



## بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن جعفری با استفاده از روش ترکیبی هوای داغ - مایکروویو

مجتبی نوری<sup>۱</sup>، مهدی کاشانی نژاد<sup>۲\*</sup>، امیر دارایی گرمه‌خانی<sup>۳</sup> و مرضیه بلندی<sup>۴</sup>

دانش آموخته کارشناسی ارشد صنایع غذایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دامغان، <sup>۱</sup>دانشیار دانشکده صنایع غذایی،  
دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، <sup>۲</sup>گروه صنایع غذایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد آزادشهر، <sup>۳</sup>استادیار  
گروه صنایع غذایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دامغان  
تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۶/۱۴

### چکیده

در این پژوهش خشک کردن جعفری با استفاده از سه روش خشک کردن با هوای داغ (در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد)، مایکروویو (در توان‌های ۹۰، ۱۸۰، ۳۶۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ وات) و روش ترکیبی هوای داغ-مایکروویو انجام شد. انتخاب سطوح بهینه برای خشک کردن در روش ترکیبی، با بررسی آزمایشات کیفی نمونه‌های خشک شده صورت گرفت. همچنین ۸ مدل ریاضی بر داده‌های آزمایش برآزش داده شد و کیفیت برآزش آنها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقایسه نتایج آن‌ها نشان داد مدل پیچ برای تخمین تغییرات رطوبت و توصیف رفتار خشک شدن جعفری مناسب است. همچنین بررسی فرآیند خشک کردن ترکیبی و آزمایشات کیفی محصول نهایی حاصل از آن نشان داد این روش می‌تواند تا مقدار قابل توجهی باعث بهبود پارامترهای کیفی مثل رنگ، جذب مجدد آب، مقدار ویتامین ث و کاهش زمان خشک شدن جعفری شود. نتایج نشان داد که دمای خشک کن هوای داغ و توان مایکروویو بر سرعت خشک شدن جعفری اثر مهمی دارند و با افزایش دما و توان خشک کن، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. طولانی‌ترین زمان فرآیند خشک شدن جعفری در خشک کردن با هوای داغ و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد که ۴۲۰ دقیقه به طول انجامید. این زمان در فرآیند خشک کردن ترکیبی باعث کاهش ۶۶/۴۳ درصد در زمان خشک شدن جعفری نسبت به خشک کردن با هوای داغ ۵۰ درجه سانتی‌گراد گردید.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، جعفری، خشک کردن ترکیبی، مدل‌سازی

\*مسئول مکاتبه: [amirdaraey@yahoo.com](mailto:amirdaraey@yahoo.com)

## مقدمه

خشک کردن میوه‌ها و سبزیجات یکی از قدیمی‌ترین و در عین حال گسترده‌ترین روش‌های شناخته شده جهت نگهداری غذا و از مهم‌ترین فرآیندها برای حفظ کیفیت مواد غذایی است. هدف عمده در خشک کردن محصولات کشاورزی، کاهش رطوبت تا حدی است که در طولانی مدت قابل نگهداری باشند که با کاهش فعالیت‌های میکروبی و آنزیمی و تقلیل سرعت فعل و انفعالات شیمیایی، زمان ماندگاری محصول را افزایش و با کاهش قابل توجه در وزن و حجم آنها، هزینه‌های بسته‌بندی، ذخیره سازی و حمل و نقل آن را سهولت می‌بخشد (آکپینار، ۲۰۰۷). در خشک کن‌های معمول صنعتی با هوای گرم به خاطر اینکه هدایت حرارتی پایین است راندمان انرژی پایین می‌آید و مدت زمان طولانی‌تری برای خشک کردن لازم است. با توجه به این موارد، امروزه روش‌های دیگری برای خشک کردن مواد غذایی مورد توجه قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به خشک کردن با مایکروویو اشاره کرد (آقاجانی و همکاران، ۲۰۰۹). بر خلاف روش‌های دیگر خشک کردن که در آنها گرما باید از سطح به عمق نفوذ کند، در این روش گرما در خود ماده غذایی به وجود می‌آید (آلیاس، ۲۰۰۷). گرایش‌های جدید در توسعه فرآیندهای غذایی در زمینه خشک کردن، منجر به ایجاد روش‌های ترکیبی مختلف خشک کردن شده است.

جعفری با نام علمی پتروسلینوم ساتیووم<sup>۱</sup> را بیشتر به خاطر عطر و طعم مطبوع‌اش به صورت خشک یا تازه مورد استفاده قرار می‌دهند. جعفری اگرچه مانند دیگر سبزی‌ها سرشار از ویتامین‌های مختلف و همچنین املاح و مواد معدنی مفید است ولی به لحاظ آهن، ویتامین‌های A، C، فسفر، پتاسیم، کلسیم و ید، منبعی غنی به حساب می‌آید. برگ‌های جعفری حاوی سطح بالایی از رطوبت بوده بنابراین محیط مناسبی برای میکروارگانیسم‌ها است. همچنین میزان ضایعات بالایی دارد. به منظور حفظ این گیاه و اینکه در تمام طول سال، در دسترس مصرف کنندگان باشد، پس از برداشت آن را در معرض فرآیندهای تکنولوژیکی از جمله خشک کردن قرار می‌دهند (آکپینار و همکاران، ۲۰۰۶؛ سویسال و همکاران، ۲۰۰۶) تحقیقات متعددی درباره خشک کردن محصولات کشاورزی به‌خصوص سبزیجات انجام شده است. نتایج آزمایشات دویماز و همکاران (۲۰۰۶) در بررسی رفتار خشک کردن لایه نازک برگ‌های نعناع در محدوده دمای ۳۵-۶۰ درجه سانتی‌گراد در خشک‌کن کابینتی نشان داد که افزایش دما به میزان قابل

1- *Petroselinum sativum*

توجهی باعث کاهش زمان خشک شدن برگ‌های نعناع گردید و با افزایش دما، شدت خشک شدن افزایش یافت. همچنین مدل لگاریتمی مناسب‌ترین مدل برای آنالیز داده‌ها تشخیص داده شد. بر اساس تحقیقات آکپینار و همکاران (۲۰۰۶) در بررسی رفتار خشک کردن برگ‌های جعفری در خشک کن همرفتی با دماهای ۵۶، ۶۷، ۸۵ و ۹۳ درجه سانتی‌گراد با سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه و خشک کردن سنتی با نور خورشید با همرفت طبیعی مشاهده شد که در منحنی‌های خشک کردن دوره‌ی سرعت ثابت وجود ندارد و فرآیند خشک کردن همواره با کاهش رطوبت در واحد زمان همراه است. درتای و ژو (۲۰۰۹) در خشک کردن نعناع با دو روش هوای داغ و مایکروویو بیان کردند مایکروویو می‌تواند مدت زمان خشک کردن برگ نعناع را در مقایسه با خشک کردن با هوای داغ ۹۰-۸۵ درصد کاهش دهد. علاوه بر این، تغییر رنگ در طول خشک کردن مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای رنگی برگ نعناع خشک شده از نمونه‌های خشک شده با هوای داغ بهتر بود. همچنین آزمایشات جذب مجدد آب نشان داد میزان جذب آب در نمونه‌های خشک شده با مایکروویو اختلاف معنی‌داری نسبت به نمونه‌های خشک شده با هوای داغ دارند. در مطالعات ازبک و دادالی (۲۰۰۷) در مورد خشک کردن برگ‌های نازک نعناع توسط مایکروویو نتایج حاکی از آن بود که با افزایش قدرت خروجی مایکروویو از ۱۸۰ تا ۹۰۰ وات، زمان خشک شدن از ۱۲/۵ تا ۳۰ دقیقه کاهش می‌یابد. اخیراً استفاده از روش‌های ترکیبی خشک کردن نیز جهت بهینه سازی کیفیت محصول نهایی و کاهش زمان فرآیند، اهمیت بیشتری یافته است. انجام این تحقیق با توجه به اینکه تاکنون هیچ مطالعه‌ای بر فرآیندهای مختلف خشک کردن جعفری در ایران انجام نشده است امری ضروری به نظر می‌رسد. اهداف این تحقیق عبارتند از بهینه کردن شرایط خشک کردن جعفری با روش ترکیبی هوای داغ و مایکروویو، بررسی اثر روش خشک کردن بر کیفیت جعفری خشک شده، بررسی سینتیک خشک کردن جعفری و انتخاب بهترین مدل توصیف کننده فرآیند خشک کردن جعفری با هوای داغ، مایکروویو و روش ترکیبی آنها.

### مواد و روش‌ها

جعفری جهت انجام این پژوهش روزانه از بازار میوه و تره بار گرگان به صورت نیمه آماده خریداری و در یخچال نگهداری شد. در هر نوبت آزمایش روزانه نمونه‌ها از یخچال خارج و تمیز کردن تکمیلی سبزی‌ها (شامل جدا کردن قسمت‌های اضافی مثل برگ‌های غیرقابل استفاده و امتداد ساقه‌ها) انجام شد.

اندازه‌گیری رطوبت<sup>۱</sup> (MC): نمونه‌های ۵۰ گرمی جعفری پس از آماده‌سازی و توزین به وسیله ترازو (A&D GF-6100، ژاپن) با دقت ۰/۰۰۱ گرم، جهت تعیین مقدار رطوبت توسط آون (fater electronic U670، ایران) در دمای  $105 \pm 1$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ ساعت خشک شدند. به طوری که تغییر وزنی بین دو بار توزین مشاهده نشد و سپس مقدار رطوبت اولیه بر حسب وزن تر به دست آمد (سویسال و همکاران، ۲۰۰۶). مقادیر رطوبت بر مبنای وزن تر و خشک با کمک معادلات (۱) و (۲) بدست آمد:

$$MC_{w.b.} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

(۱) رطوبت بر مبنای تر

$$MC_{d.b.} = \frac{MC_{w.b.}}{100 - MC_{w.b.}} \times 100$$

(۲) رطوبت بر مبنای خشک

که در این معادلات

$MC_{w.b.}$  درصد رطوبت بر مبنای تر،  $MC_{d.b.}$  درصد رطوبت بر مبنای خشک،  $m_1$  = وزن نمونه قبل از خشک کردن (گرم)،  $m_2$  وزن نمونه بعد از خشک کردن (رطوبت تعادلی) (گرم) می‌باشد.

#### آزمایشات خشک کردن

**خشک کردن با هوای داغ:** برای این منظور نمونه‌ها ابتدا پس از آماده‌سازی و حذف رطوبت سطحی درون ظروفی از جنس فویل آلومینیوم خشک و تمیز و دارای منافذ برای عبور جریان هوا از بین نمونه قرار داده شدند و به وسیله ترازو توزین شده و جهت خشک کردن در آون هوای داغ قرار گرفتند. برای هر بار آزمایش مقدار  $50 \pm 0.5$  گرم از نمونه آماده شده و در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند و وزن آنها ثبت می‌شد تا زمانی که بین دو توزین متوالی اختلاف وزنی مشاهده نشد (دویماز و همکاران، ۲۰۰۶).

**خشک کردن با مایکروویو:** در فرآیند خشک کردن با مایکروویو نمونه‌های  $50 \pm 0.2$  گرمی آماده و توسط مایکروویو (LG-solarDOM، استرالیا) و در شدت‌های ۹۰، ۱۸۰، ۳۶۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ وات خشک شدند. به منظور بررسی سینتیک خشک کردن و ترسیم منحنی‌های مربوط، نمونه آماده شده پس از توزین و ثبت وزن در آون قرار گرفتند. در زمان‌های متوالی هر ۱۰ دقیقه تا ۲ ساعت اول و هر ۳۰ دقیقه پس

از آن برای هوای داغ و در فاصله‌های زمانی هر ۳۰۰ ثانیه (۹۰ وات)، ۱۸۰ ثانیه (۱۸۰ وات)، ۹۰ ثانیه (۳۶۰ وات)، ۶۰ ثانیه (۶۰۰ وات) و ۳۰ ثانیه (۹۰۰ وات) برای میکروویو نمونه از خشک کن خارج و توزین شده و مجدداً در آن قرار گرفت و این عمل تا زمانی انجام شد که نمونه‌ها به وزن ثابت رسیدند (سویسال و همکاران، ۲۰۰۶).

**خشک کردن ترکیبی:** پس از انجام فرآیندهای خشک کردن با هوای داغ و میکروویو به طور جداگانه و آزمایشات کیفی (شامل رنگ، آب گیری مجدد و ویتامین ث) و بررسی نتایج حاصل از آنها، دمای بهینه خشک کن هوای داغ و توان بهینه میکروویو جهت خشک کردن ترکیبی انتخاب شدند. ابتدا نمونه‌ها در آن جابه جایی هوای گرم در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به رطوبت بحرانی خشک شدند. در این نقطه خشک کردن از آهنگ ثابت به آهنگ نزولی تغییر یافته و سرعت خشک کردن کاهش می‌یابد. سپس نمونه‌ها در آن میکروویو با شدت ۳۶۰ وات تا رسیدن به رطوبت نهایی خشک شدند. دما و توان بهینه برای روش ترکیبی بر مبنای آزمایشات کیفی نمونه‌های خشک شده شامل رنگ، جذب مجدد آب و ویتامین ث انتخاب شدند.

### بررسی سینتیک خشک کردن جعفری

**نسبت رطوبت<sup>۱</sup> (MR):** در بیشتر پژوهش‌ها، سینتیک خشک کردن بر اساس شاخص نسبت رطوبت (MR) گزارش شده است که علت آن، کاهش پراکندگی و خوش فرم کردن داده‌ها است. در پژوهش حاضر نیز برای محاسبه نسبت رطوبت برگ‌های جعفری در طول فرآیند خشک کردن از معادله (۳) استفاده شد (کاراسلن و همکاران، ۲۰۰۸؛ ازکن و همکاران، ۲۰۰۷).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3)$$

که در این معادله

MR نسبت رطوبت (بدون بعد)،  $M_t$  رطوبت نمونه بر مبنای وزن خشک در زمان  $t$ ،  $M_0$  رطوبت اولیه بر مبنای خشک و  $M_e$  مقدار رطوبت تعادلی بر مبنای خشک است.

شدت خشک شدن<sup>۱</sup> (DR) : همچنین شدت خشک کردن با استفاده از معادله (۴) محاسبه شد.

$$DR = \frac{(m_0 - m_1) \times 60}{(t_2 - t_1) \times m_2} \quad (4)$$

که در این معادله DR شدت خشک شدن، M0 وزن نمونه در زمان t1، M1 وزن نمونه در زمان t2، M2 رطوبت تعادلی و T1 زمان اولیه است.

جدول ۱- مدل‌های منتخب جهت توصیف فرآیند خشک شدن جعفری.

شماره	نام مدل	معادله مدل	مرجع
۱	پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$	پیچ، ۱۹۴۹
۲	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$	وسترمن و همکاران، ۱۹۷۳
۳	هندرسون و پاییس	$MR = a \exp(-kt)$	هندرسون و پاییس، ۱۹۶۱
۴	لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + c$	طغرل و پهلوان، ۲۰۰۴
۵	میدیلی	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	آکپینار و همکاران، ۲۰۰۳
۶	دوجمله ای	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-lt)$	هندرسون، ۱۹۷۴
۷	ورما و همکاران	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	ورما و همکاران، ۱۹۸۵
۸	وانگ و سینگ	$MR = 1 + at + bt^2$	وانگ و سینگ، ۱۹۷۸

مدل سازی خشک کردن: برای مدل‌سازی ریاضی خشک شدن نمونه‌ها از نسبت رطوبت در طی خشک شدن استفاده شد (معادله ۳). مدل‌های منحنی خشک شدن جعفری بر اساس مدل‌های توصیه شده محققینی که در این زمینه کار کردند انتخاب گردید و در جدول ۱ آورده شده است. نسبت رطوبت به دست آمده در طی آزمایش با ۸ مدل از مدل‌های استاندارد خشک شدن مقایسه گردید. این معادلات از ارتباط بین تغییرات مقدار رطوبت و زمان خشک کردن مشتق می‌شوند. در این معادلات اصول فرآیند خشک کردن نادیده گرفته شده و پارامترهای آن‌ها مفهوم فیزیکی ندارند. از این رو قادر نیستند مفهوم دقیقی از عوامل مهم مؤثر در فرآیند خشک کردن را ارائه کنند. اگرچه ممکن است منحنی خشک کردن را برای شرایط آزمایشگاهی به خوبی توصیف نمایند (طغرل و پهلوان، ۲۰۰۴).

## 1- Drying Rate

از محاسبه MR، مدل‌های مختلف خشک کردن (جدول ۱) به داده‌های بدست آمده در آزمایشات خشک کردن برازش گردید. برای پیدا کردن بهترین مدل و بدست آوردن ضرایب آنها، با استفاده از روش رگرسیون غیر خطی و به کمک نرم افزار Excel، ۸ مدل به داده‌های حاصل از مراحل مختلف خشک کردن برازش گردید. از سه معیار ضریب تعیین ( $R^2$ )، مربع کای ( $\chi^2$ ) و ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها (RMSE) برای سنجش بهترین مدل استفاده شد. ملاک انتخاب بهترین مدل توصیف کننده رفتار خشک کردن، بیشترین مقدار  $R^2$  و پایین‌ترین مقدار RMSE بود. سپس با استفاده از Solver در نرم‌افزار Excel ضرایب (ثابت‌های معادله) انتخاب شده به متغیرهای مورد استفاده در فرآیند خشک کردن ربط داده شد. بدین ترتیب معادله عمومی بدست آمد که قادر بود مشخصات خشک کردن جعفری در شرایط آزمایش شده را پیش بینی کند. سه معیار ضریب همبستگی ( $R^2$ )، کای ( $\chi^2$ ) و ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) برای تصدیق مدل ارائه شده استفاده شده‌اند، که با استفاده از معادلات ۵ و ۶ محاسبه می‌گردند:

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

$$RMSE = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

که در آن‌ها  $MR_{exp,i}$  داده‌های آزمایشی  $i$ ام شدت خشک کردن،  $MR_{pre,i}$  داده‌های پیشگویی شده شدت خشک کردن،  $N$  تعداد مشاهدات و  $m$  تعداد ثابت‌های معادله شدت خشک کردن است. تمامی مراحل و آزمایشات انجام شده در این پژوهش در سه تکرار انجام شد. نتایج تاثیر دما و توان خشک کن بر زمان خشک شدن به وسیله طرح کاملاً تصادفی با تیمار دمای خشک کن در سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد و پنج سطح توان ۹۰، ۱۸۰، ۳۶۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ وات با سه تکرار مورد بررسی قرار گرفت. میانگین تیمارها نیز با استفاده از نرم‌افزار SAS (ورژن ۹/۳، ۲۰۱۱) و آزمون دانکن در سطح ۵ درصد مقایسه گردیدند.

### خصوصیات کیفی

رنگ: برای بررسی رنگ نمونه‌ها از نرم‌افزار ImageJ2x استفاده شد به طوری که ابتدا از سطح نمونه‌های خشک شده در روش‌های مختلف هوای داغ، میکروویو و ترکیبی (۵۱ تیمار) عکس‌هایی با کیفیت بالا و شرایط یکسان تهیه شد. سپس به کمک نرم‌افزار پارامترهای رنگی  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  به دست آمد. برای هر مرحله آزمایش ۵ بار تکرار انجام شد. سپس اختلاف رنگ ( $\Delta E$ ) محصول نسبت به ماده اولیه با معادله (۷) محاسبه گردید. مولفه  $L$  میزان روشنی و تیرگی نمونه را مشخص می‌کند و دارای محدوده مقدار ۰-۱۰۰ است. مقدار ۱۰۰ بیان‌کننده رنگ سفید و مقدار صفر معرف رنگ سیاه است. مقادیر مثبت مولفه  $a$  بیانگر رنگ قرمز، مقدار صفر بیان‌کننده رنگ خاکستری و مقادیر منفی به معنای رنگ سبز است. برای مولفه  $b$  اگر مقدار مثبت باشد به معنی رنگ زرد و اگر مقدار منفی باشد معرف رنگ آبی است (کروکیدا و همکاران، ۱۹۹۸).

$$\Delta E = [ (\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 ]^{1/2} \quad (7)$$

نسبت جذب آب مجدد<sup>۱</sup> (WRR): در این آزمایش نمونه‌های خشک شده جعفری، ابتدا توزین و سپس ۲ گرم از آن در یک بشر حاوی ۲۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر در دمای آزمایشگاه غوطه ور شدند تا جایی که افزایش وزنی مشاهده نشود (حدود ۱۵ ساعت) و بعد از آن نمونه‌ها از آب مقطر خارج و روی کاغذ صافی پهن شدند تا آب سطحی آنها خارج شود و سپس نمونه‌ها مجدداً وزن شده و در نهایت ظرفیت جذب مجدد آب از رابطه (۸) محاسبه شد.

$$RR = \frac{m_{AR}}{m_{BR}} \quad (8)$$

که در این معادله WRR نسبت جذب آب مجدد،  $m_{AR}$  وزن نمونه بعد از آب‌گیری (g) و  $m_{BR}$  وزن نمونه قبل از آب‌گیری (g) می‌باشد.

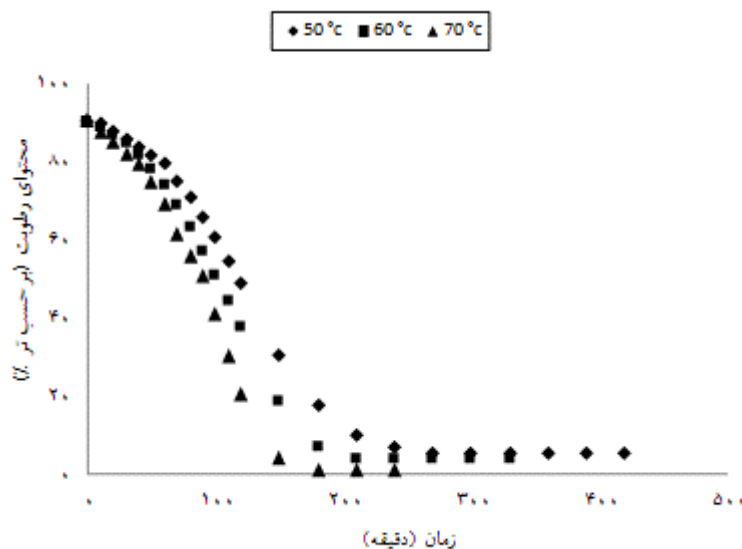
ویتامین ث: مقدار ویتامین ث نمونه‌ها توسط روش تیتراسیون ۲ و ۶- دی کلرو فنل اندو فنل انجام شد. در این آزمایش جهت تهیه محلول استاندارد مقدار مشخصی از ویتامین ث خالص در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل شد. برای تعیین میزان ویتامین ث در نمونه شاهد، مقدار مشخصی از محلول استاندارد نیز با معرف ایندوفنل تا ظهور رنگ قرمز کم رنگ (صورتی) تیتراژ شد. استخراج عصاره با



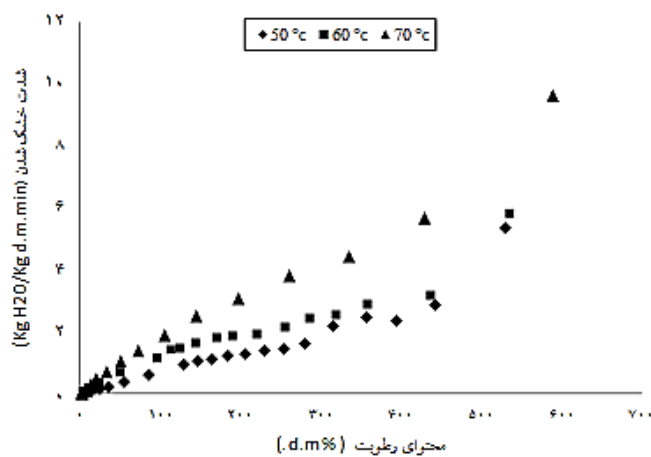
استفاده از اسید استیک ۹۹/۵ درصد ساخت شرکت دکتر مجللی انجام شد. برای استخراج عصاره ابتدا نمونه‌ها در ۳۰ میلی‌لیتر اسیداستیک قرار گرفتند، با همزن شیشه‌ای هم زده شده و سپس عصاره حاصله جهت انجام تیتراسیون، با کاغذ صافی جدا شد. عمل تیتراسیون عصاره حاصله نیز با معرف کلروفلن انجام گرفت (آکپینار و همکاران، ۲۰۰۶؛ دویماز و همکاران، ۲۰۰۶).

### نتایج و بحث

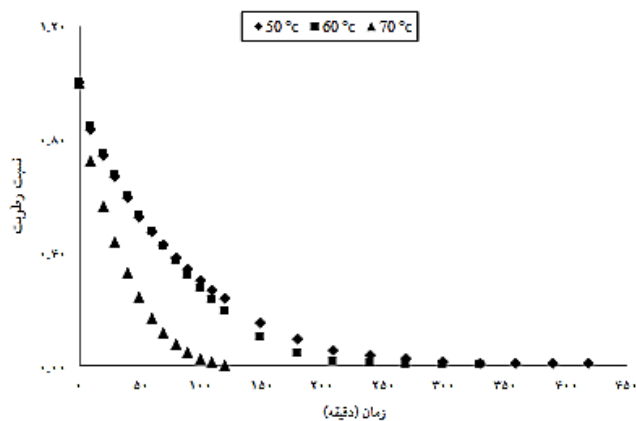
تأثیر دمای خشک کردن: در شکل ۱ تغییرات مقدار رطوبت در دماهای مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشخص است در ابتدای فرآیند خشک کردن آهنگ خشک کردن بالاست ولی با گذشت زمان به دلیل چروکیدگی بافت محتوای رطوبت به سرعت کاهش می‌یابد، ولی در مراحل بعدی کاهش محتوای رطوبت به آهستگی صورت می‌گیرد. همچنین زمان مورد نیاز برای کاهش یک مقدار معین از محتوای رطوبت، وابسته به شرایط عملیاتی است به طوری که در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد ۲۴۰ دقیقه و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد ۴۲۰ دقیقه به طول انجامید تا رطوبت به طور کامل از نمونه‌ها خارج شود.



شکل ۱- نمودار اثر دما بر زمان خشک شدن در فرآیند خشک کردن با هوای داغ



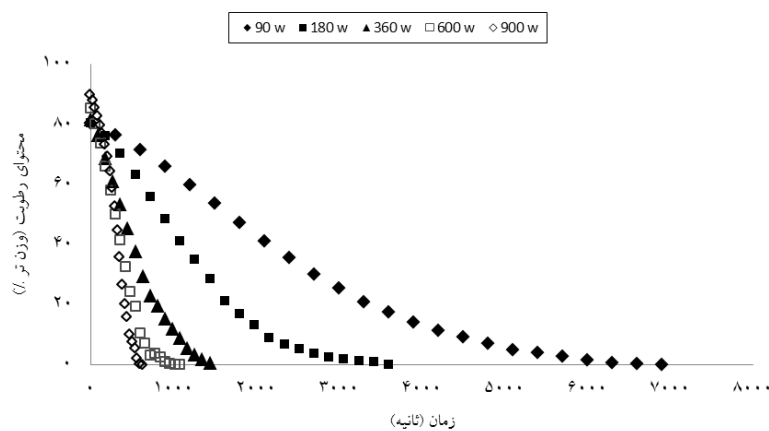
شکل ۲- نمودار اثر دما بر شدت خشک شدن در فرآیند خشک کردن با هوای داغ.



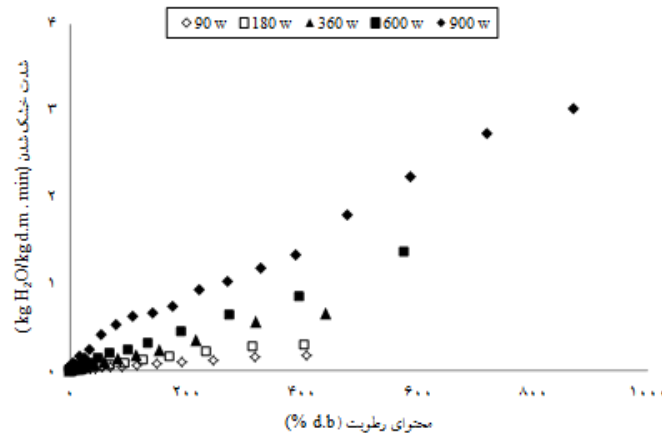
شکل ۳- نمودار نسبت رطوبت در فرآیند خشک کردن با هوای داغ

با توجه به نمودار شدت خشک شدن (شکل ۲) مشاهده می‌شود که شدت خشک کردن در ابتدای فرآیند بیشتر از مراحل انتهایی است که این امر به دلیل زیاد بودن مقدار رطوبت در ابتدای فرآیند خشک کردن و در نتیجه بالا بودن شدت تبخیر رطوبت از سطح قطعات جعفری است. همچنین چروکیدگی سطح محصول در مراحل انتهایی خشک کردن باعث ایجاد یک مقاومت در انتقال آب به سطح محصول شده که این امر باعث کاهش شدت خشک کردن در مراحل پایانی خشک کردن می‌شود. شکل ۳ نیز نسبت رطوبت در فرآیند خشک کردن با مایکروویو را نشان می‌دهد که همانند نمودارهای قبلی، اثر دما

بر نسبت رطوبت نیز معنی‌دار است. نتایج این تحقیق با نتایج دویماز و همکاران (۲۰۰۶)، کایا و آیدین (۲۰۰۹)، کاشانی نژاد و همکاران (۲۰۰۷) و درتای و ژو (۲۰۰۹) مطابقت داشت. **تاثیر توان مایکروویو:** اثر توان مایکروویو بر زمان خشک شدن در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با افزایش توان مایکروویو، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد؛ زیرا با کاهش فشار هوا دمای تبخیر آب پایین می‌آید و رطوبت داخل محصول در دمای پایین تری از آن خارج می‌شود.

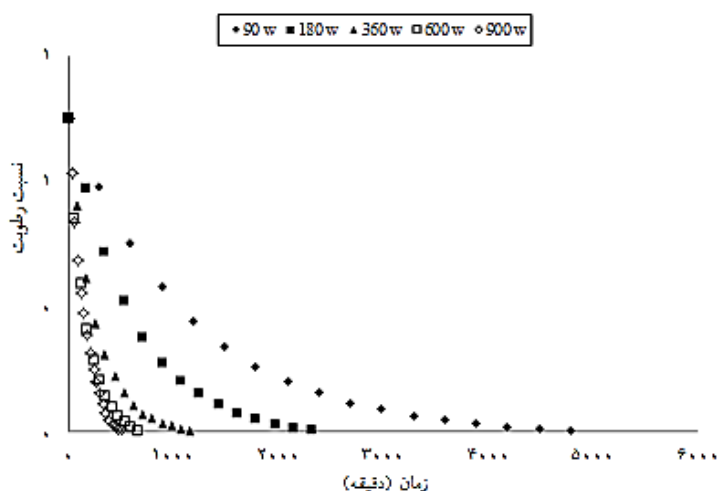


شکل ۴- نمودار اثر توان بر زمان خشک شدن در فرآیند خشک کردن با مایکروویو.



شکل ۵- نمودار اثر توان بر شدت خشک شدن در فرآیند خشک کردن با مایکروویو

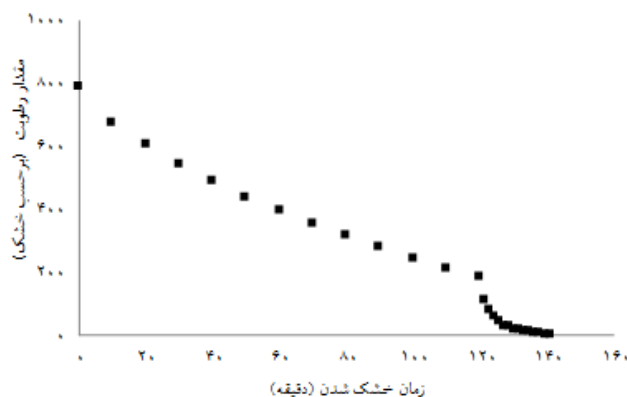
با توجه به شکل ۴ با کاهش میزان رطوبت از شدت خشک شدن کاسته می‌شود. زیرا رطوبت از مرکز نمونه باید به سطح منتقل و سپس تبخیر گردد. درجه حرارت هوا و شدت اشعه مایکروویو مهمترین عامل در کنترل خصوصیات کیفی محصول در حین خشک کردن است. تاثیر درجه حرارت هوای آون و شدت خشک‌کن مایکروویو بر خصوصیات کیفی جعفری خشک شده معنی‌دار بود.



شکل ۶- نمودار نسبت رطوبت در فرآیند خشک کردن با مایکروویو

شکل ۶ نمودار نسبت رطوبت در فرآیند خشک کردن جعفری با مایکروویو را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، اثر توان مایکروویو بر نسبت رطوبت نیز معنی‌دار است. نتایج حاصل با نتایج تحقیقات آکپینار و همکاران (۲۰۰۶)، دویماز و طغرل (۲۰۰۶)، ازبک و دادالی (۲۰۰۷) و درتای و ژو (۲۰۰۹) مطابقت داشت.

**تاثیر دما و توان در خشک کردن ترکیبی:** در روش خشک کردن با هوای داغ گرما از سطح خارجی محصول از طریق هدایت منتقل می‌شود و با بوجود آمدن پدیده سخت شدن سطحی و چروکیدگی انتقال گرما کند اتفاق می‌افتد و باعث افزایش قابل توجه زمان خشک شدن می‌شود.



شکل ۷- نمودار اثر دما و توان خشک کن بر زمان خشک شدن در فرآیند خشک کردن ترکیبی

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود منحنی خشک کردن در مرحله خشک کردن با مایکروویو شیب تندی به خود می‌گیرد که به دلیل سرعت زیاد خشک کردن در این مرحله است و علت آن این است که مکانیسم گرمایش مایکروویو حجمی است و باعث می‌شود که فرآیند گرمایش نسبت به روش‌های معمول گرمایش مانند جابه‌جایی با هدایت، خیلی سریع‌تر انجام می‌شود، به علاوه گرما در درون ماده تولید می‌شود. نتایج این تحقیق با نتایج ماسکن (۲۰۰۱) و آلیاس (۲۰۰۷) مطابقت داشت. اندازه‌گیری رنگ: نتایج و مقادیر حاصل از آزمایشات رنگ نشان داد که اثر نوع خشک کن بر پارامترهای رنگی  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  جعفری و نعنای خشک شده در سطح ۵ درصد معنی‌دار بوده است. همچنین نمونه‌های خشک شده با روش ترکیبی و روش مایکروویو اختلاف معنی‌داری با نمونه‌های خشک شده با هوای داغ داشتند. مقادیر مربوط به اندازه‌گیری پارامترهای رنگی  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- مقادیر مربوط به پارامترهای رنگی  $L^*$ ،  $a^*$ ،  $b^*$  در خشک کردن با هوای داغ و مایکروویو

شاخص رنگ	دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)								
	شاهد	۵۰	۶۰	۷۰	۹۰	۱۸۰	۳۶۰	۶۰۰	۹۰۰
$L^*$	۵۹/۴۸	۴۲/۶۹	۴۵/۱۹	۴۴/۶۲	۵۵/۱۳	۵۵/۴۸	۵۵/۹۳	۴۹/۲۱	۳۸/۳۳
$a^*$	-۲۲/۸۰	-۱۰/۲۹	-۱۴/۴۲	-۱۴/۷۹	-۱۶/۷۳	-۱۶/۲۴	-۱۷/۱۷	-۱۵/۵۹	-۱۳/۷۵
$b^*$	۲۸/۱۳	۱۴/۷	۲۱/۳۹	۲۱/۱۰	۲۱/۴۲	۲۰/۹۸	۲۵/۶۵	۱۹/۱۸	۱۷/۱۳

اندازه‌گیری رنگ نمونه‌ها (جدول ۲) نشان داد دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک‌کن هوای داغ و ۳۶۰ وات مایکروویو نسبت به دماها و شدت‌های بالاتر یا پایین‌تر خشک کردن، دارای مقادیر مطلوب تری می‌باشند. در مورد فاکتورهای  $a$ ،  $L$  و  $b$  مقادیر به‌دست آمده در ۶۰ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب ۱۵/۱۹، ۱۴/۰۴- و ۲۱/۳۹ و در ۳۶۰ وات ۵۵/۹۳، ۱۷/۱۷- و ۲۵/۶۵ می‌باشد. همچنین نتایج این تحقیق با نتایج آلیاس (۲۰۰۷) در مورد کدو حلوائی، آیسه (۲۰۱۱) در مورد گشنیز، دویماز و همکاران (۲۰۰۶) در مورد جعفری و شوید مطابقت داشت.

**اندازه‌گیری جذب مجدد آب:** بررسی نتایج آزمایشات جذب مجدد آب نشان داد که بین خشک کردن با هوای داغ و با مایکروویو در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری وجود دارد. در تمامی نمونه‌های خشک شده با مایکروویو، میزان جذب مجدد آب از نمونه‌های خشک شده با هوای داغ بیشتر بود. در حالت کلی پذیرفته شده است که مقدار جذب آب مجدد وابسته به درجه تخریب سلولی و ساختاری است (دویماز، ۲۰۰۴؛ ازبک و دادالی، ۲۰۰۷). به‌دلیل اینکه فرآیند جذب آب و مقدار آن نسبت مستقیم با بافت محصول و میزان تخلخل آن دارد، می‌توان نتیجه گرفت قدرت اشعه مایکروویو تغییرات بیشتری بر بافت نمونه‌ها دارد و باعث ایجاد تخلخل بیشتر در آن شده است. نتایج و مقادیر حاصل از آزمایشات جذب مجدد آب نشان داد که اثر نوع خشک‌کن بر روی میزان جذب مجدد آب جعفری خشک شده در سطح ۵٪ معنی‌دار بوده است. اما در میزان جذب آب نمونه‌های خشک شده با مایکروویو اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد ( $p < 0/05$ ). همچنین در بین تمامی نمونه‌های خشک شده با هوای داغ مایکروویو، بیشترین مقدار جذب مجدد آب مربوط به خشک کردن نمونه‌ها در توان ۹۰۰ وات مایکروویو بود که می‌تواند دلیل بر تخریب بیشتر بافت و ایجاد تخلخل بیشتر در نمونه‌های خشک شده در این توان با مایکروویو باشد. نتایج آزمایشات جذب مجدد آب در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- مقادیر نسبت جذب مجدد آب در نمونه‌های خشک شده با هوای داغ و مایکروویو

تیمار خشک کردن	مایکروویو (وات)					هوای داغ (درجه سانتی‌گراد)		
	۹۰۰	۶۰۰	۳۶۰	۱۸۰	۹۰	۷۰	۶۰	۵۰
جذب مجدد آب (درصد)	۵/۷۲	۵/۶۵	۵/۶۷	۵/۵۳۵	۵/۵۲	۴/۷۲	۴/۷۴۵	۴/۸۴۵

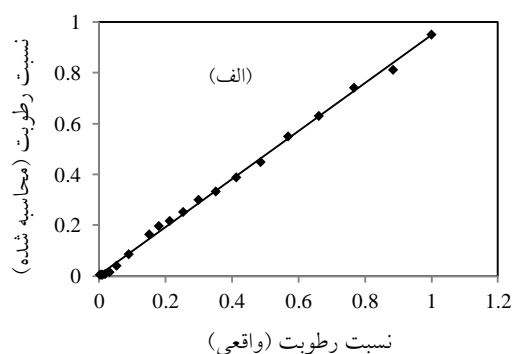
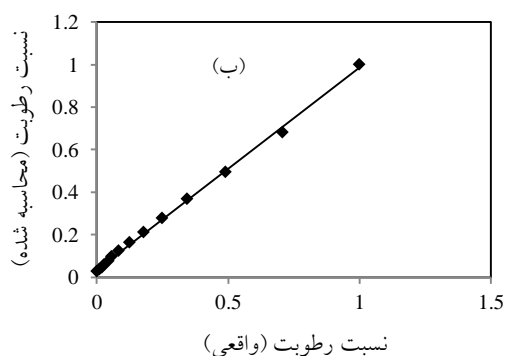
ژویتامین ث: مقادیر به دست آمده از آزمایشات اندازه گیری ویتامین ث در جدول ۴ آمده است. در تمامی نمونه های جعفری خشک شده با هوای داغ و مایکروویو، میزان ویتامین ث در نمونه های خشک شده با مایکروویو بیشتر از نمونه های خشک شده همان محصول با هوای داغ بود. چون بین مقدار ویتامین ث با نوع روش خشک کردن، دمای هوا و زمان فرآیند نسبت مستقیمی وجود دارد، می توان نتیجه گرفت دمای خشک کن هوای داغ اثرات بیشتری بر از دست رفتن ویتامین ث نمونه ها دارد. همچنین در آزمایشات اندازه گیری ویتامین ث بهترین مقادیر مربوط به نمونه های خشک شدن در ۶۰ درجه سانتی گراد و ۳۶۰ وات بودند که دلیل این امر مشابه نتایج حاصل از اندازه گیری پارامترهای رنگی نمونه های خشک شده، می تواند اثرات نامطلوب زمان طولانی تر سطوح پایین تر و قدرت بیشتر خشک کن در سطوح بالاتر باشد. نتایج تحقیق حاضر با نتایج آزمایشات دویماز و همکاران، ۲۰۰۶، کیمدان و لانگتون، ۲۰۰۲، ازبک و دادالی، ۲۰۰۷ و ازکان و همکاران، ۲۰۰۷ مطابقت داشت.

جدول ۴- مقادیر ویتامین ث (میلی گرم در گرم) در نمونه های خشک شده با هوای داغ و مایکروویو

مایکروویو (وات)					هوای داغ (درجه سانتی گراد)				
۹۰۰	۶۰۰	۳۶۰	۱۸۰	۹۰	۷۰	۶۰	۵۰	شاهد	تیمار خشک کردن
۲/۰۵	۲	۲/۱۵	۱/۸۵	۱/۷	۱/۳۵	۱/۶۵	۱/۵	۲/۵	ویتامین ث

مدل سازی فرآیند خشک کردن با هوای داغ و مایکروویو: در این مرحله، داده های تجربی حاصل از خشک کردن جعفری در شرایط مختلف (دماهای مختلف آون و شدت های مختلف مایکروویو) با مدل های نظری و تجربی برازش شدند. نتایج بدست آمده از برازش مدل های مورد آزمون در تمامی تیمارهای آزمایش نشان می دهد که مدل پیچ، برازش قابل قبولی با مقدار رطوبت در تیمارهای مختلف آزمایش دارند. مشابه این نتیجه توسط محققان دیگر نیز گزارش شده بود (آکپینار و همکاران، ۲۰۰۶). گرچه میزان شاخص های انتخاب مدل در برخی شرایط، برازش خوبی با مدل های دیگر داشت، ولی در بیشتر موارد، میزان برازش مدل پیچ در اکثر دماها و توان ها دارای مقادیر  $R^2$  بالاتر از ۰/۹۹ بودند و RMSE آن ها نسبت به سایر مدل ها پایین تر بود. در حالی که مقدار RMSE در اکثر مدل ها نزدیک بود ولی در مدل وانگ و سینگ پراکندگی شدیدی در RMSE دیده می شود. برای ارزیابی برازش مدل های ذکر شده با داده های آزمایش، علاوه بر بالا بودن ضریب  $R^2$ ، دو شاخص RMSE و MBE نیز برای بهترین برازش

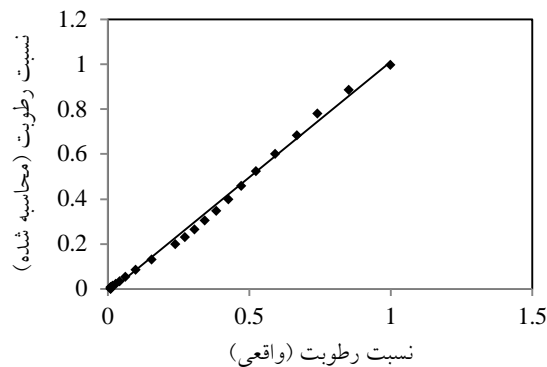
باید حداقل باشد. به عنوان نمونه، در شکل ۸، منحنی‌های تغییرات نسبت رطوبت واقعی در ۶۰ درجه سانتی‌گراد و ۳۶۰ وات آمده و نسبت رطوبت محاسبه شده با مدل پیچ در نمونه‌های خشک شده آمده است. این دو منحنی مشخص کننده میزان قابلیت مدل در پیش‌بینی نسبت رطوبت طی دوره کامل خشک کردن در این دو محصول است.



شکل ۸- نمودار نسبت رطوبت واقعی و محاسبه شده با مدل پیچ در جعفری خشک شده (الف) ۶۰ درجه سانتی‌گراد و (ب) ۳۶۰ وات

همچنین در شکل ۹ منحنی تغییرات نسبت رطوبت واقعی در روش ترکیبی و نسبت رطوبت محاسبه شده با مدل پیچ در نمونه‌های خشک شده آمده است. همانطور که دیده می‌شود، در همه نمودارها از جمله در روش ترکیبی، مدل پیچ برازش خوبی با داده‌های حاصل از نسبت رطوبت واقعی داشته به طوری که کمترین اختلاف در مقدار رطوبت واقعی و محاسبه شده با این مدل مشاهده می‌شود.





شکل ۹- نمودار نسبت رطوبت واقعی در روش ترکیبی و محاسبه شده با مدل پیچ

بر اساس تجزیه و تحلیل مدل‌های رگرسیونی، با قرار دادن ضرایب و ثابت مدل‌ها به صورت تابعی از دمای خشک کن، مدل نهایی خشک شدن جعفری بدست می‌آید که در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵- مدل های نهایی پیچ در روش خشک کردن هوای داغ و مایکروویو

دما و توان خشک کن	مدل نهایی
60°c	$MR = \exp(-0.010729282 * t^{1.04589085})$
360w	$MR = \exp(-0.00483663 * t^{0.8657})$

### نتیجه گیری

- در خشک کردن جعفری با هوای مشخص شد این روش به دلیل کند بودن سرعت تبخیر در آن مدت زمان زیادی طول می‌کشد تا رطوبت به‌طورکامل از محصول جدا شود که این خود باعث افت پارامترهای کیفی محصول نهایی آن می‌شود.
- به کارگیری انرژی مایکروویو علاوه بر جداسازی سریع آب ماده غذایی، موجب بهبود ویژگی‌های ساختمانی آن نسبت به هوای داغ می‌شود اما در شدت‌های بالا می‌تواند باعث برخی تغییرات نامطلوب در نمونه‌ها شود.
- دمای خشک کن هوای داغ و توان مایکروویو بر سرعت خشک شدن جعفری اثر مهمی دارد و با افزایش دما و توان خشک کن، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. همچنین، فرآیند خشک شدن در مرحله نزولی اتفاق می‌افتد.

۴. در فرآیند خشک کردن ترکیبی جعفری با هوای داغ و مایکروویو با افزایش کیفیت محصول نهایی، زمان فرآیند خشک کردن جعفری را تا حد قابل توجهی نیز کاهش دهد.
۵. مدل پیچ بهترین مدل برای توصیف رفتار خشک شدن جعفری می‌باشد.

#### منابع

- Aghajani, N., Kashaninezhad, M., Kadivar, M., and Hosseini, S.H. 2009. Effect of temperature and dryer type on physicochemical properties of barley malt (two varieties). *Journal of agricultural Sciences and Natural Resources*, 16: 147-157.
- Alibas, I. 2007. Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters pumpkin slice. *Journal of Food Science and Technology*, 8: 1445-145.
- Akpinar, K., Bicer, Y., and Cetinkay, F. 2006. Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun. *Journal of Food Engineering*, 3: 308-315.
- Akpinar E., Midilli A., and Bicer Y. 2003. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone and mathematical modeling. *Energy Convers Management*, 44: 1689–1705.
- Ayse, S. 2011. Microwave drying characteristics of coriander (*Coriandrum sativum* L.) leaves. *Energy Conversion and Management*, 2: 1449-1453.
- Doymaz, I. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61: 359-364.
- Doymaz, I., Tugrul, N., and Pala, M. 2006. Drying characteristics of dill and parsley leaves. *Journal of Food Engineering*, 3: 559-565.
- Henderson, S. 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. Transactions of ASAC. New Delhi, India.
- Henderson, S., and Pabis, S. 1961. Grain drying theory. 1. Temperature affection drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineers*, 6: 169-70.
- Karaaslan, S.N., and Tunçer, İ.K. 2008. Development of a drying model for combined microwave–fan-assisted convection drying of spinach. *Bio system Engineering*, 1: 44-52.
- Kashaninejad, M., Mortazavi, M., Safekordi, M., and Tabil, L.G. 2007. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, 78: 98-108.
- Krokida, M.K., Karathanos, V.T., and Maroulis, Z.B. 1998. Effect of Freeze drying condition on shrinkage and porosity of dehydrated agriculture products. *Journal of Food Engineering*, 35: 369-380.

- Özbek, B., and Dadali, G. 2007. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, 4: 541–549.
- Ozkan, A., Akbudak, B., and Akbudak, N. 2007. Microwave drying characteristics of spinach. *Journal of Food Engineering*, 2: 577-583.
- Page, G. 1949. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. Lafayette, Purdue University.
- Soysal, Y., Öztekin, S., and Eren, Ö. 2006. Microwave Drying of Parsley: Modelling Kinetics, and Energy Aspects. *Bio systems Engineering*, 4: 403-413.
- 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*, 3: 482-489.
- Togrul, I., and Pehlivan, D. 2004. Modelling of thin-layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65: 413–425.
- Verma, L. R., Bucklin, R.A., Endan, J.B., and Wratten, F.T. 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*. 28: 296–301
- Wang, C. Y., Singh, R.P. 1978. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Transactions of ASA Engineers*, 11: 668-672.
- Westerman, P.W., White, G.M., and Ross, I. J. 1973. Relative humidity effect on the high temperature drying of shelled Corn. Trans. ASAE. University of Kentucky, America.
- Yurena Hernandez, M., Labo, G., and Monica G. 2005. Determination of vitamin c in tropical fruits: A comparative evaluation of methods, food chemistry.
- Zirjani, L., and Tavakolipur, H. 2006. Production of banana chips using the combination hot air and microwave methods. *Iranian Journal of Food Science and Technology Research*. 6: 57-68 (in Persian).



## Optimization of drying process of parsley using the combination of hot air and microwave methods

**M. Noori<sup>1</sup>, M. Kashaninejad<sup>2</sup>, \*A. Daraei Garme khani<sup>3</sup> and M. Bolandi<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>M.Sc graduated of Food Technology, Islamic Azad University, Damghan Branch,  
<sup>2</sup>Associate Prof., College of Food Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natral Resources, <sup>3</sup>Lecturer, Dept. of Food Technology, Islamic Azad University, Azadshahr Branch, <sup>4</sup>Assistant Prof., Dept. of Food Technology, Islamic Azad University, Damghan Branch

### Abstract

Combination method took place with quality tests of dried samples. The drying data of parsley with hot air and microwave methods was fitted with eight models: Page, Newton, Henderson and Pabis, Logarithmic, Midilli et al., Two-term exponential, Verma et al. and Wang and singh. Results showed that page model have the best description for drying belongs of parsley. The checking the combination process and the qualitative testing of the final product showed that using of the microwave energy as the final drying process leads to many different and favorable aspects. This method can significantly improve the quality parameters such as color, rehydration and the amount of vitamin C and also it reduces the drying time of parsley. Longest drying time of parsley was in drying with hot air at 50 °c that which lasted 420 minutes. This time in combination drying process in order was reduce the 43.66% in drying time of parsley than drying with hot air in 50 °c.

**Keywords:** Optimization, parsley, combination drying, modeling

---

\*Corresponding author; amirdaraey@yahoo.com