

## پیش‌بینی محتوای رطوبت در طی فرایند خشک کردن گیاه کلم‌سر به وسیله امواج مایکروویو در بستر سیالی

بیژن هنرور<sup>۱\*</sup>، یوسف رحیمی کشکولی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مرودشت، مرودشت، ایران

honarvar2@gmail.com

<sup>۲</sup> عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گچساران، گچساران، ایران

Yousef.rk84@gmail.com

**چکیده:** با توجه به اهمیت خشک کردن مواد غذایی، حساسیت دمایی آن‌ها و هزینه‌های این فرایند، نیاز به یافتن روش‌هایی نو است که بتواند پارامترهای گوناگون در این فرایند را مورد ارزیابی قرار داده و رویه‌ای بهینه را بر خشک کردن نمونه‌ها به دست آورد. در این تحقیق توانایی خشک کردن گیاه کلم‌سر در یک بستر سیالی در ترکیب با هوای جابه‌جایی و امواج مایکروویو با استفاده از طرح آماری رویه پاسخ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سه پارامتر توان مایکروویو، دمای هوای ورودی و دبی هوای ورودی در مقادیر مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. بهینه سه پارامتر مذکور به ترتیب برابر با توان مایکروویو ۹۰۰ وات، دمای هوای ورودی ۶۰°C و دبی هوای ورودی ۱۸۰۰ SCFH به دست آمده که در این شرایط بهترین مدت زمان خشک شدن گیاه کلم‌سر برابر با ۷/۶۲ دقیقه است. ضریب همبستگی مدل محاسباتی یا  $R^2$  (adj) برای مدت زمان خشک شدن ۰/۹۹۹۵ به دست آمده که نشان‌دهنده تطابق بسیار عالی نتایج آزمایشگاهی با مدل به دست آمده است.

**واژه‌های کلیدی:** خشک کردن، مایکروویو، بستر سیالی، گیاه کلم‌سر، طرح رویه پاسخ.

## ۱. مقدمه

تکنیک‌های خشک کردن برای دستیابی به محصولات جدید، ظرفیت بیشتر، کنترل کیفیت، کاهش اثرات زیست‌محیطی، ایمنی عملیات، راندمان بیشتر مصرف انرژی، سرمایه اولیه و هزینه عملیاتی کمتر ارائه شده است. در این میان بسترهای سیالی برای خشک کردن محصولات به‌خصوص برای مواد دارویی، مواد غذایی و محصولات کشاورزی یکی از مؤثرترین روش‌ها در صنایع بوده است. فرایند خشک کردن محصولات در بسترهای سیالی، همراه با افزایش انتقال جرم و حرارت، کاهش زمان خشک شدن و کیفیت بهتر محصولات است.

امواج مایکروویو فرکانس بالایی دارند؛ این امواج الکترومغناطیس ترکیبی از الکتروسیسته و میدان مغناطیسی است. محدوده فرکانس امواج مایکروویو از ۳۰۰ MHz تا ۳۰۰ GHz است [۱۰]. امواج مایکروویو توسط میدان الکتریکی متناوب بین دو صفحه که حاوی بار مخالف هم هستند، تولید می‌شود. فرکانس اجاق مایکروویو، در ۲۴۵۰ MHz برای اجاق‌های خانگی ثابت شده است؛ اگرچه ممکن است این مقدار به ۹۱۵MHz نیز برسد. طول موج اجاق مایکروویو با فرکانس ۲۴۵۰MHz برابر با ۱۲/۸ cm است [۱۱]. از مزیت‌های خشک کردن با مایکروویو این است که در گرمایش جزء آب به‌صورت انتخابی عمل می‌کند، چراکه فعالیت دی‌الکتریکی (عایقی) آب نسبت به بیشتر ترکیبات جامد بیشتر است [۱۲].

عموماً خشک کردن مواد غذایی با رطوبت بیش از ۲۰ درصد با مایکروویو اقتصادی نیست و روش‌های گرمایش متداول برای حذف آب مؤثرتر از مایکروویو است. این در نتیجه این واقعیت است که گرچه آب به‌علت دارا بودن خاصیت دوقطبی می‌تواند امواج مایکروویو را به‌راحتی جذب کند، به‌علت داشتن گرمای ویژه بالا، انرژی زیادی از مایکروویو را صرف بالا بردن دما و آب‌زدایی از نمونه خواهد کرد [۱۳]. این مکانیسم از خشک کردن مایکروویو کاملاً متفاوت از روش‌های خشک کردن متداول است. در فرایندهای خشک کردن سنتی و متداول مصرف انرژی بسیار زیاد است، بنابراین می‌بایست سیستم‌های خشک‌کن را به‌گونه‌ای طراحی کرد که انرژی مصرفی کاهش یابد. برای این منظور می‌توان از ترکیب دو روش جابه‌جایی و تشعشع استفاده کرد تا مقدار انرژی مصرفی بهینه شده و زمان خشک شدن نیز کاهش یابد. ترکیب خشک کردن با استفاده از هوای جابه‌جایی و امواج مایکروویو از جمله روش‌هایی است که می‌تواند توانایی تکنولوژی خشک کردن را افزایش دهد. استفاده همزمان جابه‌جایی و امواج مایکروویو یک مزیت برای موادی که نسبت به دما حساس‌اند (از قبیل مواد غذایی) در بر خواهد داشت [۱۴] و [۱۵].

خشک کردن در واقع به حذف آب از مواد مختلف با استفاده از گرما یا به عبارت دیگر حذف ترکیبات فرار (معمولاً منظور از ترکیبات فرار اصلی، آب است) از یک مخلوط که محصول جامد هدف نهایی باشد، اطلاق می‌شود [۱]. خشک کردن یا آبیگری یکی از روش‌های نگهداری و ذخیره مواد غذایی است که با استفاده از آن علاوه بر جلوگیری از فساد ماده غذایی به‌وسیله میکروارگانیسم‌ها یا واکنش‌های شیمیایی، وزن ماده غذایی کاهش یافته و صرفه‌جویی بسیاری در هزینه‌های حمل‌ونقل و نگهداری حاصل می‌شود. برای کاهش آب مواد غذایی تا حدی که در طولانی‌مدت قابل نگهداری باشند، به‌ویژه آن‌هایی که دارای ترکیبات قندی هستند (نظیر میوه‌ها)، زمانی طولانی و دمایی نسبتاً بالا مورد نیاز است. همین عوامل موجب بروز برخی تغییرات نامطلوب می‌شود که از جمله می‌توان به تغییرات رنگ، طعم، عطر، کاهش مواد مغذی، افزایش وزن مخصوص (به‌علت چروکیدگی) و کاهش ظرفیت آبیگری مجدد محصول خشک‌شده اشاره کرد [۲، ۳ و ۴]. به‌طور کلی، یکی از روش‌های تقسیم‌بندی خشک کردن، براساس روش به‌کارگیری گرماسست. در حالت کلی چهار روش گرمایش وجود دارد: هدایت، جابجایی، تشعشعی و دی‌الکتریکی (نارسانای الکتریکی). عمده خشک‌کن‌های گرمایشی به‌صورت هدایت حرارتی عمل می‌کنند و گرما به‌صورت تماس مستقیم با جسم هدف به‌صورت گاز داغ که عمدتاً هواست، به‌کار گرفته می‌شود. یک مثال از خشک‌کن ترکیبی هدایتی و همرفتی، خشک‌کن با بستر سیالی است [۱]. اگر موادی که قرار است خشک شوند، خیلی نازک یا خیلی تر باشد، آنگاه شاید روش هدایت حرارتی با تماس مستقیم گرما با سطوح را بتوان به‌کار برد. تشعشع الکترومغناطیسی را که محدوده طول موج آن از تشعشع خورشیدی تا امواج مایکروویو قرار دارد، نیز می‌توان به‌منظور نفوذ گرما تا عمق ماده به‌کار برد. در گرمایش دی‌الکتریکی (مواد نارسانای الکتریکی)، انرژی درون ماده مرطوب پخش می‌شود. یک مثال از خشک‌کن دی‌الکتریکی، خشک کردن مایکروویو است [۵]. از جمله روش‌های خشک کردن که در صنعت کاربرد دارند عبارت است از: خشک کردن انجمادی، خلأ، اسمزی، محفظه یا سینی، بستر سیالی، بستر ناودانه‌ای، مایکروویو و مادون قرمز و یا ترکیبی از این‌ها [۶]. بعضی از آن‌ها مانند خشک کردن تصعیدی به‌علت هزینه‌های زیاد تولید، فقط برای محصولات بسیار با ارزش در داروسازی و بیوتکنولوژی به‌کار می‌روند و عملاً درخصوص مواد غذایی کاربرد چندانی ندارند [۴، ۷، ۸ و ۹].

در طول سال‌های متمادی، تحقیقات و مقالات زیادی درباره

## ۲.۲. دستگاه آزمایشگاهی

یک دستگاه خشک‌کن بستر سیالی ترکیبی در مقیاس آزمایشگاهی با دو منبع حرارتی جابه‌جایی هوای داغ و انرژی امواج مایکروویو طراحی و ساخته شد تا آزمایش‌های لازم برای خشک کردن نمونه‌های مواد غذایی و کشاورزی در آن انجام گیرد.

دستگاه آزمایشگاهی شامل یک کمپرسور با مشخصه ( hertz kompressoren, product by Germany)، یک مخزن فلزی هوا با دو هدف نگهداری هوای فشرده و موج‌گیر، یک شیر کنترل به منظور تنظیم دبی هوای ورودی، یک دستگاه روتامتر کالیبره شده به منظور اندازه‌گیری دبی هوای عبوری از خطوط، یک دستگاه هیتر برقی مجهز به کویل حرارتی با قابلیت تنظیم دما روی پانل با حداکثر دمای  $^{\circ}\text{C}$  ۱۰۰ و حداقل دمای اتاق، یک دستگاه مایکروویو با مشخصات (LG-CC-4284BR) و ظرفیت حجمی تقریبی ۰/۰۷۵ مترمکعب، خروجی توان حداکثر ۹۰۰ وات که قابلیت تنظیم توان‌های ۱۸۰، ۵۴۰ و ۹۰۰ وات و دمای محفظه و زمان تولید موج را نیز دارد و یک ستون استوانه‌ای از جنس شیشه پیرکس به عنوان بستر سیالی با طول ۳۵ سانتی‌متر و قطر ۷۸ میلی‌متر که درون محفظه مایکروویو قرار می‌گیرد. همچنین در انتهای پایینی این استوانه شیشه‌ای نیز یک صفحه مشبک برای توزیع یکنواخت هوا و جلوگیری از تخلیه مواد و ذرات از انتهای بستر تعبیه شده است و در نهایت، هوای داغ مرطوب از انتهای محفظه مایکروویو با عبور از یک دالان متقاطع و به کمک یک دمنده خارج می‌شود. طرح‌واره دستگاه عملیاتی در شکل (۱) نشان داده شده است.

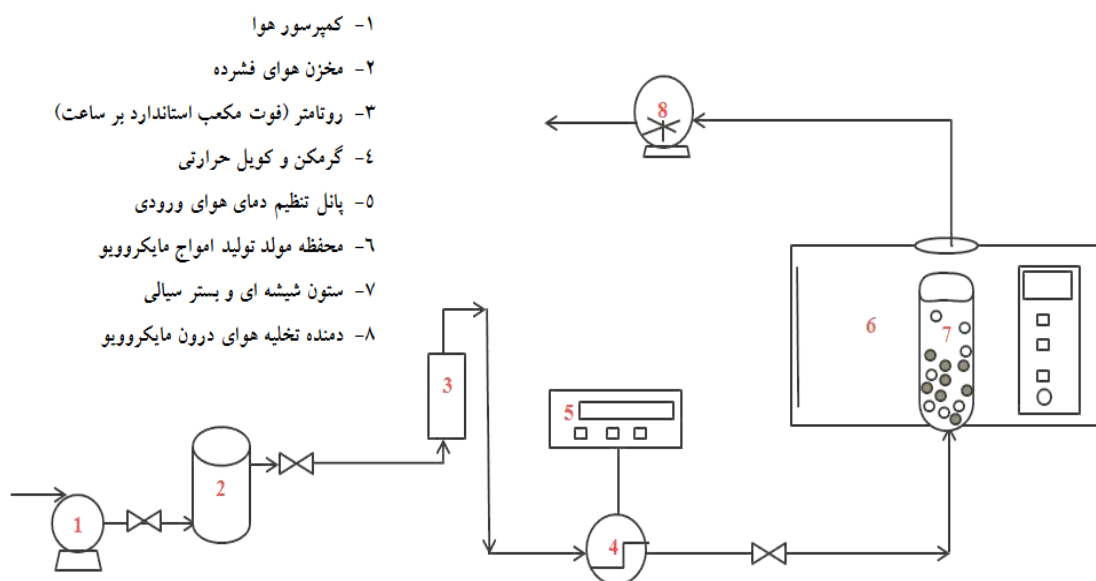
هوای گرم به تنهایی یک روش نسبتاً مناسب برای خارج کردن رطوبت روی سطح ماده است، در صورتی که عمل منحصربه‌فرد انرژی مایکروویو در خارج کردن رطوبت داخلی محصول یک روش فوق‌العاده در فرایند خشک کردن محسوب می‌شود. ترکیب صحیح این دو عملیات امکان افزایش راندمان و شرایط اقتصادی بهتری را در فرایند خشک کردن فراهم می‌کند. ترکیب بستر سیالی و مایکروویو در واقع عیب‌های یکدیگر را به نوعی می‌پوشانند. ترکیبی از دو روش می‌تواند منجر به چندین نتیجه مطلوب شود، ایجاد یک دمای یکنواخت در ذرات با استفاده از سیالیت بستر [۲] و کاهش زمان خشک شدن با کمک انرژی مایکروویو [۱۶ و ۱۷].

هدف از این تحقیق، بررسی رفتار خشک شدن گیاه کلم‌سر در یک بستر سیالی در ترکیب با منابع گرمایی جابه‌جایی و مایکروویو است. در این مطالعه تأثیر پارامترهایی همچون دمای هوای ورودی، توان خروجی مایکروویو، دبی هوای ورودی روی پاسخ‌های آزمایشگاهی مانند رطوبت ماده، توزیع دمای درون ماده، چروکیدگی و زمان خشک شدن در طول فرایند مورد بررسی قرار داده می‌شود.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. تهیه مواد اولیه

برای بررسی رفتارهای جرمی و حرارتی خشک کردن به روش ترکیبی مایکروویو و بستر سیالی از گیاه کلم‌سر با نام علمی Brassica Oleracea var. Gongylodes که از جمله صیفی‌جات است و از بازار محلی شیراز تهیه شده، استفاده گردیده است.



شکل (۱): طرح‌واره عملیاتی دستگاه خشک‌کن

هریک از متغیرها آزمایش‌ها طراحی کرده و چیدمان آن‌ها و نتایج به‌دست‌آمده برای مدت زمان خشک شدن گیاه کلم‌سر در جدول (۲) ارائه شده است. جدول (۲) آرایش روش CCD را با ۶ تکرار در نقطه مرکزی نشان می‌دهد.

متغیرهای مستقل	علائم	مقادیر گذشته و واقعی		
		-۱	۰	+۱
توان مایکروویو (Watt)	A	۱۸۰	۵۴۰	۹۰۰
دمای هوای ورودی (°C)	B	۴۰	۵۰	۶۰
دبی هوای ورودی (SCFH)	C	۱۱۰۰	۱۴۵۰	۱۸۰۰

جدول (۲): چیدمان روش CCD و مقایسه نتایج واقعی و پیش‌بینی شده برای گیاه کلم‌سر

شماره آزمایش	متغیرهای مستقل (مقادیر گذشته)			مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده برای مدت زمان خشک شدن
	A	B	C	Y
۱	-۱	-۱	-۱	۲۹/۱۰ (۲۹/۱۱)
۲	+۱	-۱	-۱	۰۹/۶۴ (۰۹/۵۳)
۳	-۱	+۱	-۱	۲۰/۶۶ (۲۰/۵۶)
۴	+۱	+۱	-۱	۰۸/۲۰ (۰۸/۲۹)
۵	-۱	-۱	+۱	۲۴/۲۰ (۲۴/۷۹)
۶	+۱	-۱	+۱	۰۹/۷۱ (۰۹/۷۸)
۷	-۱	+۱	+۱	۱۵/۲۰ (۱۵/۲۸)
۸	+۱	+۱	+۱	۰۷/۶۲ (۰۷/۵۸)
۹	-۱	۰	۰	۲۲/۵۰ (۲۲/۶۲)
۱۰	+۱	۰	۰	۰۹/۰۰ (۰۸/۹۸)
۱۱	۰	-۱	۰	۱۶/۲۰ (۱۶/۳۲)
۱۲	۰	+۱	۰	۱۱/۰۰ (۱۰/۹۵)
۱۳	۰	۰	-۱	۱۴/۶۰ (۱۴/۷۱)
۱۴	۰	۰	+۱	۱۲/۲۰ (۱۲/۱۹)
۱۵	۰	۰	۰	۱۳/۵۰ (۱۳/۶۴)
۱۶	۰	۰	۰	۱۳/۷۰ (۱۳/۶۴)
۱۷	۰	۰	۰	۱۳/۸۰ (۱۳/۶۴)
۱۸	۰	۰	۰	۱۳/۶۰ (۱۳/۶۴)
۱۹	۰	۰	۰	۱۳/۶۰ (۱۳/۶۴)
۲۰	۰	۰	۰	۱۳/۸۰ (۱۳/۶۴)

مدل اولیه پیشنهادی و پیش‌فرض به‌صورت Full quadratic با در نظر گرفتن تمامی ترم‌ها به صورت معادله (۱) در نظر گرفته می‌شود. داده‌های آزمایشگاهی به‌دست‌آمده با معادله زیر مطابقت داده می‌شود:

### ۳.۲. روش انجام آزمایش‌های خشک کردن

کلم‌های خرد شده درون ظرف سربسته‌ای به مدت ۲۴ ساعت قبل از آزمایش در دمای ۴۰C نگهداری می‌شوند. قبل از شروع هر آزمایش به‌منظور رساندن سیستم به حالت پایا، سیستم برای مدت ۱۵ تا ۲۰ دقیقه به‌صورت پیوسته در حالت کار کردن قرار می‌گیرد. سپس با برداشت نمونه‌ها از درون یخچال و وزن کردن آن با ترازوی دیجیتال به میزان ۵۰ گرم برای هر آزمایش به‌علاوه ۷۵ گرم دانه شیشه‌ای، همه را درون ستون بستر ریخته و مجدد کل مجموعه (ستون بستر سیالی، دانه‌های شیشه‌ای و قطعات کلم) وزن می‌شود. علاوه‌براین مایکروویو روی توان دلخواه و زمان مورد نظر تنظیم می‌گردد. برای به‌دست‌آوردن پاسخ‌های سیستم از جمله جرم، دمای سطح نمونه، دمای مرکز نمونه، قطر و طول، باید ستون بستر را به‌صورت offline از محفظه مایکروویو خارج کرد تا بتوان جرم و دما و طول را اندازه گرفت. در این میان باید مد نظر داشت که در هر بار که بستر از مایکروویو خارج می‌شود، باید در مدت ۱۰ ثانیه کل داده‌ها را برداشت کرد. جرم بستر (مجموع اجرام، استوانه شیشه‌ای، دانه‌های شیشه‌ای و نمونه خشک‌شونده) را به‌وسیله ترازو و دمای سطح و مرکز خشک‌شونده را به‌وسیله ترمومتر LutronK-type و طول و قطر نمونه در زمان‌های مختلف توسط کولیس دیجیتالی اندازه می‌شود. هدف از اندازه‌گیری جرم، بررسی سرعت خشک شدن و کاهش رطوبت موجود در نمونه، هدف از اندازه‌گیری دما بررسی رفتارهای انتقال حرارت و همچنین هدف از اندازه‌گیری قطر و طول بررسی چروکیدگی و چگالی نمونه در طول فرایند است.

### ۴.۲. طراحی آزمایش‌ها

در این تحقیق، از روش CCD<sup>۱</sup> برای طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است. هدف این تحقیق بررسی و بهینه‌سازی مدت زمان خشک شدن گیاه کلم‌سر است. طبق بررسی‌های انجام‌شده، سه پارامتر توان مایکروویو، دمای هوای ورودی و دبی هوای ورودی بیشترین تأثیر را نسبت به سایر پارامترها در خشک شدن گیاهان دارند؛ از این‌رو برای بهینه‌سازی مدت زمان خشک شدن سه پارامتر مذکور با توجه به روش استفاده‌شده برای طراحی آزمایش‌ها به‌عنوان متغیرهای مورد نظر و با سه سطح در مقادیر کد شده (+۱ و ۰ و -۱) و مقادیر واقعی، مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شد.

با استفاده از روش CCD و با کمک بسته نرم‌افزاری Design Expert (Version 7.0., USA) و سطوح در نظر گرفته شده برای

#### 1. Central Composite Design

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

که در آن  $y$  و  $\varepsilon$  به ترتیب پاسخ به دست آمده و خطای تصادفی است.  $x$ ها بیان کننده متغیرهای مستقل انتخاب شده در مقادیر گذشته هستند.  $\beta$ ها ضرایب معادله اند و برای برازش و محاسبه ضرایب معادله لازم است که داده های تجربی به دست آمده با استفاده از رگرسیون و آنالیز واریانس<sup>۱</sup> (ANOVA) تحلیل شود. بدین منظور رگرسیون و تحلیل واریانس با استفاده از بسته نرم افزاری Design Expert 7.0 انجام گرفت.

## ۵.۲. بررسی تأثیر نسبت طول به قطر ذرات کلم بر توزیع

### دمای درون آن در طول فرایند خشک شدن

یکی دیگر از پارامترهایی که در این تحقیق مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته شده، پارامتر نسبت طول به قطر ذرات است. با توجه به اینکه شکل هندسی که از کلم برای خشک کردن استفاده شده استوانه ای شکل است، با در نظر گرفتن نسبت قطر به طول این استوانه در نسبت های ۵/۵ و ۲ به بررسی تأثیر هریک از این نسبت ها روی دمای نمونه در طول فرایند خشک شدن پرداخته می شود. این آزمایش در دمای ۶۰°C، دبی SCFH ۱۸۰۰ و قدرت مایکروویو ۹۰۰ وات انجام شده است.

## ۳. نتایج و بحث

### ۳.۱. تحلیل آزمایش ها و مدلسازی پارامترهای مؤثر بر

#### فرایند مدت زمان خشک شدن کلم سر:

مطابق آنچه در قسمت مواد و روش ها، همچنین قسمت طراحی آزمایش ها گفته شده است، آزمایش ها طبق جدول طراحی شده روش CCD، با در نظر گرفتن سه متغیر توان مایکروویو، دمای هوای ورودی و دبی هوای ورودی برابر با ۲۰ آزمایش همراه با ۶ بار تکرار در نقطه مرکزی، برای کاهش خطا انجام گرفت. جدول آزمایش های طراحی شده با توجه به متغیرهای فرض شده به صورت کد شده و نتایج به دست آمده برای مدت زمان خشک شدن گیاه کلم سر مطابق جدول (۲) آورده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده ارائه مدلی مناسب بر اساس مدل اولیه (معادله ۱) ضروری است. همان طور که گفته شد، مدل اولیه به صورت Full quadratic در نظر گرفته می شود. به عبارت دیگر فرض اولیه و پیشنهادی، مؤکد بر مؤثر بودن تمامی ترم ها (متغیرها با توان اول و دوم و اثر متقابل متغیرها) و در نظر گرفتن آن ها در مدل بود. ولی در عمل برخی از ترم های در نظر گرفته شده در مدل اضافی بوده و باید حذف شوند، لذا احتیاج به یک تحلیل آماری برای مشخص کردن

ترم های مؤثر از غیر مؤثر است. این تحلیل با استفاده از آزمون فرض و پارامتر P-value انجام می شود. محاسبات مربوطه توسط نرم افزار Design Expert 7.0 انجام داده شد و پس از حذف ترم های غیر مؤثر جدول تحلیل آماری (۳) ارائه می گردد.

در جدول (۳)، احتمال P (P-Value) و احتمال F (F-Value) مقادیر عددی تعیین کننده در پذیرش یا رد فرض آماری مورد نظر است. مهم ترین قسمت در جدول تحلیل آماری در بخش آنالیز واریانس ها، پارامتری به نام نقص پوشش یا Lack of fit است. این پارامتر نشان دهنده مناسب بودن یا نامناسب بودن مدل است. مقادیر کوچک P و بزرگ F بیانگر نامناسب بودن مدل محاسباتی است و چنانچه مقدار P کوچک تر از ۰/۰۵ باشد، به صورت کلی مدل را باید کنار گذاشت. با توجه به جدول (۳) مقدار P و F پارامتر Lack of fit مدل برای مدت زمان خشک شدن برابر است با P= ۰/۴۳۳۶ و F= ۱/۱۹ به دست آمده است که با توجه به توضیحات داده شده، بیانگر مناسب بودن مدل های محاسباتی است.

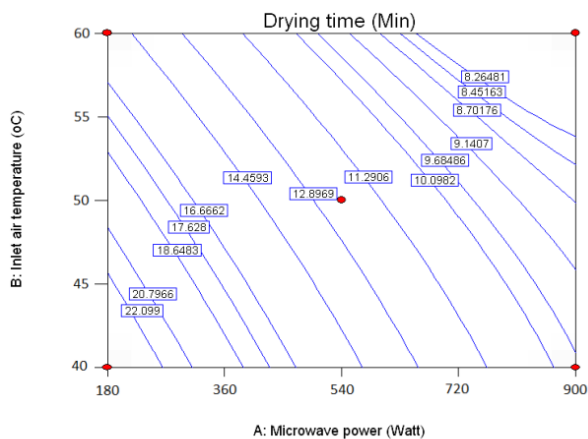
جدول (۳): نتایج آنالیز واریانس برای مدت زمان خشک کردن گیاه کلم سر به وسیله امواج مایکروویو

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	احتمال F	احتمال P
مدل	۶۱۱/۸۱	۸	۴۷۲۴/۰۱	۰/۰۰۰۱
A	۴۶۵/۰۳	۱	۲۸۷۲۵/۵	۰/۰۰۰۱
B	۷۲/۱۸	۱	۴۴۵۸/۸۸	۰/۰۰۰۱
C	۱۵/۷۹	۱	۹۷۵/۵۵	۰/۰۰۰۴
AB	۲۶/۶۹	۱	۱۶۴۸/۸۳	۰/۰۰۰۱
AC	۱۰/۴۷	۱	۶۴۶/۸۸	۰/۰۰۰۱
BC	۰/۴۶	۱	۲۸/۲۶	۰/۰۰۰۲
A <sup>2</sup>	۱۴/۹۹	۱	۹۲۵/۸۲	۰/۰۰۰۱
B <sup>2</sup>	-	-	-	-
C <sup>2</sup>	۰/۱۱	۱	۰۶/۸۲	۰/۰۲۴۲
باقیمانده	۰/۱۸	۱۱	-	-
نقص پوشش	۰/۱۰	۶	۱/۱۹	۰/۴۳۳۶
خطای خالص	۰/۰۷۳	۵	-	-

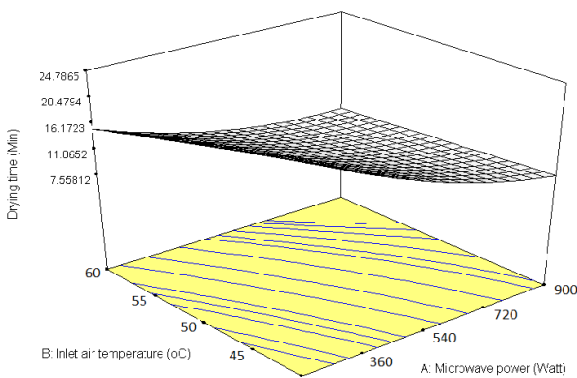
معادله (۲) مدل محاسباتی برای مدت زمان خشک شدن را با توجه به ضرایب محاسبه شده که در جدول (۴) الف آمده است نشان می دهد.

۲.۳. نمودارهای سطح سه‌بعدی (Surface plots) و مسطح (Contour)

نمودارهای شکل (۲) و (۳) مدت زمان خشک شدن کلم به وسیلهٔ امواج مایکروویو در بستر سیالی را در برابر متغیرهای مختلف به صورت سه‌بعدی و مسطح نشان می‌دهد. این اشکال فضایی با استفاده از نقاط آزمایش شده و همچنین درون‌یابی سایر نقاط با استفاده از مدل محاسباتی صورت می‌گیرد. شکل (۲) نمودار سطح سه‌بعدی و مسطح مدت زمان خشک شدن را برای اثر متقابل دو فاکتور توان مایکروویو و دمای هوای ورودی نشان می‌دهد. در این شکل‌ها توان مایکروویو و دمای هوای ورودی فاکتورها متغیرند و دبی هوای ورودی فاکتور ثابت و به طور انتخابی در بالاترین سطح یعنی SCFH ۱۸۰۰ ثابت نگه داشته شده است. شکل (۳) این نمودارها را برای مدت زمان خشک شدن و برای اثر متقابل دو فاکتور توان مایکروویو و دبی هوای ورودی نشان می‌دهد. در این شکل‌ها توان مایکروویو و دبی هوای ورودی فاکتورهای متغیر و دمای هوای ورودی فاکتور ثابت و به طور انتخابی در بالاترین سطح یعنی ۶۰ °C ثابت نگه داشته شده است.



الف.



ب.

شکل (۲): (الف) مدت زمان خشک شدن، (ب) توان مایکروویو و دمای هوای ورودی

$$Y = 13/637 A - 6/819 B - 2/686 C + 2/164 A^2 - 0/185 C^2 + 1/826 AB + 1/144 AC - 0/239 BC \quad (2)$$

ضریب همبستگی مدل محاسباتی یا  $R^2$  (adj) همان‌طور که در جدول (۴-ب) مشخص است برای مدت زمان خشک شدن ۹۹/۹۵٪ به دست آمده است.

جدول (۴): ضرایب مدل محاسباتی (الف) و پارامترهای آماری (ب) برای مدت زمان خشک کردن گیاه کلم‌سر به وسیلهٔ امواج مایکروویو (Y)

الف. ضرایب مدل محاسباتی	
متغیر وابسته	ضرایب
مدت زمان خشک شدن (Y)	
$\beta_0$	۱۳/۶۳۷
$\beta_1$	-۶/۸۱۹
$\beta_2$	-۲/۶۸۶
$\beta_3$	-۱/۲۵۶
$\beta_{11}$	۲/۱۶۴
$\beta_{22}$	-----
$\beta_{33}$	-۰/۱۸۵
$\beta_{12}$	۱/۸۲۶
$\beta_{13}$	۱/۱۴۴
$\beta_{23}$	-۰/۲۳۹
ب) پارامترهای آماری	
متغیر وابسته	مدت زمان خشک شدن (Y)
$R^2$	۰/۹۹۹۷
$R^2$ adjusted	۰/۹۹۹۵

به طور معمول  $R$ های بالای ۶۰ درصد بیانگر ضریب همبستگی نسبتاً خوبی هستند و نشان‌دهندهٔ انطباق داده‌ها و خط محاسباتی حاصل از رگرسیون هستند که نتیجهٔ به دست آمده برای ضرایب همبستگی مدل، بیانگر تطابق بسیار خوب و عالی مدل محاسباتی با نقاط آزمایش شده و دقت بالای مدل است. مطلبی که باید به آن توجه کرد، تفاوت بین  $R^2$  و  $R^2$  (adj) است. مقدار  $R^2$  با افزایش تعداد آزمایش‌ها و در نتیجه، افزایش درجه آزادی زیاد می‌شود که این افزایش غیرواقعی و کاذب است؛ لذا آماردانان به طور معمول  $R^2$  (adj) را که بیانگر مقدار حقیقی همبستگی است، مورد استناد قرار داده و گزارش می‌دهند.

آب از کلم می‌شود، به طوری که زمان خشک شدن از رطوبت ۱۴/۱۴ کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک به رطوبت مطلوب ۲/۱۴ کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک برای توان ۹۰۰ وات، دبی ۱۸۰۰ SCFH و نسبت طول به قطر ۵/۵ در کمترین دما ۴۰°C و بالاترین دما ۶۰°C برابر ۹/۷۱ و ۷/۶۲ دقیقه است. در همه این آزمایش‌ها به خوبی مشهود است که کوتاه‌ترین زمان خشک شدن در بالاترین توان مایکروویو اتفاق افتاده است. سرعت خشک شدن به طور پیوسته همراه با کاهش محتوای رطوبت با زمان خشک شدن کاهش می‌یابد که این خود نشان‌دهنده این است که با گذشت زمان انتقال جرم از داخل جسم به وسیله نفوذ رخ می‌دهد. مشابه این یافته‌ها برای زیتون [۱۸]، گوجه‌فرنگی [۱۹] و فلفل سبز [۲۰] نیز گزارش شده است.

با توجه به اینکه امواج مایکروویو برای خشک کردن ماده به عمق و مرکز ماده نفوذ کرده و در واقع خشک کردن را از مرکز ماده شروع می‌کند و متعاقب آن رطوبت از مرکز به واسطه نفوذ به سطح جسم می‌رسد و از سطح ماده به خارج دفع می‌شود و همین طور با در نظر گرفتن این موضوع که هوا نیز خشک کردن از سطح را شروع می‌کند، در واقع ترکیب این دو روش به عنوان مکمل یکدیگر به مراتب باعث افزایش چشمگیری در بازدهی خشک کردن می‌شود. در نمودار شکل (۲) و (۳) می‌توان مشاهده کرد که با افزایش توان خروجی مایکروویو، محتوای رطوبت به طور چشمگیری کاهش یافته است، به طوری که میزان جرم ازدست‌رفته متناسب با سطح توان مایکروویو است. در این نمودارها نقش مؤثر گرمایش مایکروویو کاملاً قابل مشاهده است. هوای ورودی در این تحقیق بیشتر نقش سیالی‌کننده ذرات خشک‌شونده و همچنین نقش انتقال حرارت خارجی به درون محفظه مایکروویو را ایفا می‌کند و سرعت هوا نیز عمدتاً در افزایش یا کاهش کیفیت سیالیت مطرح می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده از اثر جداگانه و متقابل هریک از پارامترها بر مدت زمان خشک شدن برای هریک از متغیرها سطوح بهینه عوامل در نظر گرفته شده به صورت زیر به دست آمده است:

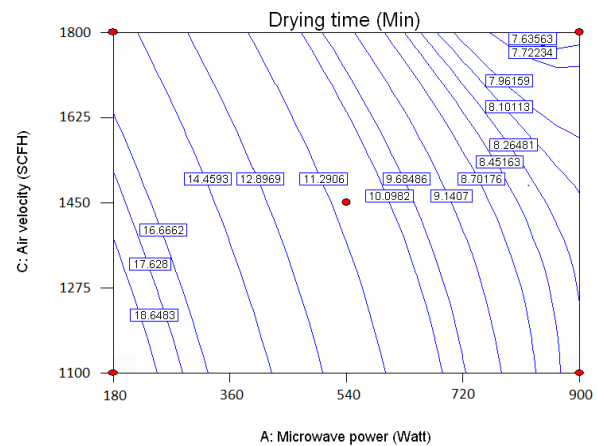
الف. توان مایکروویو ۹۰۰ Watt

ب. دمای هوای ورودی ۶۰°C

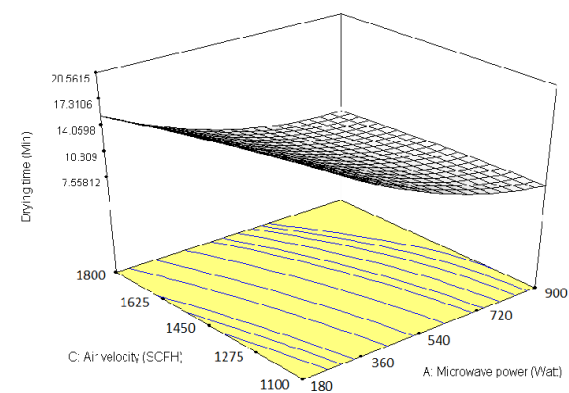
ج. دبی هوای ورودی ۱۸۰۰, SCFH

### ۳.۳. تأثیر نسبت طول به قطر ذرات کلم بر توزیع دمای درون آن در طول فرایند خشک شدن

با توجه به هندسه استوانه‌ای شکل ذرات کلم، دو پارامتر طول و قطر ذرات استوانه‌ای مد نظر بوده که در این صورت یک پارامتر نسبی و بدون بُعد که بیانگر اندازه ذره یعنی  $L/D$  (طول به قطر ذرات کلم) در



الف.



ب.

شکل (۳): الف. مدت زمان خشک شدن؛ ب. توان مایکروویو و سرعت هوای ورودی فاکتورهای متغیر و دمای هوای ورودی

در جدول (۲) و تمام نمودارهای ارائه شده، محتوای رطوبت به طور پیوسته در زمان خشک شدن در حال کاهش است. بر طبق این نمودارها به نظر می‌رسد که با تغییر دما و تغییر دبی هوای ورودی به تنهایی تغییر چندانی در مدت زمان خشک شدن ایجاد نمی‌شود. ولی با تغییر توان از پایین ترین مقدار یعنی ۱۸۰ وات به بالاترین مقدار یعنی ۹۰۰ وات مدت زمان خشک شدن به مقدار قابل زیادی کاهش می‌یابد که به منزله این است که توان مایکروویو نقش تعیین‌کننده تری نسبت به دما و دبی هوای ورودی در خشک کردن نمونه دارد. البته نقش دما در فرایند خشک کردن انکارنشدنی است و افزایش دمای هوای ورودی به عنوان یکی از پارامترهای تأثیرگذار همراه با افزایش توان مایکروویو، نقش مهمی را در سینتیک خشک شدن کلم ایفا می‌کند. بر این اساس، افزایش دمای هوای ورودی همراه با افزایش توان مایکروویو منجر به کاهش زمان خشک شدن و افزایش سرعت آن می‌شود که این افزایش سرعت در نتیجه افزایش در پتانسیل انتقال حرارت بین هوا و ماده خشک‌شونده و متعاقب آن افزایش در تبخیر



خلاف این قضیه را نشان می‌دهد و با توجه به شکل (۴-الف و ب) حاکی از آن است که تقریباً در تمام آزمایش‌ها روند توزیع دما یا به عبارتی تغییرات دمای مرکز و سطح کلم در طول فرایند خشک شدن در ابتدا به صورت تناوب سینوسی و در نهایت، در یک روند ثابت دمایی سطح و مرکز به همدیگر نزدیک می‌شوند تا در انتهای فرایند خشک شدن به همدیگر برسند. به طوری که ذرات کلم ابتدا با گذشت زمان، یک روند افزایشی به حداکثر دمای ممکن و در ادامه با کاهش دما روبه‌رو می‌شوند و مجدداً روند افزایشی البته با شیبی ملایم‌تر نسبت به مرحله اول ادامه می‌یابد و در نهایت با نزدیک شدن به انتهای فرایند با کاهش دمای مرکز و افزایش دمای سطح این دو دما به هم نزدیک می‌شوند تا به هم برسند که این خود به معنای پایان فرایند خشک شدن است (که الزاماً این به معنای خشک شدن کامل ماده نیست).

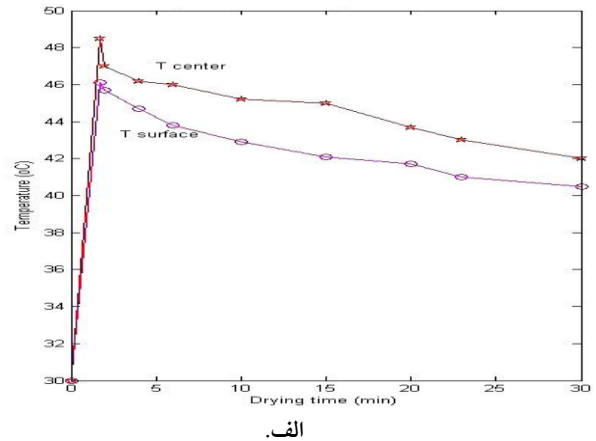
#### ۴. نتیجه‌گیری

سینتیک جرمی و حرارتی فرایند خشک شدن ماده کلم‌سر در یک محفظه مایکروویو و در حضور هوای ورودی و در بستر سیالی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در این کار ما تأثیر پارامترهایی همچون توان خروجی مایکروویو، دمای هوای ورودی و سرعت هوای سیالی‌کننده را روی سینتیک جرمی و حرارتی آن مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادیم. فرایند خشک شدن در حضور مواد بی‌اثر و به صورت توده‌ای انجام گرفته است. رطوبت اولیه کلم ۱۴/۱۴ کیلوگرم آب بر مبنای خشک است که بعد از انجام آزمایش‌های اولیه در شرایط مختلف عملیاتی رطوبت مطلوب ۲/۱۴ کیلوگرم آب بر مبنای خشک برای آن به دست آمده است.

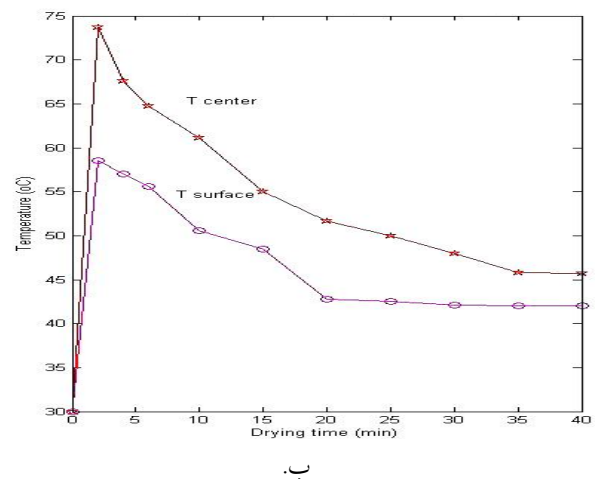
با توجه به اینکه امواج مایکروویو برای خشک کردن ماده به عمق و مرکز ماده نفوذ کرده و در واقع خشک کردن را از مرکز ماده شروع و متعاقب آن رطوبت از مرکز بواسطه نفوذ به سطح جسم می‌رسد و این امر یعنی نفوذ رطوبت از مرکز، باعث پاره شدن بافت ماده خشک شونده و ایجاد حفره‌های ریز متخلخل می‌گردد، تا به سطح ماده برسد و همین‌طور با در نظر گرفتن این موضوع که هوای ورودی نیز خشک کردن از سطح را شروع می‌کند، می‌توان گفت که ترکیب این دو پدیده به‌عنوان مکمل یکدیگر بمراتب باعث افزایش چشمگیر بازدهی خشک کردن می‌شود.

همچنین نتایج حاصل از این کار نشان داد که با افزایش توان خروجی مایکروویو محتوای رطوبت به‌طور چشمگیری و متعاقب آن زمان خشک شدن نیز کاهش یافت. همچنین با بررسی دمای هوای داغ

مقادیر ۲ و ۵/۵ مورد بررسی قرار گرفته است. نمودار شکل (۴-الف و ب) تأثیر اندازه ذره (L/D) را در شرایط دمای ۶۰°C، دبی SCFH ۱۸۰۰ و قدرت مایکروویو ۹۰۰ وات نشان می‌دهد. در این نمودار دمای سطح و دمای مرکز در مقابل زمان خشک شدن رسم شده است.



الف.



ب.

شکل (۴): تأثیر نسبت طول به قطر ذرات کلم بر دمای مرکز و سطح کلم در طول فرایند خشک شدن؛ الف. نسبت طول به قطر  $L/D=2$ ، ب. نسبت طول به قطر  $L/D=5/5$

مشاهدات ما در تأثیرپذیری سینتیک خشک شدن کلم از پارامتر L/D نشان می‌دهد که با کاهش این پارامتر به دلیل اینکه باعث افزایش مجموع سطح توده کلم در تماس با حرارت می‌شود، خود به تنهایی می‌تواند باعث افزایش بازدهی عملیات خشک کردن یا به عبارتی کاهش در زمان عملیات و افزایش سرعت خشک شدن شود، به طوری که زمان خشک شدن برای L/D ۲ و ۵/۵ در شرایط دمای ۶۰°C، دبی SCFH ۱۸۰۰ و قدرت مایکروویو ۹۰۰ وات به ترتیب برابر با ۸/۴۱ و ۱۰/۸۵ دقیقه است. برخلاف آنچه در مقالات پیشین [۲۱] آمده بود که در آن‌ها توزیع دما را از مرکز جسم تا سطح آن به صورت یک روند افزایشی در ابتدای فرایند و در نهایت، رسیدن دمای مرکز و سطح به هم در یک سیر ثابت دمایی ترسیم شده بود، نتایج این کار



سومین پاسخی که از تغییر پارامترهای عملیاتی ذکر شده دریافت شد، چروکیدگی (نسبت حجم زمان‌های مختلف به حجم اولیه) است که با اندازه‌گیری حجم ذره در زمان‌های مختلف و به صورت نسبتی بر روی حجم اولیه محاسبه گردید. با وجود اینکه نظم روشنی از تأثیرپذیری از عوامل مختلف حاصل نشد، به صورت کلی می‌توان ادعا کرد که در طول فرایند، چروکیدگی کاهش یافته و این چروکیدگی به نحوی است که قابل اغماض نیست.

علاوه بر نتیجه‌گیری‌های حاصل از مشاهدات تجربی و آزمایشگاهی و تأثیر عوامل مختلف بر فرایند خشک شدن کلم و خواص کلم، نتیجه‌گیری حاصل از مدل‌سازی فرایند خشک شدن برای ماده خشک‌شونده کلم حاکی از آن است که مدل ارائه شده تطابق قابل قبولی با داده‌های تجربی دارد که این موضوع هم در مورد پروفایل رطوبت ماده و هم برای پروفایل دمای ماده در عمق‌های مختلف ماده صدق می‌کند.

ورودی نشان داده شد که افزایش دمای هوای ورودی به همراه افزایش توان مایکروویو، منجر به کاهش زمان و افزایش سرعت خشک شدن می‌شود که این امر باعث افزایش سرعت در نتیجه افزایش پتانسیل انتقال حرارت بین هوا و ماده خشک‌شونده و متعاقب آن افزایش در تبخیر آب از کلم می‌شود.

عامل دیگری که مورد آزمایش قرار گرفت، سرعت هوای ورودی بود که اندازه‌گیری‌های زمان خشک شدن، گویای تأثیر اندک سرعت هوای ورودی نسبت به سایر عوامل بود، با این حال هوای ورودی فقط به اندازه‌ای که ذرات خشک‌شونده را سیالی کنند نقش مؤثر داشته‌اند و بیشتر از آن تأثیر محسوسی را روی سینتیک خشک شدن نداشتند. بررسی‌های دمایی ذرات کلم در طول فرایند، گویای این است که در ابتدا تغییرات به صورت تناوب سینوسی بوده و در نهایت این تغییرات روند ثابتی را به خود می‌گیرند، به این صورت که دمای سطح و مرکز به همدیگر نزدیک شده تا در انتهای فرایند خشک شدن به همدیگر برسند.

## مراجع

- [1] Iraz, Göksu E., "Fluidized Bed, Microwave and Microwave Assisted Fluidized Bed Drying of Macaroni Beads", Master of Science Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, July 2003.
- [2] Feng H., Tang J., "Microwave Finish Drying of Diced Apples in a Spouted Bed", Journal of Food Science, Vol. 63, No. 4, pp. 679-683, 1998.
- [3] Krokida, M. K., Maroulis, Z. B., "Effect of Drying Method on Shrinkage and Porosity", Drying Technology, Vol. 15, No. 10, pp. 2441-2458, 1997.
- [4] Maskan, M., "Drying Shrinkage and Rehydration Characteristics of Kiwifruits During Hot Air and Microwave Drying", Journal of Food Engineering, Vol. 48, No. 2, pp. 177-182, 2001.
- [5] Keey, R. B., *Drying: Principles and Practice*, Pergamon, New York, 1972.
- [6] George, S.D., Cenkowski. S., Muir. W.E., "A Review of Drying Technologies for the Preservation of Nutritional Compounds in Waxy Skinned Fruit", The Society for Engineering in Agricultural, Food and Biological Systems, Presentation at the 2004 North Central ASAE/CSAE Conference, September 24-25, 2004.
- [7] Funebo, T., Kidman, S., Langton, M., "Microwave Heat Treatment of Apple before Air Dehydration Effects on Physical Properties and Microstructure", Journal of Food Engineering, Vol. 46, No. 3, pp. 173-182, 2000.
- [8] Krokida, M. K., Karathanos, V. T., Maroulis, Z. B., "Effect of Freeze Drying Condition on Shrinkage and Porosity of Dehydrated Agriculture Products", Journal of Food Engineering, Vol. 35, No. 4, pp. 369-380, 1998.
- [9] Prothon, F., Kidman, T. S., Langton, M., "Effects of Combined Osmotic and Microwave Dehydration of Apple on Texture, Microstructure and Rehydration Characteristics", LWT - Food Science and Technology, Vol. 34, No. 2, pp. 95-101, 2001.
- [10] Khraisheh, M. A. M., Cooper, T. J. R., Magee, T. R. A., "Microwave and Air Drying I: Fundamental Considerations and Assumptions for the Simplified Thermal Calculations of Volumetric Power Adsorption", Journal of Food Engineering, Vol. 33, No. 1, pp. 207-219, 1997.
- [11] Buffler, C. R., *Microwave Cooking and Processing, Engineering Fundamentals for the Food Scientist*, An AVI Book, New York, 1993.
- [12] Ahmad, S. S., Morgan, M. T., Okos, M.R., "Effects of Microwave Drying, Checking and Mechanical Strength of Baked Biscuits", Journal of Food Engineering, Vol. 50, No. 2, pp. 63-75, 2001.
- [13] Owusu, A. Y. J., "Advances in Microwave Drying of Foods and Food Ingredients", Journal Inst. Can. Sci. Technol, Aliment, Vol. 24, No. 3, pp. 102-107, 1991.
- [14] Schiffmann, R. F., "Microwave and Dielectric Drying", In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying-1*, New York, Marcel Dekker Inc, pp. 345-372, 1995.
- [15] Patsznik, W., Zygmunt, S., Kudra, T., "Simulation of RF-Assisted Convective Drying of Seed Quality Broad Beans", Drying Technology, Vol. 8, pp. 977-992, 1990.
- [16] Jumah, R. Y., Raghavan, G. S. V., "Analysis of Heat and Mass Transfer During Combined Microwave-Convective Spouted-Bed Drying", Drying Technology, Vol. 19, pp. 485-506, 2001.

- [17] Wang, W., Bhraskar, N. T., Chen, G., Mujumdar, A. S., "Simulation of Fluidized-Bed Drying of Carrot with Microwave Heating", *Drying Technology*, Vol. 20, No. 9, pp. 1855-1867, 2002.
- [18] Meziane, S., "Drying Kinetics of Olive Pomace in a Fluidized Bed Dryer", *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp. 1644-1649, 2011.
- [19] Gogus, F., Maskan, M., "Air Drying Characteristics of Solid Waste (Pomace) of Oliveoil Processing", *Journal Food Eng*, Vol. 72, pp. 378-382, 2006.
- [20] Akpinar, E. K., Bicer, Y., "Mathematical Modeling of Thin Layer Drying Process of Long Green Pepper in Solar Dryer and Under Open Sun", *Energy Convers Manage*, Vol. 49, pp. 1367-1375, 2008.
- [21] Abbasi, S. B., Mowla, D., "Experimental and Heoretical Investigation of Drying Behavior of Garlic in an Inert Medium Fluidized Bed Assisted by Microwave", *Journal of Food Engineering*, Vol. 88 , No. 4, pp. 438-449, 2008.