسمی و التهابی، نفرس، آرتروز، اسهال، درد معده، پسوریازیس و بواسیر استفاده می‌شود. از آن جا که با پایان فصل بهار زمان برداشت موسیر پایان می‌پذیرد، خشک کردن این گیاه امکان استفاده در سایر فصول و تسهیل شرایط صادرات این گیاه را میسر می‌سازد. بنابراین، در این تحقیق فرآیند خشک کردن موسیر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت.

روش‌های متداول بسیاری برای انجام فرآیند خشک کردن وجود دارد که از آن جمله می‌توان به خشک کردن خورشیدی [۱۴]، اسمزی [۱۵]، خلاء [۱۶]، هوای گرم [۱۷] و انجمادی [۱۸] اشاره کرد. اکثر این روش‌های خشک کردن دارای زمان خشک شدن طولانی و مصرف انرژی زیادی هستند که این امر منجر به کیفیت پایین محصولات خشک شده تحت روش‌های مذکور می‌شود [۱۹]. در مطالعات اخیر پیشرفت‌های چشمگیری در استفاده از روش‌های جدید وجود داشته است که از جمله این روش‌ها می‌توان به مایکروویو [۲۰،۲۱]، کربن دی‌اکسید فوق بحرانی [۲۲]، مادون قرمز [۲۳]، اولتراسوند [۲۴] اشاره کرد که باعث افزایش راندمان فرآیند و افزایش کیفیت محصولات خشک شده نهایی خواهند شد [۱۷]. برخی از این روش‌ها می‌توانند به عنوان پیش تیمار استفاده شوند یا در ترکیب با روش‌های متداول، برای کاهش رطوبت اولیه یا تغییر ساختار بافت محصولات زراعی (به شکلی که زمان خشک شدن را کوتاه کند) مورد استفاده قرار گیرند [۲۵]. علاوه بر این، اغلب روش‌های جدید در مقایسه با روش‌های رایج خشک کردن مانند هوای گرم، محصولاتی با کیفیت بهتر تولید می‌کنند و همچنین ضمن کاهش مدت زمان فرآیند، مصرف انرژی کمتری

نیز خواهند داشت [۱۹]. در این میان استفاده از امواج مایکروویو در ترکیب با سایر روش‌ها یک روش پیشنهادی مؤثر است که در این مطالعه به آن پرداخته شد.

از جمله روش‌های ترکیبی با روش مایکروویو می‌توان به هوای گرم [۲۶]، خلاء [۲۷]، دی الکتریک [۲۸] و خشک کردن انجمادی [۲۹] اشاره کرد که هوای گرم رایج‌ترین آن‌ها است. به عبارت دقیق‌تر، به سه طریق می‌توان مایکروویو و هوای گرم را باهم ترکیب کرد. (۱) استفاده از مایکروویو در ابتدای فرآیند خشک کردن: در این روش درون نمونه به سرعت تا دمای تبخیر گرم شده و بخار از سطح خارج می‌شود سپس هوای گرم رطوبت را از سطح ماده خارج می‌کند. استفاده از این روش موجب افزایش سرعت خشک شدن و ایجاد ساختار متخلخل در نمونه‌ها می‌گردد؛ (۲) استفاده از مایکروویو هنگامی که سرعت خشک شدن روند کاهشی دارد: در این روش ابتدا سطح نمونه خشک می‌شود، اما رطوبت درون نمونه حفظ می‌شود و سپس امواج مایکروویو با تولید گرمای داخلی سبب از بین رفتن رطوبت می‌شود؛ (۳) استفاده از مایکروویو در محتوای رطوبت کم که به منظور ساده کردن مرحله آخر خشک کردن به کار می‌رود: در این روش، کوچک شدن ساختار نمونه که ناشی از خشک شدن توسط هوای گرم است، باعث کاهش سرعت فرآیند خشک شدن می‌شود. استفاده از مایکروویو در این زمان از طریق تولید جریان بخار مانع از کوچک شدن ساختار نمونه می‌گردد [۳۰]. روش ترکیبی مایکروویو و هوای گرم برای خشک کردن محصولات کشاورزی مختلف مانند هویج [۳۱]، برنج نیمه جوشیده [۳۲]، رودومیرتوس [۲۶]، لونگان [۳۳]، سبب [۳۴]، قارچ [۳۵] استفاده شده است. به طور کلی می‌توان گفت که امواج مایکروویو با به جنبش درآوردن مولکول‌های آب سبب ایجاد حرارت در ماده می‌شوند و به واسطه‌ی چگالش رطوبت سطحی، سوختگی‌هایی در سطح محصول نهایی رخ می‌دهد که از کیفیت آن می‌کاهد. حال آن که در روش ترکیبی جریان هوا موجب تبخیر شدن بخشی از رطوبت چگالش یافته در سطح نمونه شده و از افت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ی خشک شده جلوگیری می‌کند.

در پژوهشی که در سال ۲۰۱۹ توسط یانگیانگ و همکارانش انجام شد [۳۶]، تأثیر سه روش خشک کردن هوای گرم، ترکیب مایکروویو-هوای گرم و ترکیبی انجمادی-خلاء بر روی خواص حسی، بافتی، تغذیه‌ای و سایر خصوصیات کیفی چپس‌های خرما لوبو بررسی شد. آن‌ها دریافتند که بهترین کیفیت

ضریب نفوذ رطوبت، و کیفیت محصول از لحاظ پارامترهای رنگ مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آماده‌سازی نمونه

پیاز موسیر به کار گرفته شده در این پژوهش از یک بازارچه‌ی محلی در شهرستان دزفول (خوزستان، ایران) تهیه شد که بومی دامنه کوه‌های زاگرس می‌باشد. نمونه‌های تهیه شده پیش از شروع آزمایش‌ها با هدف تازه ماندن، در یک یخچال خانگیبا دمای $\pm 0/5$ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. پیش از انجام تست، نمونه‌ها ابتدا شسته و پوست گرفته شدند تا آلودگی‌های آنها حذف شوند. سپس موسیرها با ضخامت یکسانبرش داده شد، به طوری که هر نمونه وزن تقریبی $3/5$ گرم داشت. به منظور اندازه‌گیری رطوبت اولیه از روش استاندارد هوای گرم آون استفاده شد. بدین صورت که مقدار 26 گرم موسیر برش خورده به مدت 8 ساعت در آون (آون آزمایشگاهی شرکت آترا، سری ACE400L) و در دمای 110 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و پس از خروج از آون نمونه‌ها با استفاده از یک ترازوی دیجیتال با دقت $0/001$ گرم (شرکت BEL Engineering، سری S-ES) توزین شدند. در نهایت، رطوبت نمونه‌های تازه مقدار $19 \pm 0/15$ کیلوگرم آب بر مبنای کیلوگرم ماده خشک به دست آمد.

۲-۲- تجهیزات خشک کردن و روش آزمایش

در مطالعه حاضر، برای انجام آزمایشات یک دستگاه میکروویو خانگی قابل برنامه‌ریزی (سامسونگ، 2450MHz , sami14) استفاده شد که قادر به تولید امواج میکروویو در محدوده‌ی 100 تا 900 وات و همچنین ایجاد همزمان امواج میکروویو (180 تا 450 وات) و جریان هوای گرم (40 تا 200 درجه سانتی‌گراد) بود. دستگاه استفاده شده دارای یک محفظه داخلی با ابعاد $397 \times 219 \times 400$ میلی‌متر و یک صفحه دوار به قطر 380 میلی‌متر است. به منظور انجام آزمایشات، نمونه‌های برش خورده‌ی موسیر با ضخامت یکسان وزن شده و بر روی صفحه‌ی دوار دستگاه قرار گرفتند. در این پژوهش از یک روش خشک‌کردن پیشنهادی بر اساس ترکیب میکروویو-هوای گرم استفاده شده است. روش پیشنهادی به اینصورت انجام شد که ابتدا نمونه‌ها با امواج میکروویو در سه توان (750 ، 900 و 1000 وات) به مدت 5 دقیقه تحت فرآیند خشک‌کردن میکروویو قرار گرفتند و تغییرات وزن نمونه در

رنگ مربوط به دو روش ترکیبی میکروویو-هوای گرم و انجمادی-خلاء بوده است. علاوه بر این، روش میکروویو-هوای گرم توانست عطر و طعم منحصر به فرد خرمالو را بهتر حفظ کرده و از لحاظ حسی با ویژگی‌های روش انجمادی-خلاء امتیاز برابری دریافت کند. در نهایت از میان روش‌های بررسی شده، آن‌ها روش میکروویو-هوای گرم را به عنوان بهترین روش معرفی کردند، چرا که در کنار دستیابی به ویژگی‌های بافتی، حسی و تغذیه‌ای بهتر مصرف انرژی کمتری نیز داشت.

در مطالعه اخیر، عباسی و همکاران (۱۳۹۹) خشک‌کردن موسیر تحت امواج میکروویو را مورد بررسی قرار دادند. آنها از برازش داده‌های آزمایشگاهی خود به 10 مدل رایج مورد استفاده برای پیش‌بینی سینتیک خشک‌کردن مواد غذایی دریافتند که مدل دوجمله‌ای بهتر از سایر مدل‌ها سینتیک خشک‌کردن موسیر به روش میکروویو (در محدوده توان 450 تا 900 وات) را پیش‌بینی می‌کند. نتایج حاصل از آزمایشات آنها نشان داد که با افزایش توان میکروویو، زمان خشک شدن کاهش و سرعت خشک‌شدن نیز افزایش یافت. کمترین زمان خشک‌کردن مربوط به توان میکروویو 900 وات به دست آمد، که در آن زمان خشک‌شدن 18 دقیقه بود که در مقایسه با زمان خشک‌کردن به روش هوای گرم که در مدت زمان 400 دقیقه انجام شد، کاهش $95/5$ درصد به دست آمد. نتایج آنها همچنین نشان داد که با افزایش توان میکروویو ضریب نفوذ رطوبت افزایش و انرژی فعالسازی موسیر کاهش یافت. در این پژوهش، پارامترهای رنگ موسیر نیز مورد بررسی قرار گرفت و بهترین توان از لحاظ تغییر رنگ کل، توان 450 وات و از نظر شاخص قهوه‌ای شدن، توان 900 وات گزارش شده است.

بررسی‌های انجام شده نشان داد که تاکنون هیچ مطالعه‌ای بر روی خشک‌کردن موسیر تحت روش ترکیبی میکروویو و هوای داغ انجام نشده است. بنابراین، با توجه به خلا مطالعاتی در زمینه خشک‌کردن موسیر و همچنین جایگاه ویژه این محصول در سبد غذایی مردم ایران، در مطالعه‌ی حاضر، برش‌های موسیر تحت یک روش پیشنهادی که به صورت ترکیبی از ماکروویو و هوای داغ است خشک‌شدند. بدین صورت که ابتدا نمونه‌ها تحت امواج میکروویو قرار گرفتند و پس از گذشت مدت زمان کوتاهی فرایند با ترکیبی از هوای داغ و امواج میکروویو تا خشک شدن کامل موسیرها ادامه یافت. همچنین، علاوه بر تعیین سینتیک فرآیند تحت روش مذکور، اثر پارامترهای دما و توان میکروویو بر زمان، سرعت،

می‌گیرند، همچنین شامل مدل‌های نیمه نظری و تجربی است که در این مدل‌ها فقط مقاومت خارجی در نظر گرفته می‌شود. مدل‌های نظری به فرضیات هندسی، ضریب نفوذ و هدایت گرمی یک نمونه نیاز دارند. مدل‌های تجربی فرضیات اولیه فرآیند خشک کردن را نادیده گرفته و با استفاده از تحلیل رگرسیون رابطه مستقیمی بین میانگین رطوبت و زمان خشک شدن را نشان می‌دهند. مدل‌های نیمه نظری نیز ترکیبی از دو مدل نظری و تجربی است که ساده سازی شده‌ی قانون دوم انتشار و یا مدل فیک اصلاح شده است که به طور گسترده‌ای از آن استفاده می‌شود [37].

به منظور یافتن بهترین مدل ریاضی سینتیک خشک کردن برش‌های موسیر تحت روش ترکیبی حاضر، داده‌های تجربی به دست آمده از آزمایشات در شرایط عملیاتی مختلف به 10 مدل خشک کردن لایه نازک متداول که در جدول 1 آورده شده است برازش شد و نتایج بررسی شدند.

فواصل زمانی معین (30 ثانیه) ثبت شد. سپس، خشک کردن به صورت ترکیبی از امواج مایکروویو (در سه سطح 300، 180 و 450 وات) و هوای گرم (سه سطح 80، 70 و 90 درجه سانتیگراد) تکمیل شد. خشک کردن برش‌های موسیر تا نزدیک شدن میزان رطوبت نسبی نمونه‌ها به حدود 0/1 ادامه یافت. هوای گرم دمیده شده بر روی نمونه‌ها دارای سرعت 2/5m/s بود. برای اطمینان از صحت نتایج، هر آزمایش سه بار در شرایط کاملاً یکسان تکرار شد و میانگین داده‌های به دست آمده در نظر گرفته شد.

2-3- مدل سازی ریاضی سینتیک خشک کردن

خشک کردن لایه نازک فرآیندی است که در یک لایه از ذرات نمونه یا در یک برش از نمونه اتفاق می‌افتد. در حال حاضر، سه نوع مدل خشک کردن لایه نازک وجود دارد که برای توصیف پدیده خشک کردن محصولات کشاورزی استفاده می‌شود. این مدل‌ها شامل مدل‌های نظری است که تنها مقاومت داخلی در برابر انتقال رطوبت بین محصول و هوای گرم را در نظر

Table 1 Commonly used mathematical models to describe drying kinetics.

Model No.	Model name	Model equation	Refrence
1	Newton (Lewis)	$M R = \exp(-k t)$	[38]
2	Henderson and Pabis	$M R = a \exp(-k t)$	[39]
3	Page	$M R = \exp(-k t^n)$	[40]
4	Modified page	$M R = \exp((-k t)^n)$	[41]
5	Logarithmic	$M R = a \exp(-k t) + c$	[42]
6	Two term exponential	$M R = a \exp(-k t) + (l - a) \exp(-k a t)$	[43]
7	Verma et al.	$M R = a \exp(-k t) + (l - a) \exp(-g t)$	[44]
8	Wang and Singh	$M R = a + b t + c t^2$	[45]
9	Modified Henderson and Pabis	$M R = a \exp(-k t) + b \exp(-g t) + c \exp(-h t)$	[46]
10	Midilli et al.	$M R = a \exp(-k t^n) + b t$	[47]

(2)
$$MR = \frac{M_t}{M_0}$$
 نرخ خشک شدن (DR) همان میزان رطوبت آزاد شده از سطح ماده خشک شده در واحد زمان می‌باشد که نشان دهنده میزان تبخیر رطوبت از نمونه است. این پارامتر نیز از طریق رابطه‌ی (3) محاسبه شد.

(3)
$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t}$$
 که M_t ، $M_{t+\Delta t}$ و Δt به ترتیب میزان رطوبت در زمان $t + \Delta t$ (g water/g dry matter)، میزان رطوبت در زمان t

رطوبت نسبی بدون بعد در طی فرآیند خشک کردن محصول در هر زمان با استفاده از معادله (1) محاسبه شد [48].

(1)
$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$
 که در آن M_0 و M_e ، M_t به ترتیب نشان دهنده‌ی مقادیر رطوبت نمونه در زمان t ، رطوبت تعادلی و رطوبت اولیه بر مبنای ماده‌ی خشک (g water/g dry matter) می‌باشند. با در نظر گرفتن زمان طولانی در فرآیند خشک کردن، بنابراین در مدت طولانی مقدار M_e بسیار کمتر از M_0 خواهد بود. از اینرو معادله‌ی (1) را میتوان به صورت معادله‌ی (2) خلاصه کرد [49].

بر اساس این فرض که در فرآیند خشک کردن موسیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ثابت است و با حل تحلیلی قانون ناپایای دوم فیک، معادله زیر به منظور به دست آوردن ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به دست آمد [۴۸]:

$$(۸) \quad MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{L^2}\right)$$

که در معادله‌ی بالا D_{eff} بیانگر مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (متر مربع بر ثانیه)، L نشانگر نیمی از ضخامت نمونه (متر) که میانگین آن در مطالعه حاضر 3×10^{-3} متر بوده و t زمان می‌باشد. بیان این نکته ضروری است که برای زمان‌های طولانی خشک کردن ($MR < 0.1$) به دلیل ناچیز شدن مقدار عددی سایر جملات سری در مقابل جمله‌ی اول، از آنها صرف نظر می‌کنیم و با در نظر گرفتن جمله اول معادله، فرم لگاریتمی ساده‌سازی شده معادله بالا به صورت زیر نوشته می‌شود [۵۲]:

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

مطابق رابطه‌ی مذکور ضریب نفوذ مؤثر رطوبت را می‌توان با رسم $\ln(MR)$ بر حسب زمان و محاسبه‌ی شیب خط حاصله، به دست آورد به طوری که:

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

۲-۵- تعیین میزان انرژی فعالساز

انرژی فعالساز (E_a)، انرژی مورد نیاز برای شروع حرکت رطوبت از مناطق داخلی ماده‌ی در حال خشک شدن می‌باشد. به طور کلی انرژی فعالساز محصولات خشک شده با استفاده از معادله آرنیوس به صورت معادله زیر تعیین می‌شود [۵۳]:

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

که در رابطه فوق T دمای مطلق (کلوین)، R ثابت گاز ایده‌آل بوده و برابر 8.314×10^{-3} (کیلوژول بر مول بر کلوین) و D_0 ثابت پیش‌نمایی معادله آرنیوس (متر مربع بر ثانیه) است. مقادیر انرژی فعالساز برش‌های موسیر خشک شده براساس مقادیر $\ln(D_{eff})$ بر حسب دمای مطلق (کلوین) و بر اساس شیب خط مستقیم محاسبه شد.

۲-۶- رنگ سنجی

ویژگی رنگ محصولات خشک شده پارامتری مهم و اثر گذار بر کیفیت محصول نهایی و مقبولیت مصرف کننده دارد که حتی که قبل از چشیدن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۵۴]. در اغلب مطالعات صنایع غذایی جهت بررسی پارامتر رنگ از مدل Lab یا $a^*b^*L^*$ استفاده می‌شود. در این مدل L^* مولفه‌ی روشنایی می‌باشد که از $L=0$ برای سیاه تا $L=100$ برای سفید

(g water/g dry matter) و Δt مدت زمان خشک شدن (دقیقه) است.

با هدف یافتن بهترین مدل تجربی برای توصیف روند خشک کردن برش‌های موسیر به روش پیشنهادی ترکیبی مایکروویو-هوای گرم مدل‌های ریاضی لایه نازک ارائه شده در (جدول ۱) مورد بررسی قرار گرفتند. از نرم افزار Sigma Plot (version 12.3, Systat Software, Inc.) برای برازش داده‌های آزمایشگاهی و پیشنهاد مدل تجربی مناسب استفاده شد. علاوه بر این، روش تحلیل رگرسیون خطی و غیرخطی برای ارزیابی هر مدل انجام شد. ضریب همبستگی (R^2) و مجذور میانگین مربعات خطا ($RSME$) دو روشی است که در این پژوهش استفاده شدند. بهترین مدل بر اساس حداکثر مقدار R^2 (نزدیک به یک) و حداقل $RSME$ (نزدیک به صفر) تعیین خواهد شد. پارامترهای ذکر شده را می‌توان با معادلات زیر محاسبه کرد [۵۰]:

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

که در آن مقدار MR_m عبارت است از:

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

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

مقادیر $MR_{exp,i}$ نشان دهنده‌ی رطوبت نسبی تجربی است که در هر آزمایش به دست می‌آید. $MR_{pred,i}$ رطوبت نسبی پیش‌بینی شده، MR_m میانگین مقدار رطوبت نسبی و N تعداد کل داده‌های آزمایشگاهی است.

۲-۴- تخمین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

به طور کلی فرض بر این است که در مدل سازی فرآیند خشک کردن در بازه‌ی نزولی نرخ سرعت، عامل اصلی انتقال رطوبت اختلاف غلظت مایع است. علاوه بر این فرض می‌شود که ضریب انتشار رطوبت در همه جهات یکسان است (ماده ایزوتروپیک) و چروکیدگی نمونه ناچیز است. در این شرایط، انتقال رطوبت از جامد در دوره نزولی نرخ را می‌توان با قانون ناپایایدومفیک توصیف کرد که به صورت زیر تعریف می‌شود [۵۱]:

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

سوختگی‌هایی است که در روش مایکروویو در سطح محصول نهایی ایجاد خواهد شد. به علاوه به منظور اینکه محصول نهایی خواص کیفی بهتری داشته باشد، در قسمت پایانی این فرآیند، امواج مایکروویو با توان پایین‌تر به کار گرفته شد. آنالیز آماری داده‌های زمان خشک شدن نشان داد که در یک دمای مشخص، توان مایکروویو اثر معنی‌داری ($P < 0.05$) بر زمان خشک کردن در روش پیشنهادی داشت. در یک دمای مشخص، با افزایش توان بخش ترکیبی در روش پیشنهادی، زمان خشک شدن کاهش یافت که این امر در شکل ۱ نیز قابل مشاهده است. علاوه بر این، به منظور مقایسه بهتر نتایج کیفی، نمونه‌های موسیر تحت روش مایکروویو در سه توان ۶۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ وات نیز خشک شدند و به عنوان نمونه کنترلی مورد بررسی قرار گرفتند. همان‌طور که اشاره شد منحنی خشک کردن نمونه موسیر تحت توان ۹۰۰ وات برای مقایسه بهتر در شکل ۱ رسم شده است.

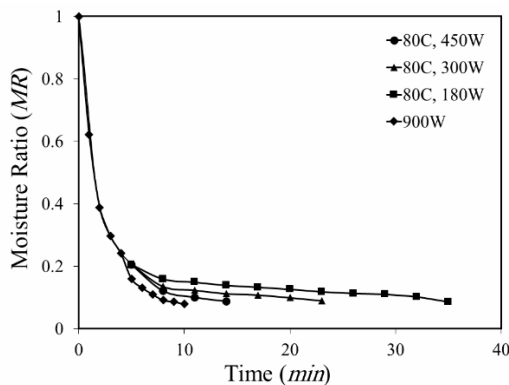


Fig 1 Drying curves of *Allium stipitatum* under proposed method at initial microwave power of 900W and combined hot air temperature 80°C at different level of microwave power.

در فرآیند خشک کردن به روش مایکروویو و فرکانس چرخشی بالای مولکول‌های دوقطبی اصلی‌ترین مکانیسم حاکم برای تولید گرما است و نمونه به صورت حجمی گرم خواهد شد. برای میوه‌ها و سبزیجات حاوی رطوبت زیاد، آب بخش عمده‌ای از عنصر دی‌الکتریک را تشکیل می‌دهد که واکنش آنها به انرژی مایکروویو بسیار شدید است. این محصولات تا زمانی که رطوبت باقیمانده باشد، می‌توانند انرژی را به سرعت جذب کنند. در نتیجه استفاده از امواج مایکروویو برای حذف رطوبت باعث جذب انرژی متناسب با میزان رطوبت باقیمانده شده و در زمان بسیار کوتاهی نتیجه‌ای مطلوب در پی خواهد داشت [۵۳]. انتقال جرم و گرما در نمونه‌ها در توان مایکروویو و بالاتر (در قسمت ترکیبی مایکروویو- هوای گرم) سریعتر است. در واقع توان بالاتر هم انرژی جنبشی و هم انرژی جذب

متغیر می‌باشد. همچنین دامنه‌ی تغییرات دو پارامتر a^* و b^* به صورت $-a$ برای رنگ سبز، $+a$ برای رنگ قرمز، $-b$ برای رنگ آبی و $+b$ برای رنگ زرد است. در این تحقیق رنگ‌سنجی به روش ذکر شده توسط کسبی و همکاران [۵۵] انجام شد. برای بررسی تأثیر روش خشک کردن ترکیبی مایکروویو-هوای گرم بر روی رنگ برش‌های موسیر، در هر تست، تصویر نمونه‌ها قبل و بعد از فرآیند خشک کردن با استفاده از دوربین (SX 540 Hs. Canon)، و کیفیت ۲۰/۴ مگاپیکسل) ثبت شده و تصاویر به دست آمده با استفاده از نرم افزار ImageJ (version 1.52p) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. جزئیات روش مذکور نیز توسط نویسندگان در مقاله‌ی عباسی و همکاران [۵۶] آورده شده است.

۲-۷- تحلیل آماری

در مطالعه حاضر، تمام آزمایشات سه بار تکرار شد و میانگین داده‌ها گزارش شد. به منظور بررسی وجود یا عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین داده‌های به دست آمده، از نرم افزار Minitab v.19 (USA, State College, Minitab) (One Way ANOVA) استفاده شد. به منظور مقایسه میانگین پارامترهای کمی و کیفی نیز از آزمون توکی (Tukey) با سطح اطمینان ۵٪ استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- سینتیک خشک کردن

داده‌های تجربی حاصل از فرآیند خشک کردن برش‌های موسیر به رطوبت نسبی (MR) تبدیل شدند. منحنی‌های رطوبت نسبی در مقابل زمان خشک شدن نمونه‌ها تحت روش پیشنهادی در شکل ۱ ترسیم شد. به علاوه منحنی رطوبت نسبی حاصل از نمونه‌ی خشک شده در توان ۹۰۰ وات به عنوان منحنی کنترلی نیز رسم شده است. مطابق شکل ۱، در روش پیشنهادی ابتدا فرآیند خشک کردن با امواج مایکروویو تا مدت زمان ۵ دقیقه انجام شد، سپس تا انتهای فرآیند خشک کردن و رسیدن به رطوبت نسبی حدود ۰/۱ از ترکیب مایکروویو- هوای داغ استفاده شد. منحنی مذکور برای توان ۹۰۰ وات رسم شده است. در قسمت ترکیبی دمای ثابت ۸۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد و تغییرات توان (۱۸۰، ۳۰۰، و ۴۵۰ وات) مورد ارزیابی قرار گرفت، چرا که هدف اصلی این پژوهش انجام فرآیند خشک کردن به روش مایکروویو می‌باشد و استفاده از هوای گرم در ادامه این روند به جهت جلوگیری از

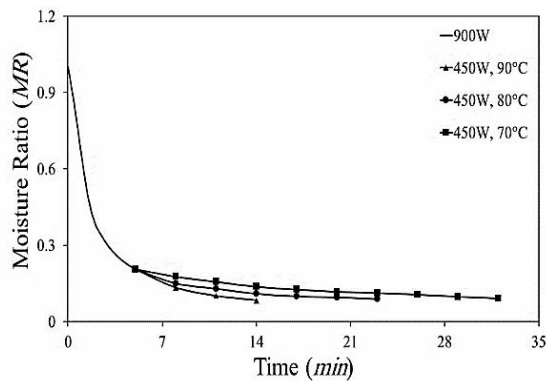


Fig 2 Drying curves of *Allium stipitatum* under proposed method at initial microwave power of 900W and combined microwave power of 450W at different level of temperature.

لازم به ذکر است که در فرآیند خشک کردن سایر نمونه‌ها برای شوک‌های اولیه‌ی ۷۵۰ و ۶۰۰ وات در شرایط عملیاتی متفاوت نیز روند مشابهی هم به جهت تاثیر توان مایکروویو و هم به لحاظ دمای جریان هوای گرم مشاهده شد. با بررسی رطوبت‌های نسبی حاصل در شرایط عملیاتی مختلف می‌توان گفت که نقطه بهینه شرایط خشک‌کردن از لحاظ زمان، در توان ۹۰۰ وات و شرایط ترکیبی ۴۵۰ وات و ۸۰ درجه سانتیگراد رخ داد که در مدت زمان ۱۵ دقیقه مقدار MR به ۰/۰۹۸ کاهش یافت.

شکل ۳ تغییرات سرعت خشک شدن (g water/g dry matter \times min) برحسب مقدار رطوبت برش‌های موسیر در توان ۹۰۰ وات و دمای ترکیبی ثابت ۸۰ درجه سانتی‌گراد برای سطوح مختلف توان ترکیبی را نشان می‌دهد که برای سایر شرایط عملیاتی نیز روند مشابهی بدست آمد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، دو دوره‌ی متفاوت در منحنی‌های سرعت خشک کردن وجود دارد که شامل یک دوره با شتاب بالا است که مربوط به توان اولیه مایکروویو بوده و در آغاز فرآیند خشک‌شدن رخ می‌دهد و مشابه روندی است که عباسی و همکاران [۵۶] در دقایق اولیه‌ی خشک‌کردن موسیر با امواج مایکروویو مشاهده کردند. به دنبال آن در قسمت ترکیبی که توان مایکروویو کم‌تر بوده و جریان هوا موجب تبخیر شدن بخشی از رطوبت چگالش یافته در سطح نمونه شد، سرعت کم‌تری در طول نمودار مشاهده شد. در بازه‌ی نزولی سرعت، حرکت رطوبت در نمونه‌ها با پدیده‌ی نفوذ مولکولی که مکانیسم فیزیکی غالب این بازه می‌باشد تعیین خواهد شد. ژنگ و همکارانش [۶۱] گزارش کردند که طی فرآیند خشک‌کردن، کاهش رطوبت در تمام محصولات بیولوژیکی تقریباً در دوره نزولی رخ داده است. به عبارتی در این دوره آب

شده را افزایش داده و باعث ایجاد اختلاف فشار بخار بیشتر بین مرکز و سطح نمونه‌ها شده و در نتیجه سبب افزایش سرعت حذف رطوبت خواهد شد [۵۷]. در پژوهشی مشابه که عزیزی‌نژاد و حسینی [۵۰] بر روی خشک کردن سیب‌زمینی با استفاده از امواج مایکروویو انجام دادند بیان شد که رطوبت زیاد نمونه‌ها باعث ایجاد اصطکاک زیاد در برابر چرخش دوقطبی شده و گرمای زیادی در داخل برش‌های سیب‌زمینی ایجاد شده است. این پدیده سبب حرکت سریع بخارگردیده و در نهایت آب به سمت سطح برش‌ها پخش شده است. به طور مشابه محققان دیگری نیز تاثیر افزایش توان مایکروویو بر کاهش مدت زمان خشک شدن محصولات کشاورزی را گزارش کردند که از آن جمله می‌توان به امیری چایجان و همکارانش در خشک کردن میوه زالزالک [۵۷]، تورکی-هارگگانی و همکارانش برای برگ‌های نعناع، [۵۸] و اولیانپکون و همکارانش برای میوه‌ی آناناس [۵۹] اشاره کرد. به طور کلی می‌توان گفت که زمان لازم برای خشک کردن محصولات کشاورزی به چندین عامل از جمله رطوبت اولیه و نهایی محصول، خصوصیات ذاتی آن، روش و شرایط خشک کردن بستگی دارد [۵۸].

به منظور بررسی تاثیر دمای جریان هوای گرم در قسمت ترکیبی فرآیند خشک کردن، منحنی تغییرات رطوبت نسبی برش‌های موسیر بر حسب زمان برای توان اولیه ۹۰۰ وات در شکل ۲ رسم شد. در قسمت ترکیبی توان ثابت ۴۵۰ وات و تغییرات دمای هوای گرم (۷۰، ۸۰، و ۹۰ درجه سانتیگراد) منظور گردید. آنالیز آماری داده‌های زمان خشک‌شدن نشان داد که در توان پایین (۱۸۰ وات)، دما نیز اثر معنی‌داری ($P < 0.05$) بر روی زمان خشک‌شدن داشت و با افزایش دما، زمان خشک‌شدن به طور معنی‌داری کاهش یافت. این امر به دلیل طولانی‌تر بودن زمان خشک‌شدن در توان‌های پایین‌تر است. علاوه بر این، بر اساس نتایج تحلیل آماری، در توان بالاتر (۳۰۰ و ۴۵۰ وات)، به علت کوتاه بودن زمان خشک شدن نسبت به توان ۱۸۰ وات، دما اثر معنی‌داری بر روی زمان خشک‌شدن نداشت. به طور کلی می‌توان گفت که در قسمت ترکیبی، توان مایکروویو به دلیل دارا بودن انرژی بالاتر، غالب خواهد بود. در فرآیند خشک‌کردن برش‌های سیب به روش ترکیبی مایکروویو- هوای گرم نیز ارهانه‌روز و همکارانش [۶۰] به نتایج مشابهی دست یافتند و امواج مایکروویو را غالب بر دمای جریان هوای گرم عنوان کردند.

می تواند بهتر مقدار MR را در شرایط عملیاتی مختلف تخمین بزند.

$$MR = a \exp(-kt) + c \quad (17)$$

مقادیر ثوابت معادله ی فوق در شرایط بهینه ی زمانی به صورت زیر به دست آمد.

$$MR = 0.935 \exp(-0.412t) + 0.064 \quad (18)$$

منحنی خشک کردن تجربی و منحنی پیش بینی شده با استفاده از مدل لگاریتمی در شکل (۴) رسم شد. همچنین منحنی داده های تجربی و پیش بینی شده با مدل لگاریتمی توان ۹۰۰ وات به عنوان منحنی کنترلی به شکل افزوده شد. مقدار R^2 برازش داده ها آن برابر ۰/۹۹۶ بود که این مساله مناسب بودن مدل انتخابی را برای پیش بینی درست داده ها تایید می کند.

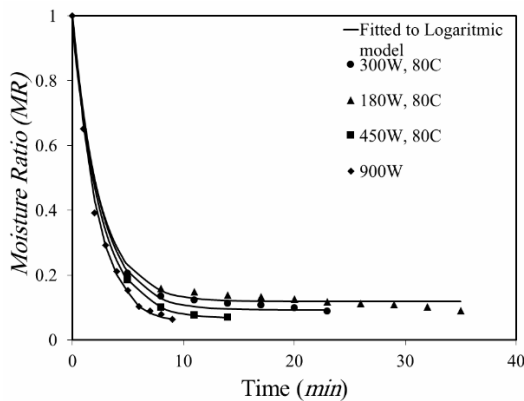


Fig 4 Experimental moisture ratio data and predicted values by Logarithmic model under proposed method at initial microwave power of 900W and combined hot air temperature 80°C at different level of microwave power.

۳-۳- ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

نمودار مقادیر تجربی $Ln(MR)$ نمونه ها بر حسب $Ln(t)$ رسم شد و با استفاده از معادلات (۹) و (۱۰) ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (D_{eff}) برش های موسیر محاسبه شد. به طور کلی مقادیر D_{eff} به دست آمده برای تمامی نمونه ها در محدوده ای که زوگراس و همکارانش [۶۳] برای ضریب نفوذ رطوبت مواد غذایی معرفی کرده بودند ($10^{-11} - 10^{-6} m^2/s$) مطابقت داشت. به عنوان نمونه داده های به دست آمده از برازش منحنی های D_{eff} برای توان ۹۰۰ وات در دماها و توان های ترکیبی مختلف در روش پیشنهادی در شکل ۵ ارایه شده است. تجزیه و تحلیل آماری داده های نفوذ پذیری نشان داد که در یک دمای مشخص، توان مایکروویو در روش پیشنهادی اثر معنی داری ($P < 0.05$) بر ضریب نفوذ رطوبت داشت.

از نقاطی با رطوبت بیش تر به نقاطی با میزان رطوبت کم تر حرکت کرده و انتقال آب از درون نمونه به سطح محصول با انتشار مولکولی کنترل خواهد شد [۶۲]. در روش خشک کردن مایکروویو رطوبت محصول عامل اصلی تعیین کننده میزان جذب انرژی است و از آنجا که میزان رطوبت برش های موسیر در شروع فرآیند بسیار زیاد بود، انرژی بیشتری توسط آب در سطح محصول جذب شد و در نتیجه دمای نمونه افزایش یافت و سرعت خشک شدن زیاد بود. در ادامه رطوبت محصول کاهش یافت و به تبع آن میزان انرژی جذب شده نیز کاهش یافت. همچنین با خشک شدن سطح محصول، نفوذ گرما در داخل نمونه ها از طریق لایه خشک شده کاهش پیدا کرد. این پدیده ها منجر به جذب کمتر انرژی و کاهش میزان افت رطوبت شد. به طور کلی در یک دمای ثابت با افزایش توان امواج مایکروویو سرعت خشک شدن بالاتری رخ داد.

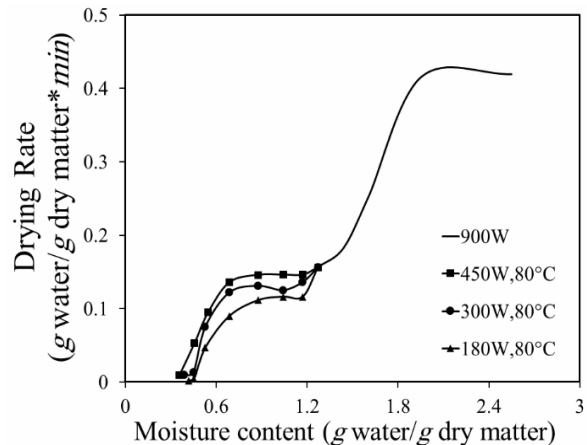


Fig 3 Drying rates of *Allium stipitatum* under proposed method at initial microwave power of 900W and combined hot air temperature 80°C at different level of microwave power.

۳-۲- ارزیابی مدل های ریاضی لایه نازک

تمام داده های MR تجربی به ۱۰ مدل ریاضی مختلف خشک کردن لایه نازک موجود در جدول ۱ برازش شدند و نتایج حاصل برای توان ۹۰۰ وات به عنوان نمونه در جدول ۲ گزارش شده است. بر اساس مقادیر دو پارامتر R^2 و $RMSE$ توانایی هریک از معادلات در برازش داده های فرآیند خشک کردن ارزش گذاری شد. بدین صورت که نزدیک ترین مقدار R^2 به ۱ و $RMSE$ به صفر بهترین معادله را تعیین خواهد کرد. بر اساس نتایج به دست آمده در جدول ۲ می توان گفت که مدل لگاریتمی (مدل شماره ۵) نسبت به سایر مدل ها

Table 2 Model constants and standard deviations of thin layer drying models of *Allium stipitatum* under proposed method at a initial microwave power of 900W and different combined conditions.

Number of Model										Oparation Condition
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
R ² = 0.965 RMSE= 0.04 a= 1.019 k= 0.416 n= 0.825 b= 0.005	R ² = 0.805 RMSE= 0.12 a= 1.395 k= 0.302 b= 0.631 g= -0.579 c= -0.436 h= 0.302	R ² = 0.625 RMSE= 0.15 a= 0.604 b= -0.043 c= 0.001	R ² = 0.782 RMSE= 0.12 a= -81.06 k= 0.302 l= 0.958 g= 0.302	R ² = 0.799 RMSE= 0.11 a= 0.338 k= 0.580 l= 0.948	R ² = 0.988 RMSE= 0.02 a= 0.857 k= 0.472 c= 0.155	R ² = 0.780 RMSE= 0.11 k= 0.321 n= 1.00	R ² = 0.880 RMSE= 0.08 k= 0.549 n= 0.431	R ² = 0.782 RMSE= 0.11 k= 0.302 a= 0.958	R ² = 0.780 RMSE= 0.115 k= 0.321	180W 70°C
R ² = 0.981 RMSE= 0.03 a= 1.008 k= 0.387 n= 0.888 b= 0.004	R ² = 0.994 RMSE= 0.02 a= 2.20 k= 0.286 b= 0.317 g= 0.033 c= -1.521 h= 0.191	R ² = 0.707 RMSE= 0.15 a= 0.643 b= -0.058 c= 0.001	R ² = 0.902 RMSE= 0.08 a= -27.15 k= 0.309 l= 0.965 g= 0.309	R ² = 0.902 RMSE= 0.08 a= 1.0 k= 0.309 l= 0.965	R ² = 0.991 RMSE= 0.02 a= 0.887 k= 0.428 c= 0.117	R ² = 0.901 RMSE= 0.08 k= 0.324 n= 1.00	R ² = 0.929 RMSE= 0.07 k= 0.485 n= 0.576	R ² = 0.902 RMSE= 0.08 k= 0.309 a= 0.965	R ² = 0.901 RMSE= 0.08 k= 0.324	180W 80°C
R ² = 0.983 RMSE= 0.03 a= 0.999 k= 0.370 n= 0.950 b= 0.006	R ² = 0.993 RMSE= 0.02 a= 24.24 k= 0.183 b= 18.46 g= 0.13 c= -41.71 h= 0.156	R ² = 0.756 RMSE= 0.14 a= 0.710 b= -0.086 c= 0.002	R ² = 0.899 RMSE= 0.09 a= -872.05 k= -0.353 l= -0.970 g= 0.353	R ² = 0.90 RMSE= 0.09 a= 1.00 k= 0.306 l= 0.963	R ² = 0.989 RMSE= 0.02 a= 0.876 k= 0.444 c= 0.132	R ² = 0.898 RMSE= 0.08 k= 0.323 n= 1.00	R ² = 0.929 RMSE= 0.07 k= 0.466 n= 0.614	R ² = 0.90 RMSE= 0.08 k= 0.306 a= 0.963	R ² = 0.898 RMSE= 0.08 k= 0.323	180W 90°C
R ² = 0.969 RMSE= 0.04 a= 1.018 k= 0.413 n= 0.827 b= 0.004	R ² = 0.857 RMSE= 0.10 a= 1.397 k= 0.306 b= 0.510 g= -0.478 c= -0.436 h= 0.310	R ² = 0.650 RMSE= 0.15 a= 0.606 b= -0.044 c= 0.001	R ² = 0.840 RMSE= 0.10 a= 9.334 k= 0.305 l= 0.961 g= 0.305	R ² = 0.854 RMSE= 0.10 a= 0.345 k= 0.585 l= 0.957	R ² = 0.989 RMSE= 0.02 a= 0.872 k= 0.449 c= 0.136	R ² = 0.838 RMSE= 0.10 k= 0.322 n= 1.00	R ² = 0.902 RMSE= 0.08 k= 0.530 n= 0.474	R ² = 0.840 RMSE= 0.10 k= 0.304 a= 0.961	R ² = 0.838 RMSE= 0.10 k= 0.322	300W 70°C
R ² = 0.989 RMSE= 0.03 a= 1.001 k= 0.366 n= 0.930 b= 0.003	R ² = 0.991 RMSE= 0.02 a= 3.01 k= 0.256 b= 0.391 g= 0.053 c= -2.411 h= 0.189	R ² = 0.743 RMSE= 0.14 a= 0.650 b= -0.061 c= 0.001	R ² = 0.956 RMSE= 0.06 a= -156.99 k= 0.329 l= 0.975 g= 0.329	R ² = 0.961 RMSE= 0.05 a= 0.392 k= 0.563 l= 0.983	R ² = 0.994 RMSE= 0.02 a= 0.918 k= 0.393 c= 0.081	R ² = 0.955 RMSE= 0.06 k= 0.328 n= 1.00	R ² = 0.961 RMSE= 0.05 k= 0.412 n= 0.766	R ² = 0.956 RMSE= 0.05 k= 0.317 a= 0.974	R ² = 0.955 RMSE= 0.05 k= 0.328	300W 80°C
R ² = 0.987 RMSE= 0.03 a= 0.998 k= 0.364 n= 0.953 b= 0.005	R ² = 0.989 RMSE= 0.02 a= 35.309 k= 0.183 b= 28.65 g= 0.141 c= -62.966 h= 0.161	R ² = 0.782 RMSE= 0.13 a= 0.716 b= -0.089 c= 0.002	R ² = 0.938 RMSE= 0.07 a= -3.73 k= 0.311 l= 0.968 g= 0.311	R ² = 0.9389 RMSE= 0.072 a= 1.000 k= 0.3119 l= 0.9686	R ² = 0.992 RMSE= 0.02 a= 0.897 k= 0.407 c= 0.106	R ² = 0.937 RMSE= 0.07 k= 0.325 n= 1.00	R ² = 0.951 RMSE= 0.06 k= 0.433 n= 0.704	R ² = 0.938 RMSE= 0.07 k= 0.968 a= 0.311	R ² = 0.937 RMSE= 0.06 k= 0.325	300W 90°C
R ² = 0.982 RMSE= 0.03 a= 1.010 k= 0.390 n= 0.873 b= 0.003	R ² = 0.947 RMSE= 0.06 a= 1.401 k= 0.3131 b= 0.004 g= -0.1392 c= -0.4324 h= 0.3124	R ² = 0.6983 RMSE= 0.15 a= 0.614 b= -0.048 c= 0.001	R ² = 0.922 RMSE= 0.08 a= -29.97 k= 0.313 l= 0.969 g= 0.313	R ² = 0.930 RMSE= 0.07 a= 0.369 k= 0.581 l= 0.975	R ² = 0.992 RMSE= 0.02 a= 0.902 k= 0.410 c= 0.10	R ² = 0.921 RMSE= 0.07 k= 0.325 n= 1.00	R ² = 0.938 RMSE= 0.06 k= 0.475 n= 0.603	R ² = 0.922 RMSE= 0.07 k= 0.312 a= 0.969	R ² = 0.921 RMSE= 0.07 k= 0.325	450W 70°C
R ² = 0.992 RMSE= 0.02 a= 0.997 k= 0.357 n= 0.950 b= 0.002	R ² = 0.996 RMSE= 0.01 a= 2.934 k= 0.250 b= 0.494 g= 0.069 c= -2.43 h= 0.179	R ² = 0.761 RMSE= 0.14 a= 0.653 b= -0.064 c= 0.001	R ² = 0.974 RMSE= 0.04 a= -179.20 k= 0.334 l= 0.978 g= 0.334	R ² = 0.977 RMSE= 0.04 a= 0.422 k= 0.535 l= 0.988	R ² = 0.996 RMSE= 0.02 a= 0.935 k= 0.412 c= 0.064	R ² = 0.974 RMSE= 0.04 k= 0.331 n= 1.00	R ² = 0.977 RMSE= 0.04 k= 0.382 n= 0.855	R ² = 0.974 RMSE= 0.04 k= 0.321 a= 0.977	R ² = 0.974 RMSE= 0.04 k= 0.331	450W 80°C
R ² = 0.992 RMSE= 0.02 a= 0.995 k= 0.354 n= 0.964 b= 0.003	R ² = 0.990 RMSE= 0.02 a= 17.80 k= 0.196 b= 12.15 g= 0.140 c= -28.97 h= 0.168	R ² = 0.817 RMSE= 0.13 a= 0.725 b= -0.094 c= 0.003	R ² = 0.971 RMSE= 0.05 a= 745.78 k= 0.364 l= 0.977 g= 0.364	R ² = 0.976 RMSE= 0.04 a= 0.40 k= 0.558 l= 0.986	R ² = 0.994 RMSE= 0.02 a= 0.924 k= 0.385 c= 0.073	R ² = 0.971 RMSE= 0.05 k= 0.329 n= 1.00	R ² = 0.976 RMSE= 0.04 k= 0.390 n= 0.829	R ² = 0.972 RMSE= 0.04 k= 0.318 a= 0.974	R ² = 0.971 RMSE= 0.04 k= 0.329	450W 90°C

۴-۴- تخمین انرژی فعالسازی

همان طور که می دانیم انرژی فعالسازی بیانگر میزان انرژی مورد نیاز برای شروع انتشار آب می باشد و به طور کلی می توان گفت موادی که در آن ها آب با مقاومت بیشتری به سازه متصل شده مقدار انرژی فعالسازی بیشتری دارد و حذف آب از ساختار ماده دشوارتر است. به منظور یافتن انرژی فعالسازی (E_a)، نمودار $\ln(D_{eff})$ در برابر $1/T_{abs}$ در توان های مختلف و شرایط عملیاتی ترکیبی متفاوت با استفاده از معادله ی (۱۱) محاسبه شد. مقادیر به دست آمده برای E_a در محدوده ی ۲/۰۷۳ تا ۱۷/۴۲۹ کیلوژول بر مول بود که کم ترین و بیش ترین مقدار به ترتیب مربوط به شرایط ۹۰۰ وات و ترکیبی ۴۵۰ وات با دمای ۸۰ درجه سانتی گراد و شرایط ۶۰۰ وات و ترکیبی ۱۸۰ وات و دمای ۷۰ درجه سانتی گراد بود. همچنین داده های حاصل در محدوده ی کلی ۱/۲۷-۱۱۰ کیلوژول بر مول به دست آمدند که پیش تر برای مواد غذایی گزارش شده است [۶۹]. با افزایش توان مایکروویو مقادیر E_a به طور معنی داری ($P < 0.05$) کاهش یافت که این روندی نزولی به هنگام کاهش توان مایکروویو ترکیبی نیز مشاهده شد. در حقیقت برای فرآیند خشک کردن، انرژی فعالسازی کمتر به معنای انتشار رطوبت بیشتر یا ضریب بالاتر انتقال جرم است که در توان های بالاتر امواج مایکروویو به دست آمد. به طور مشابه عباسی و همکاران [۵۶] در فرآیند خشک کردن موسیر که تنها با امواج مایکروویو خشک شد، نتایج مشابهی به دست آوردند. کم ترین مقدار E_a ، ۲/۰۷۳۷ کیلوژول بر مول بود که در توان ۹۰۰ وات و توان ترکیبی ۴۵۰ وات و دمای ۸۰ درجه سانتی گراد حاصل شد.

۴-۵- ارزیابی رنگ

مقادیر L^* ، a^* و b^* برای برش های موسیر تازه و همچنین برای نمونه های خشک شده به روش مایکروویو و روش ترکیبی پیشنهادی به ترتیب در جدول ۳ ارایه شده است. علاوه بر آن شاخص های Hue angle، Chroma، BI و ΔE نیز محاسبه و درج شد. براساس داده های حاصل، شاخص L^* که

همان گونه که در شکل ۵ نیز قابل مشاهده است، با افزایش توان مایکروویو در قسمت ترکیبی فرآیند خشک کردن، مقدار D_{eff} در تمام دماها افزایش یافت و این مساله را می توان به افزایش انرژی گرمایشی مرتبط دانست که موجب کاهش ویسکوزیته ی آب موجود در نمونه شده و سبب می شود فعالیت مولکول های آب افزایش یافته و تبخیر با سرعت بیشتری صورت گیرد. لازم به ذکر است که این افزایش D_{eff} با افزایش توان مایکروویو اولیه نیز مشاهده شد. درویشی [۶۴] و عظیمی نژادیان [۵۰] و همکارانشان نیز نتایج مشابهی در خشک کردن برش های کیوی و سیب زمینی با استفاده از امواج مایکروویو به دست آوردند. به علاوه بررسی های آماری نشان داد که در یک توان مشخص، دما اثر معنی داری بر روی ضریب نفوذ نداشت. با این وجود، افزایش دما از ۷۰ به ۹۰ درجه سانتی گراد سبب افزایش اندکی در ضریب نفوذ شد که علت آنرا می توان به طور مشابه به دلیل کاهش ویسکوزیته ی آب و متعاقباً کاهش مقاومت در برابر خروج مایعات مربوط دانست که این پدیده منجر به تسهیل انتشار مولکول های آب در مویرگ های محصول و افزایش مقدار D_{eff} خواهد شد [۶۵]. همچنین در مطالعات انجام شده بر روی خشک کردن گیاهانی مانند قارچ [۶۶]، لیمو [۶۷] و سیر [۶۸] با استفاده از روش هوای گرم نتایج مشابهی به دست آمده است.

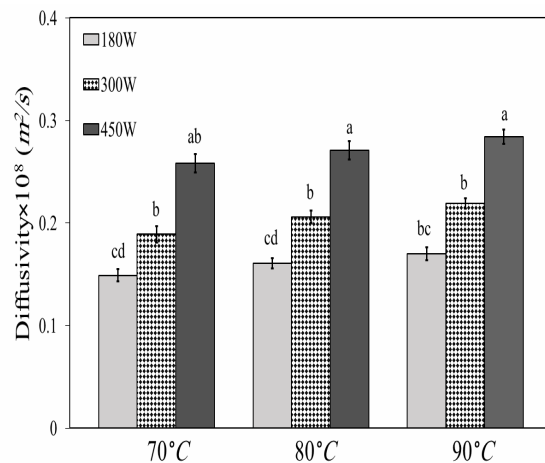


Fig 5 Effective moisture diffusivity values (D_{eff}) under proposed method at initial microwave power of 900W and different combined conditions.

بیانگر میزان روشنائی نمونه‌ها است، تغییراتی در محدوده‌ی ۰/۷۲۹ - ۰/۲۶۲ داشت که در مقایسه با روش خشک کردن با مایکروویو که تغییرات آن در بازه‌ی ۰/۷۹۲ - ۰/۳۷۸ بود کم تر می‌باشد و نشان دهنده‌ی آن است که رنگ نمونه‌های خشک شده به روش ترکیبی پیشنهادی روشن تر است. تغییرات شاخص b^* در محدوده‌ی ۰/۴۹۸ - ۰/۱۸۵ بیانگر وجود رنگ زرد در محصولات خشک شده می‌باشد. به طور کلی نتایج جدول نشان می‌دهد که هرچه فرآیند خشک شدن تحت تابش امواج ماکروویو قوی تر انجام شده پارامتر b^* دارای مقدار بیشتری بود که این روند در طول فرآیند خشک کردن کیوی [۷۰] نیز گزارش شده است.

به منظور بررسی تغییرات کلی رنگ محصولات با نمونه‌ی تازه، مقدار ΔE محاسبه شده نیز محاسبه شد. بر اساس نتایج تحلیل آماری انجام شده، در روش مایکروویو، توان مایکروویو اثر معنی داری ($P < 0.05$) بر روی مقدار ΔE داشت و مشاهده شد که مقادیر آن با افزایش توان اولیه مایکروویو از ۶۰۰ به ۹۰۰ وات به طور قابل توجهی افزایش یافت که یک نمونه از برش هادر شکل ۶ نشان داده شده است. در روش ترکیبی پیشنهادی، برای تمامی آزمایشات، در یک توان مشخص، دما اثر معنی داری بر روی ΔE نداشت. همچنین، در یک دمای مشخص، توان‌های ترکیبی پایین تر (۱۸۰ و ۳۰۰ وات) اثر معنی داری بر روی تغییر رنگ کل نداشت. اما در توان بالاتر (۴۵۰ وات) توان مایکروویو اثر معنی داری ($P < 0.05$) بر روی ΔE داشته و نسبت به توان‌های پایین تر به طور قابل توجهی افزایش یافت. ایزلی و همکارانش [۷۱] نیز در خشک کردن برش‌های انبه به روش مایکروویو چنین روندی در تغییر رنگ در محدوده توان ۱۲۰ به ۳۵۰ وات مشاهده کردند که این مساله را می‌توان به تحت تاثیر قرار گرفتن ترکیبات حساس به دما نسبت داد. از این رو خشک کردن موسیر با توان اولیه‌ی ضعیف تر سبب حفظ بهتر کیفیت نهایی محصول خواهد شد. کمترین مقدار ΔE در شرایط توان اولیه ۹۰۰ وات و شرایط ترکیبی ۴۵۰ وات و ۸۰ درجه سانتی‌گراد و برابر

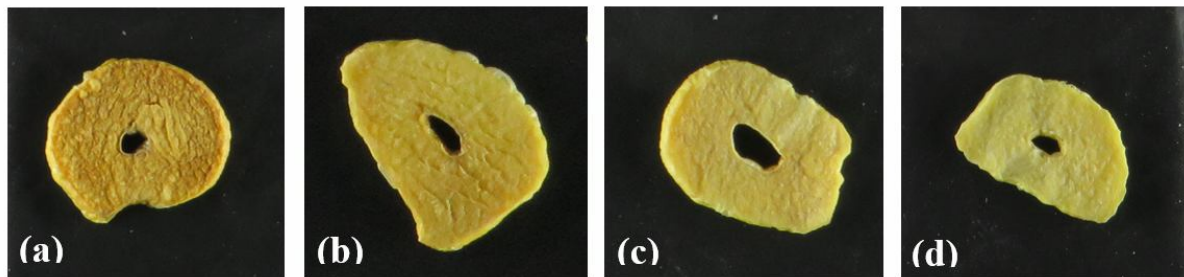
۰/۳۴ ± ۰/۲۱۹ به دست آمد که این مقدار با کلیه مقادیر بدست آمده از روش مایکروویو تنها، تفاوت معنی داری داشت ($P < 0.05$). این امر نشان دهنده این است که روش پیشنهادی می‌تواند کیفیت رنگ محصول حاصل را نسبت به روش مایکروویو تنها به طور قابل توجهی بهبود بخشد.

شاخص قهوه‌ای شدن (BI) به دلیل تغییر رنگ نمونه‌های تازه به رنگ قهوه‌ای رخ می‌دهد و حاصل واکنش میلارد بوده که در اثر خشک شدن نمونه در حضور اکسیژن و رطوبت تحت هوای گرم است [۷۲]. طبق نتایج تحلیل آماری انجام شده، در روش مایکروویو در توان‌های پایین تر (۶۰۰ و ۷۵۰ وات) اثر معنی داری بر روی شاخص BI مشاهده نشد، اما در توان بالاتر (۹۰۰ وات) اثر توان معنی دار بوده ($P < 0.05$) و به طور قابل توجهی کاهش یافت که به دلیل کمتر بودن زمان خشک شدن در این توان نسبت به دو توان دیگر بود. این امر نشان دهنده مناسب بودن توان ۹۰۰ وات جهت خشک کردن موسیر از لحاظ شاخص قهوه‌ای شدن است. در روش پیشنهادی، به طور کلی دما و توان ترکیبی اثر معنی داری بر روی شاخص BI نداشتند. با این حال، مقادیر به دست آمده از روش پیشنهادی تفاوت معنی داری ($P < 0.05$) با روش مایکروویو تنها داشتند و این امر نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند به طور قابل توجهی میزان قهوه‌ای شدن محصول خشک شده را بهبود بخشد. کمترین میزان BI تحت شرایط توان اولیه ۷۵۰ وات و شرایط ترکیبی ۴۵۰ وات و ۹۰ درجه سانتی‌گراد و برابر ۰/۱۳ ± ۰/۴۱/۳ به دست آمد.

پارامتر $Choroma$ پارامتر دیگری است که نشان دهنده‌ی میزان پایداری رنگ می‌باشد و نزدیک تر بودن مقدار آن به نمونه‌ی تازه بر مرغوبیت محصول به دست آمده می‌افزاید. همان گونه که در جدول مشخص شده نزدیک ترین مقدار عدد ۰/۲۷۴ است که در شوک اولیه ۶۰۰ وات و شرایط ترکیبی ۳۰۰ وات و ۹۰ درجه سانتی‌گراد حاصل شد که دلیل آن را می‌توان به کم بودن مقدار توان اولیه و شرایط ترکیبی ملایم نسبت داد.

Table 3 Color parameters of *Allium stipitatum* slices at different operating conditions.

Fresh sample		L_0	a_0	b_0	choroma	Hue angel			
		0.79	0.090	0.255	0.271	-1.228			
Microwave drying		L^*	a^*	b^*	choroma	Hue angel	BI	ΔE	
600W		0.6	-0.054	0.438	0.441	-1.448	204.15 ^a	0.367 ^b	
750W		0.498	-0.010	0.400	0.400	-1.546	253.96 ^a	0.404 ^b	
900W		0.795	-0.072	0.471	0.476	-1.419	143.96 ^{bc}	0.523 ^a	
Combined drying of microwave - hot air		Dried shallot slices							
Initial microwave power	Combined conditions	L^*	a^*	b^*	choroma	Hue angel	BI	ΔE	
600W	180W	70°C	0.411	-0.055	0.185	0.193	-1.281	46.43 ^{kl}	0.235 ^{hi}
		80°C	0.457	-0.062	0.311	0.317	-1.374	92.13 ^{efjk}	0.330 ^{gh}
		90°C	0.242	-0.031	0.198	0.200	-1.415	112.93 ^{efjk}	0.233 ^{hi}
	300W	70°C	0.367	-0.027	0.257	0.258	-1.466	102.47 ^{ghk}	0.293 ^{gh}
		80°C	0.49	0.00037	0.431	0.431	1.569	130.19 ^{def}	0.270 ^{gh}
		90°C	0.371	-0.03	0.272	0.273	-1.460	110.22 ^{ef}	0.237 ^{hi}
	450W	70°C	0.477	0.038	0.395	0.396	1.474	150.81 ^{defg}	0.422 ^c
		80°C	0.532	0.031	0.43	0.431	1.498	143.05 ^{ode}	0.419 ^c
		90°C	0.471	0.031	0.411	0.412	1.495	164.15 ^{ode}	0.367 ^{cd}
750W	180W	70°C	0.678	-0.083	0.391	0.399	-1.361	70.55 ^{jk}	0.292 ^{efg}
		80°C	0.512	-0.061	0.32	0.325	-1.382	80.95 ^{fghi}	0.380 ^{ef}
		90°C	0.572	-0.058	0.384	0.388	-1.420	93.02 ^{jk}	0.317 ^{fg}
	300W	70°C	0.6	-0.018	0.498	0.498	-1.534	142.44 ^{ghi}	0.344 ^{def}
		80°C	0.513	-0.028	0.425	0.425	-1.505	139.86 ^{efg}	0.345 ^{efg}
		90°C	0.391	-0.03	0.288	0.289	-1.467	111.48 ^{ghj}	0.294 ^{ef}
	450W	70°C	0.485	0.051	0.431	0.434	1.4530	172.70 ^{ghi}	0.447 ^{bc}
		80°C	0.314	0.029	0.28	0.281	1.4675	172.79 ^{efg}	0.339 ^{cd}
		90°C	0.633	-0.082	0.222	0.236	-1.216	31.41 ^{ijk}	0.484 ^{cd}
900W	180W	70°C	0.651	-0.086	0.363	0.373	-1.338	65.91 ^{hijk}	0.350 ^{ghi}
		80°C	0.729	-0.104	0.474	0.485	-1.354	84.44 ^{jk}	0.376 ^{efg}
		90°C	0.537	-0.064	0.364	0.369	-1.396	92.97 ^{jk}	0.368 ^{efg}
	300W	70°C	0.338	-0.026	0.311	0.312	-1.487	169.55 ^{ghi}	0.266 ^{fgh}
		80°C	0.572	-0.055	0.445	0.448	-1.447	121.13 ^{ghi}	0.358 ^{efg}
		90°C	0.623	-0.038	0.481	0.482	-1.491	122.54 ^{ghi}	0.325 ^{fg}
	450W	70°C	0.61	0.003	0.465	0.465	1.5643	125.44 ^{fgh}	0.447 ^{cd}
		80°C	0.361	-0.013	0.282	0.282	-1.524	127.29 ^{fghi}	0.219 ^j
		90°C	0.312	-0.013	0.254	0.254	-1.519	136.53 ^{ghi}	0.233 ^j

**Fig 6** Images of dried shallot slice at (a) 900W, (b)900W+(450W,70°C), (c) 750W+(450W, 70°C), and (d) 600W+(450W, 70°C)

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، به منظور خشک کردن برش‌های موسیر از روش پیشنهادی ترکیبی ماکروویو-هوای گرم استفاده شد. بدین صورت که پس از وارد کردن امواج مایکروویو در سه سطح ۶۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ وات به عنوان توان اولیه، نمونه‌ها تحت شرایط ترکیبی مایکروویو- هوای گرم با سطوح مختلف (توان ماکروویو ۱۸۰، ۳۰۰، ۴۵۰ وات و دمای ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد) قرار گرفتند و تاثیر شرایط عملیاتی مختلف بر سینتیک خشک کردن و خواص ظاهری آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که افزایش توان، چه در قسمت اولیه و چه در قسمت ترکیبی سبب کاهش معنی‌دار ($P < 0.05$) مدت زمان خشک شدن و افزایش سرعت فرآیند شد. همچنین از برآزش منحنی‌های خشک کردن به ۱۰ مدل خشک کردن لایه نازک متداول، مشخص شد که مدل لگاریتمی با بیشترین مقدار R^2 (۰/۹۹۶) و کمترین مقدار $RMSE$ (۰/۰۰۲) بهترین مدل برای توصیف این منحنی‌ها بود. به علاوه بررسی‌ها نشان داد که توان مایکروویو اثر معنی‌داری ($P < 0.05$) بر روی مقدار D_{eff} داشته و باعث افزایش آن شد، در حالیکه دما اثر قابل توجهی بر روی آن نداشت. همچنین، کمترین مقدار پارامتر E_a ، ۲/۰۷۳۷ کیلوژول بر مول و در توان اولیه ۹۰۰ وات و توان ترکیبی ۴۵۰ وات و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. نتایج حاصل از رنگ‌سنجی نشان داد که روش پیشنهادی کیفیت رنگ محصول به دست آمده را نسبت به روش مایکروویو تنها به طور قابل توجهی بهبود بخشید. نقطه‌ی بهینه به لحاظ کیفیت ظاهری از نظر ΔE در شرایط عملیاتی ۹۰۰ وات و ترکیبی ۴۵۰ وات و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد حاصل شد و از نظر شخص قهوه‌ای شدن شرایط توان اولیه ۷۵۰ وات و شرایط ترکیبی ۴۵۰ وات و ۹۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده، شرایط خشک کردن موسیر به روش پیشنهادی تحت توان اولیه ۹۰۰ وات و شرایط ترکیبی ۴۵۰ وات و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد پیشنهاد شد.

۵- منابع

- RESEARCH). Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research.
- [2] Lorigooini, Z., Kobarfard, F. and Ayatollahi, S.A., 2014. Anti-platelet aggregation assay and chemical composition of essential oil from *Allium atroviolaceum* Boiss growing in Iran. *International Journal of Biosciences (IJB)*, 5(2).
- [3] Rose, P., Whiteman, M., Moore, P.K. and Zhu, Y.Z., 2005. Bioactive S-alk(en)yl cysteine sulfoxide metabolites in the genus *Allium*: the chemistry of potential therapeutic agents. *Natural product reports*, 22(3), pp.351-368.
- [4] EBRAHIMI, R., Zamani, Z.A., Kashi, A.A.K. and JABARI, A., 2008. Comparison of fatty acids, mineral elements of 17 Iranian shallot landraces (*Allium hirtifolium* Boiss.).
- [5] Asgari, S., Ansari Samani, R., Deris, F., Shahinfard, N., Salimi, M., Mortzaei, S., Asgharzadeh, S., Shirzad, H. and Rafeian-kopaei, M., 2012. Antioxidant activity and the lowering effect of hydroalcoholic extract of *Allium hirtifolium* boisson some haemostatic factors in hypercholesterolemic rabbits. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*, 22(91), pp.40-48.
- [6] Sedighi, M., Rafeian-Kopaei, M. and Noori-Ahmadabadi, M., 2012. Effect of *Allium ampeloprasum* on ileum function: Involvement of beta-adrenergic receptors and voltage dependent calcium channels. *LIFE SCIENCE Journal-Acta Zhengzhou University Overseas Edition*, 9(4), pp.1660-1667.
- [7] Azadi, H.G., Ghaffari, S.M., Riazi, G.H., Ahmadian, S. and Vahedi, F., 2008. Antiproliferative activity of chloroformic extract of Persian Shallot, *Allium hirtifolium*, on tumor cell lines. *Cytotechnology*, 56(3), pp.179-185.
- [8] Lorigooini, Z., Ayatollahi, S.A., Amidi, S. and Kobarfard, F., 2015. Evaluation of anti-platelet aggregation effect of some *Allium* species. *Iranian journal of pharmaceutical research: IJPR*, 14(4), p.1225.
- [9] Fasihzadeh, S., Lorigooini, Z. and Jivad, N., 2016. Chemical constituents of *Allium stipitatum* regel (Persian shallot) essential oil. *Der Pharmacia Lettre*, 8(1), pp.175-180.
- [10] Moghim, H., Taghipoor, S., Shahinfard, N., Kheiri, S. and Rafeian, S., 2014. Antifungal effects of *Allium ascalonicum*, *Marticaria chamomilla* and *Stachys lavandulifolia* extracts on *Candida albicans*. *Journal of HerbMed Pharmacology*, 3.
- [11] Kazemi, S., Asgary, S., Moshtaghian, J., Rafeian, M., Adelnia, A. and Shamsi, F.,
- [1] Hanelt, P., Schultze-Motel, J., Fritsch, R., Kruse, J., Maass, H.I., Ohle, H. and Pistrick, K., 1992. Infrageneric grouping of *Allium*-the Gatersleben approach (No.

- [22] Brown, Z.K., Fryer, P.J., Norton, I.T., Bakalis, S. and Bridson, R.H., 2008. Drying of foods using supercritical carbon dioxide—Investigations with carrot. *Innovative food science & emerging technologies*, 9(3), pp.280-289.
- [23] Sharma, G.P., Verma, R.C. and Pathare, P., 2005. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of food engineering*, 71(3), pp.282-286.
- [24] Sabarez, H.T., Gallego-Juarez, J.A. and Riera, E., 2012. Ultrasonic-assisted convective drying of apple slices. *Drying Technology*, 30(9), pp.989-997.
- [25] Fernandes, F.A., Linhares Jr, F.E. and Rodrigues, S., 2008. Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(6), pp.1049-1054.
- [26] Zhao, G., Hu, C. and Luo, H., 2020. Effects of combined microwave-hot-air-drying on the physicochemical properties and antioxidant activity of *Rhodomyrtus tomentosa* berry powder. *Journal of Food Measurement and Characterization*, pp.1-10.
- [28] Mousa, N. and Farid, M., 2002. Microwave vacuum drying of banana slices. *Drying Technology*, 20(10), pp.2055-2066.
- [28] Kudra, T. and Mujumdar, A.S., 2009. *Advanced drying technologies*. CRC press.
- [29] Wang, H., Duan, X., Duan, L. and Ren, G., 2019. Mutual transformation of the water binding state and moisture diffusion characteristics of Chinese yams during microwave freeze drying. *Drying Technology*, pp.1-11.
- [30] Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A.S. and Wang, S., 2006. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 17(10), pp.524-534.
- [31] Xu, W., Cao, X., Zhu, G., Xia, Z. and Wang, D., 2020. Effect of temperature difference on the aroma and quality of carrots processed through microwave drying combined with hot air drying. *Food and Bioproducts Processing*, 120, pp.58-68.
- [32] Palamanit, A., Sugira, A.M., Soponronnarit, S., Prachavawarakorn, S., Tungtrakul, P., Kalkan, F. and Raghavan, V., 2019. Study on quality attributes and drying kinetics of instant parboiled rice fortified with turmeric using hot air and microwave-assisted hot air drying. *Drying Technology*.
- [33] Varith, J., Dijknarakkul, P., Achariyaviriya, A. and Achariyaviriya, S., 2010. Liver-protective effects of hydroalcoholic extract of *Allium hirtifolium* Boiss. in rats with alloxan-induced diabetes mellitus. *Arva Atherosclerosis*, 6(1), p.11.
- [12] Jafarian, A., Ghannadi, A. and Elyasi, A., 2010. The effects of *Allium hirtifolium* Boiss. on cell-mediated immune response in mice. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*, (1), pp.51-55.
- [13] Shirzad, H., Taji, F. and Rafieian-Kopaei, M., 2011. Correlation between antioxidant activity of garlic extracts and WEHI-164 fibrosarcoma tumor growth in BALB/c mice. *Journal of medicinal food*, 14(9), pp.969-974.
- [14] El-Sebaei, A.A. and Shalaby, S.M., 2012. Solar drying of agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), pp.37-43.
- [15] Luchese, C.L., Gurak, P.D. and Marczak, L.D.F., 2015. Osmotic dehydration of *Physalis peruviana* L.: Evaluation of water loss and sucrose incorporation and the quantification of carotenoids. *LWT-Food Science and Technology*, 63(2), pp.1128-1136.
- [16] Nadi, F., Rahimi, G.H., Younsi, R., Tavakoli, T. and Hamidi-Esfahani, Z., 2012. Numerical simulation of vacuum drying by Luikov's equations. *Drying Technology*, 30(2), pp.197-206.
- [17] Onwude, D.I., Hashim, N. and Chen, G., 2016. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. *Trends in Food Science & Technology*, 57, pp.132-145.
- [18] Sagar, V.R. and Kumar, P.S., 2010. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of food science and technology*, 47(1), pp.15-26.
- [19] Moses, J.A., Norton, T., Alagusundaram, K. and Tiwari, B.K., 2014. Novel drying techniques for the food industry. *Food Engineering Reviews*, 6(3), pp.43-55.
- [20] Chen, D., Xing, B., Yi, H., Li, Y., Zheng, B., Wang, Y. and Shao, Q., 2020. Effects of different drying methods on appearance, microstructure, bioactive compounds and aroma compounds of saffron (*Crocus sativus* L.). *LWT*, 120, p.108913.
- [21] Shen, L., Wang, L., Zheng, C., Liu, C., Zhu, Y., Liu, H., Liu, C., Shi, Y., Zheng, X. and 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*, pp.1-29.

- models. Transactions of the ASAE, 28(1), pp.296-0301.
- [45] Wang, C.Y. and Singh, R.P., 1978. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. Transactions of American Society of Agricultural Engineers, 11(6), pp.668-672.
- [46] Karathanos, V.T., 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. Journal of Food Engineering, 39(4), pp.337-344.
- [47] Kaveh, M., Chavjan, R.A. and Nikbakht, A.M., 2017. Mass transfer characteristics of eggplant slices during length of continuous band dryer. Heat and Mass Transfer, 53(6), pp.2045-2059.
- [48] Lemus Mondaca, R., Vega - Gálvez, A., Moraga, N.O. and Astudillo, S., 2015. Dehydration of *S tevia rebaudiana* B erton leaves: Kinetics, Modeling and Energy Features. Journal of Food Processing and Preservation, 39(5), pp.508-520.
- [49] Doymaz, I., Kipcak, A.S. and Piskin, S., 2015. Characteristics of thin-layer infrared drying of green bean. Czech Journal of Food Sciences, 33(1), pp.83-90.
- [50] Azimi-Nejadian, H. and Hoseini, S.S., 2019. Study the effect of microwave power and slices thickness on drying characteristics of potato. Heat and Mass Transfer, 55(10), pp.2921-2930.
- [51] Crank, J., 1975. Methods of solution when the diffusion coefficient is constant. The mathematics of diffusion, 2, pp.11-27.
- [52] Darvishi, H., Khoshtaghaza, M.H. and Minaee, S., 2014. Fluidized bed drying characteristics of soybeans. Journal of Agricultural Science and Technology, 16(5), pp.1017-1031.
- [53] Süfer, Ö., Sezer, S. and 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), p.e13239.
- [54] Therdthai, N. and Zhou, W., 2009. Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen). Journal of Food Engineering, 91(3), pp.482-489.
- [55] Kesbi, O.M., Sadeghi, M. and Mireei, S.A., 2016. Quality assessment and modeling of microwave-convective drying of lemon slices. Engineering in agriculture, environment and food, 9(3), pp.216-223.
- [56] Abbasi, H., Laveghinia, N., Bibak, F., and Karimi, S., 2020. Investigation of mass transfer and drying kinetics of shallot by 2007. Combined microwave-hot air drying of peeled longan. Journal of Food Engineering, 81(2), pp.459-468.
- [34] Pan, Z. and McHugh, T., US Department of Agriculture, 2006. Novel infrared dry blanching (IDB), infrared blanching, and infrared drying technologies for food processing. U.S. Patent Application 10/917,797.
- [35] Argyropoulos, D., Heindl, A. and Müller, J., 2011. Assessment of convection, hot - air combined with microwave - vacuum and freeze - drying methods for mushrooms with regard to product quality. International journal of food science & technology, 46(2), pp.333-342.
- [36] Jia, Y., Khalifa, I., Hu, L., Zhu, W., Li, J., Li, K. and 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 Bioproducts Processing, 118, pp.67-76.
- [37] Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J. and Hu, X., 2007. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. Food Research International, 40(1), pp.39-46.
- [38] Bruce, D.M., 1985. Exposed-layer barley drying: three models fitted to new data up to 150 C. Journal of Agricultural Engineering Research, 32(4), pp.337-348.
- [39] Hendorson, S.M., 1961. Grain drying theory (I) temperature effect on drying coefficient. Journal of Agricultural Engineering Research, 6(3), pp.169-174.
- [40] Page, G.E., 1949. Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin layers.
- [41] Akpınar, E.K. and Toraman, S., 2016. Determination of drying kinetics and convective heat transfer coefficients of ginger slices. Heat and Mass Transfer, 52(10), pp.2271-2281.
- [42] Yagcioglu, A.D.A.C.F., 1999. Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. In Proceedings of the 7th International congress on agricultural mechanization and energy, 1999 (pp. 565-569). Faculty of Agriculture, Cukurova University.
- [43] Sharaf-Eldeen, Y.I., Blaisdell, J.L. and Hamdy, M.Y., 1980. A model for ear corn drying. Transactions of the ASAE, 5(4), pp.1261-1265.
- [44] Verma, L.R., Bucklin, R.A., Endan, J.B. and Wratten, F.T., 1985. Effects of drying air parameters on rice drying

- characteristics of kiwi slices. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 20(2), pp.249-264.
- [65] Corrêa, P.C., Oliveira, G.H.H., Botelho, F.M., Goneli, A.L.D. and Carvalho, F.M., 2010. Mathematical modeling and determination of thermodynamic properties of coffee (*Coffea arabica* L.) during the drying process. *Revista Ceres*, 57(5), pp.595-601.
- [66] Tulek, Y., 2011. Drying kinetics of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) in a convective hot air dryer.
- [67] Toriki-Harchegani, M., Ghasemi-Varnamkhashti, M., Ghanbarian, D., Sadeghi, M. and Tohidi, M., 2016. Dehydration characteristics and mathematical modelling of lemon slices drying undergoing oven treatment. *Heat and Mass Transfer*, 52(2), pp.281-289.
- [68] Demiray, E. and Tulek, Y., 2014. Drying characteristics of garlic (*Allium sativum* L) slices in a convective hot air dryer. *Heat and Mass Transfer*, 50(6), pp.779-786.
- [69] Aghbashlo, M. and Samimi-Akhijahani, H., 2008. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (*Berberidaceae*). *Energy Conversion and Management*, 49(10), pp.2865-2871.
- [70] Heshmati, KH., Moghadas, S., 2017. Application of intermittent microwave – convective hot air technique on quality and nutritional characteristics of dried kiwi slices. *Food industry research*, 27(1), pp.111-126. [full text in Persian]
- [71] Izli, N. and Polat, A., 2019. Effect of convective and microwave methods on drying characteristics, color, rehydration and microstructure properties of ginger. *Food Science and Technology*, 39(3), pp.652-659.
- [72] Cui, Z.W., Xu, S.Y. and Sun, D.W., 2003. Dehydration of garlic slices by combined microwave-vacuum and air drying. *Drying technology*, 21(7), pp.1173-1184.
- microwave method. *Biosystem Engineering*. (In Press). (In Persian)
- [57] Amiri Chayjan, R., Kaveh, M. and Khayati, S., 2015. Modeling drying characteristics of hawthorn fruit under microwave convective conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(3), pp.239-253.
- [58] Toriki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Pirbalouti, A.G. and 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, pp.407-418.
- [59] Olanipekun, B.F., Tunde-Akintunde, T.Y., Oyelade, O.J., Adebisi, M.G. and Adenaya, T.A., 2015. Mathematical modeling of thin - layer pineapple drying. *Journal of food processing and preservation*, 39(6), pp.1431-1441.
- [60] Horuz, E., Bozkurt, H., Karataş, H. and Maskan, M., 2018. Simultaneous application of microwave energy and hot air to whole drying process of apple slices: drying kinetics, modeling, temperature profile and energy aspect. *Heat and Mass Transfer*, 54(2), pp.425-436.
- [61] Zheng, D.J., Cheng, Y.Q., Liu, H.J. and Li, L.T., 2011. Investigation of EHD-enhanced water evaporation and a novel empirical model. *International Journal of Food Engineering*, 7(2).
- [62] Toriki-Harchegani, M., Ghanbarian, D. and Sadeghi, M., 2015. Estimation of whole lemon mass transfer parameters during hot air drying using different modelling methods. *Heat and mass transfer*, 51(8), pp.1121-1129.
- [63] Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B. and Marinos-Kouris, D., 1996. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying technology*, 14(10), pp.2225-2253.
- [64] Darvishi, H., Mohamamdi, P., Azadbakht, M. and Farhudi, Z., 2018. Effect of different drying conditions on the mass transfer



Determination of drying kinetics of *Allium stipitatum* under a proposed combined microwave-hot air method and investigation of effect of operating conditions on its color parameters

Karimi, S. ¹, Bibak, F. ², Layeghinia, N. ², Abbasi, H. ^{1*}

1. Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran
2. Master of Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received 05 August 2020
Accepted 21 September 2020

Keywords:

Color parameters,
Drying kinetics,
Combined microwave-hot
air drying,
Allium stipitatum

DOI: 10.29252/fsct.18.01.10

*Corresponding Author E-Mail:
habbasi@jsu.ac.ir

E-mail address: *Allium stipitatum* is one of the most important plants native to Iran, which has a special position in food basket of people because of its many healing properties. In this study, effect of a proposed combined microwave-hot air method on kinetics and physical properties of *Allium stipitatum* was investigated. In the proposed method, after applying microwaves (600, 750 and 900W), samples were subjected to combined microwave-hot air drying process. Results showed that Logarithmic model with values of $R^2 = 0.996$ and $RMSE = 0.002$ was the best one to model drying kinetics of *Allium stipitatum* slices under the proposed method. In addition, drying curves analysis showed that the more microwave power, the less drying time and the more process rate. Moreover, in the combined section, effect of microwave power will be dominant due to higher energy. The optimum operating point to achieve the lowest moisture content and drying time occurred at primary power of 900W and combined conditions of 450W at 80°C. Increasing microwave power increased effective moisture diffusivity from 0.167×10^{-8} to $0.283 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ and decreased average activation energy from 17.429 to 2.074 kJ/mol. The optimum operating conditions in terms of appearance quality (colorimetry) were related to drying at microwave power of 900W and combined conditions of 450W and 80°C, which was introduced as proposed optimum point. In general, the proposed combined method compared to microwave method alone, was an efficient method in order to keep the product quality characteristics and its use in drying *Allium stipitatum* is recommended.