

## تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر زمان خشک شدن دانه‌های انار و ضرایب مدل شبیه‌سازی

علی متولی<sup>۱</sup>، سعید مینایی<sup>۲\*</sup>، محمد هادی خوش تقاضا<sup>۳</sup>، محمد حسین عزیزی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- مسئول مقاله و دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۴- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۸۹/۵/۶ تاریخ پذیرش: ۸۹/۹/۲۳)

### چکیده

به منظور ارزیابی و انتخاب مدل مناسب برای روند خشک کردن لایه نازک دانه‌های انار، یازده مدل نیمه تئوری و تجربی با داده‌های آزمایشگاهی برازش شد. آزمایشات در سه تیمار شاهد، پیش تیمار مایکروویو با توان ۱۰۰ وات و پیش تیمار مایکروویو با توان ۲۰۰ وات و در شش سطح دمایی ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۶۵ و ۷۰ درجه سلسیوس و سه سرعت هوای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه انجام شد. نتایج حاصل از تحلیل رگرسیونی مدل‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که مدل میدیلی بهترین برازش را با داده‌های بدست آمده دارد. ضرایب مدل میدیلی با افزایش دما و سرعت باد افزایش یافتند. همچنین نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که با انجام عملیات پیش تیمار با استفاده از مایکروویو، زمان خشک شدن دانه‌های انار به طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد.

کلید واژگان: پیش تیمار، خشک کردن، مایکروویو، ضرایب شبیه سازی

\* مسئول مکاتبات: minae@modares.ac.ir

## ۱- مقدمه

نگهداری مواد غذایی به روش خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری می‌باشد. اگر چه خشک کردن به وسیله خورشید برای سالیان دراز روش رایج برای خشک کردن اکثر مواد غذایی بوده، اما به علت ملاحظات بهداشتی و اقتصادی با روش‌های مختلف از جمله خشک کردن با جریان هوای گرم جایگزین گردیده است [۱].

در خشک‌کن لایه نازک شدت خشک شدن به عوامل زیادی از قبیل دمای هوا، سرعت (دبی) جریان هوا، رطوبت نسبی هوا، مدت زمان در معرض قرار گرفتن محصول در مقابل جریان هوا، فشار هوا، خصوصیات فیزیکی و ساختمانی محصول (رقم، اندازه، میزان رطوبت اولیه، سطح آزاد محصول) و نحوه قرارگیری محصول روی سینی (عمق دانه) بستگی دارد [۲].

تاکنون مطالعات زیادی در مورد خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی انجام شده است از جمله خشک کردن کیوی [۳]، زردآلو [۴]، زیتون [۵]، ذرت [۶]، ورقه‌های نازک پیاز [۷] را مورد آزمایش قرار دادند.

فرایند خشک کردن با مایکروویو روشی نسبتاً ارزان بوده که امروزه توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. طیف الکترومغناطیسی بین بسامدهای 300MHz و 300GHz نشان‌گر امواج مایکروویو است. برخلاف سیستم های گرمایشی رایج، امواج مایکروویو در ماده نفوذ کرده و گرمایش در سراسر محصول گسترش می یابد [۸]. مطالعات زیادی در مورد خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از مایکروویو مانند خشک کردن دانه‌ها [۹ و ۱۰]، خشک کردن سبزیجات [۱۱ و ۱۲]، خشک کردن میوه-جات [۱۳] انجام شده است. هر چند مطالعات زیادی در مورد خشک کردن محصولات مختلف با استفاده از جریان هوای داغ و مایکروویو وجود دارد اما مطالعات در مورد استفاده از مایکروویو برای عملیات پیش تیمار در خشک کردن محصولات کشاورزی کم است و در مورد دانه‌های انار اصلاً انجام نشده است. هدف از اجرای این پژوهش

بررسی زمان خشک شدن دانه انار با استفاده از پیش تیمار مایکروویو و همچنین تاثیرات این فرآیند بر ضرایب مدل شبیه سازی می‌باشد.

## ۲- مواد و روشها

محصول تازه انار ترش از شهرستان جویبار استان مازندران خریداری و در دمای ۵ درجه سلسیوس در یخچال نگهداری شدند. قبل از شروع آزمایش‌های خشک کردن، دانه‌های انار جدا گردیده و به مدت ۲۰ تا ۳۰ دقیقه در محیط قرار داده شد تا به دمای محیط برسند. پیش از شروع هر آزمایش، خشک کن به مدت نیم ساعت روشن می شد تا بحالت مطلوب و پایدار برسد. به منظور تعیین رطوبت اولیه نمونه‌ها، از روش گراویمتریکی استفاده شد. وزن اولیه نمونه در هر ظرف ۱۵ گرم و تعداد ظرف‌ها ۵ عدد بود. این آزمایشات در ۵ تکرار انجام شد. دمای آون در  $1^{\circ}\text{C} \pm$  ۱۰۵ درجه سلسیوس تنظیم و نمونه‌ها پس از ۴ ساعت توزین شدند. عملیات توزین در فواصل یک ساعت ادامه یافت تا جایی که اختلاف وزنی بین دو توزین مشاهده نشد. میزان رطوبت اولیه برای انار ترش (۳۳۱٪) بر پایه خشک تعیین گردید [۱۴].

پس از آماده شدن خشک‌کن و تنظیم آن در دما و سرعت-های مورد نظر، دانه‌های انار در سبد مخصوص قرار گرفته و در محفظه خشک‌کن جای داده شد. آزمایش‌ها در شش سطح دمایی ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۶۵، ۷۰ درجه سلسیوس، سه سطح سرعت هوای ورودی ۱/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه و سه نوع پیش تیمار شاهد (بدون مایکروویو)، پیش تیمار مایکروویو با توان ۱۰۰ وات به مدت ۲۰ دقیقه، پیش تیمار مایکروویو با توان ۲۰۰ وات به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد. استفاده از پیش تیمارهایی با توان بالاتر از ۲۰۰ وات سبب سوزاندن دانه‌های انار می‌گردد. در طول انجام آزمایش‌ها دمای محیط بین ۲۰ تا ۲۶ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی هوا بین ۲۲ تا ۲۷ درصد بود.

$$R^2 = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{pre} - MR_{exp,i})^2} \right] \quad (3)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - m} \quad (4)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

در این رابطه ها،  $MR_{exp,i}$  نسبت رطوبت تجربی  $i$ ام،  $MR_{pre,i}$  نسبت رطوبت پیشگویی شده  $i$ ام،  $N$  تعداد مشاهدات و  $m$  تعداد ثابتهای خشک شدن می باشد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- سینتیک خشک شدن لایه نازک دانه

##### انار

##### زمان خشک شدن دانه انار

شکل (۱) تاثیر دما و سرعت باد را بر زمان خشک شدن برای سه تیمار شاهد، مایکروویو با توان ۱۰۰ وات و مایکروویو با توان ۲۰۰ وات نشان می دهد. بطور کلی با افزایش دما و سرعت باد، زمان لازم برای خشک کردن انار کاهش می یابد. بکارگیری پیش تیمار موجب کاهش زمان خشک شدن می شود و با افزایش توان در پیش تیمار مایکروویو، زمان خشک شدن کاهش می یابد. با افزایش دما از ۴۵ تا ۷۰ درجه سلسیوس برای تیمار شاهد، مایکروویو ۱۰۰ وات و مایکروویو ۲۰۰ وات، زمان خشک شدن به ترتیب ۴ تا ۳، ۴/۹ تا ۳/۵ و ۲/۱۸ تا ۲/۲۲ برابر کاهش می یابد. همچنین تاثیر افزایش سرعت باد از ۰/۵ تا ۱/۵ متر بر ثانیه بر روند زمان خشک شدن برای سه تیمار شاهد، مایکروویو ۱۰۰ وات و مایکروویو ۲۰۰ وات نشان می دهد که زمان کاهشی به ترتیب معادل ۱/۲ تا ۱/۵، ۱/۲ تا ۱/۴ و ۱/۲ تا ۱/۲۵ برابر بود.

#### ۲-۱- مدل سازی ریاضی منحنی های خشک

##### شدن

برای مدل سازی خشک شدن لایه نازک دانه های انار، از نسبت رطوبت نمونه ها در طی خشک شدن استفاده شد. نسبت رطوبت با توجه به رابطه (۱) به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه ها در هر لحظه وابسته است [۱۵].

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

که در آن  $MR$  رطوبت نسبی (بی بعد)،  $M_t$  میزان رطوبت در هر لحظه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)،  $M_e$  رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)،  $M_0$  رطوبت اولیه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد) است. طرف چپ معادله، نسبت رطوبت را که مشخص کننده فرآیند خشک کردن است نشان می دهد. برای زمان های طولانی خشک شدن، مقادیر  $M_e$  در مقایسه با مقادیر  $M_0$  بسیار کوچک هستند. بنابراین می توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت معادله (۲) ساده کرد [۱۵].

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad (2)$$

در نتیجه در رابطه ساده شده برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه گیری رطوبت تعادلی نیست.

مدل های مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) آمده است. نسبت رطوبت های بدست آمده طی آزمایشات مختلف به کمک نرم افزار *MATLAB 2007* با مدل های مذکور برازش داده شد و برای تعیین بهترین مدل از سه معیار ضریب تعیین ( $R^2$ )، مربع کای ( $\chi^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) استفاده شد. بهترین برازشی که می تواند خصوصیات خشک شدن دانه های انار را توصیف کند مدلی است که دارای بیشترین ضریب همبستگی ( $R^2$ )، کمترین مربع کای ( $\chi^2$ ) و کمترین ریشه متوسط مربع خطای داده ها ( $RMSE$ ) باشد.

1. Correlation coefficient
2. Chi-square
3. Root mean square error

جدول ۱ معادلات خشک کردن لایه نازک مورد استفاده

شماره	نام مدل	معادله مدل	منبع
۱	میدیلی و همکاران	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[۱۹]
۲	ورما و همکاران	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	[۲۰]
۴	هندرسون و پابیس	$MR = a \exp(-kt)$	[۲۱]
۵	لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + c$	[۲۲]
۶	پیچ اصلاح شده	$MR = \exp(-kt)^n$	[۲۳]
۷	دو جمله‌ای	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	[۲۴]
۸	تقریب پخش	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	[۲۵]
۹	پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$	[۲]
۱۰	هندرسون و پابیس اصلاح شده	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	[۲]
۱۱	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$	[۲۶]

نشان داد که اثر فاکتورهای سرعت و دما و پیش تیمار و همچنین اثر متقابل دما و پیش تیمار و اثر متقابل سرعت باد و پیش تیمار در سطح ۵٪ بر مدت زمان خشک شدن معنی دار شده است.

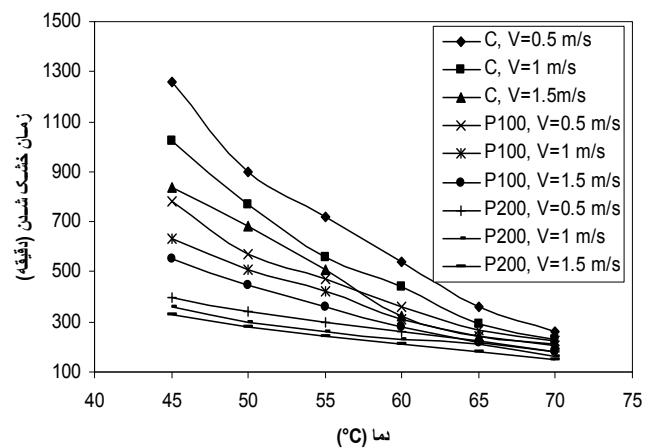
با ثابت بودن دما و سرعت باد بر روند خشک شدن زمان خشک شدن تحت تاثیر پیش تیمار مایکروویو قرار می‌گیرد به طوری که این عامل در پیش تیمار مایکروویو ۱۰۰ وات زمان خشک شدن را ۱/۰۹ تا ۱/۶۱ و در پیش تیمار مایکروویو ۲۰۰ وات زمان خشک شدن را ۱/۳۳ تا ۳/۱۵ نسبت به تیمار شاهد کاهش می‌دهد.

جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس متغیرها برای پارامتر زمان

خشک شدن دانه‌های انار

منابع تغییرات	درجه آزادی	مقادیر میانگین مربعات زمان خشک شدن (M.S)
دما	۵	* ۱۳/۴۹
سرعت	۲	* ۶۷/۲۹
پیش تیمار	۲	* ۴۲۱/۹۹
پیش تیمار × سرعت	۴	* ۴/۰۰
پیش تیمار × دما	۱۰	* ۱/۱۴
سرعت × دما	۱۰	ns ۱/۰۰۳
سرعت × دما × پیش تیمار	۲۰	ns ۱/۰۰۷
خطا	۵۳	۱/۱۱

\* اثر معنی دار در سطح ۵٪  
ns عدم وجود اثر معنی دار



شکل ۱ تاثیر دما و سرعت هوا بر زمان لازم برای خشک کردن

دانه‌های انار

نتایج حاصل از تجزیه واریانس تاثیر نوع پیش تیمار، دما و سرعت هوا بر زمان خشک شدن دانه انار ترش (جدول ۲)

شاهد بیشترین و برای تیمار مایکروویوا توان ۲۰۰ وات کمترین مقدار است.

### ۳-۲- مدل سازی خشک کردن و نتایج حاصل از برازش مدل ها

رطوبت اولیه دانه های انار ترش که به روش وزنی بدست آمد برابر با ۳۳۱٪ بر پایه خشک بود. پس از بدست آوردن مقادیر نسبت رطوبت در دما و سرعت های مختلف خشک کردن، مدل های معرفی شده در جدول (۱) بر منحنی های خشک کردن حاصل از داده های آزمایشی برازش داده شدند. سپس مدل های مختلف خشک شدن لایه نازک با توجه به مقادیر  $R^2$ ،  $\chi^2$  و  $RMSE$  ارزیابی شدند و مدل بهتر بر اساس مقادیر بیشتر  $R^2$  و مقادیر کمتر  $\chi^2$  و  $RMSE$  انتخاب شد. نتایج حاصل از برازش داده های آزمایشگاهی با مدل های ارائه شده نشان داد که تقریباً همه مدل ها مناسبند، اما مدل میدیلی، مدل پیچ، مدل ورما و همکاران و مدل تقریب پخش، با دقت بیشتری نسبت به سایر مدل ها، فرآیند خشک شدن دانه های انار را پیش بینی کردند. در ایم میان مدل میدیلی بهترین برازش را داشت و از این رو، نتایج مربوط به آن با جزئیات ارائه می شود. ضرایب و شاخص های آماری مربوط به مدل میدیلی در سطوح مختلف دما و سرعت باد و در جدول ۳ آمده است. به علت زیاد بودن سطوح آزمایش و شکل های حاصله، در این جا به عنوان نمونه تنها برازش مدل میدیلی در دمای ۴۵ درجه سلسیوس در شکل (۴) در سه تیمار مختلف شاهد، پیش تیمار مایکروویوا با توان ۱۰۰ و پیش تیمار مایکروویوا با توان ۲۰۰ وات نشان داده شده است.

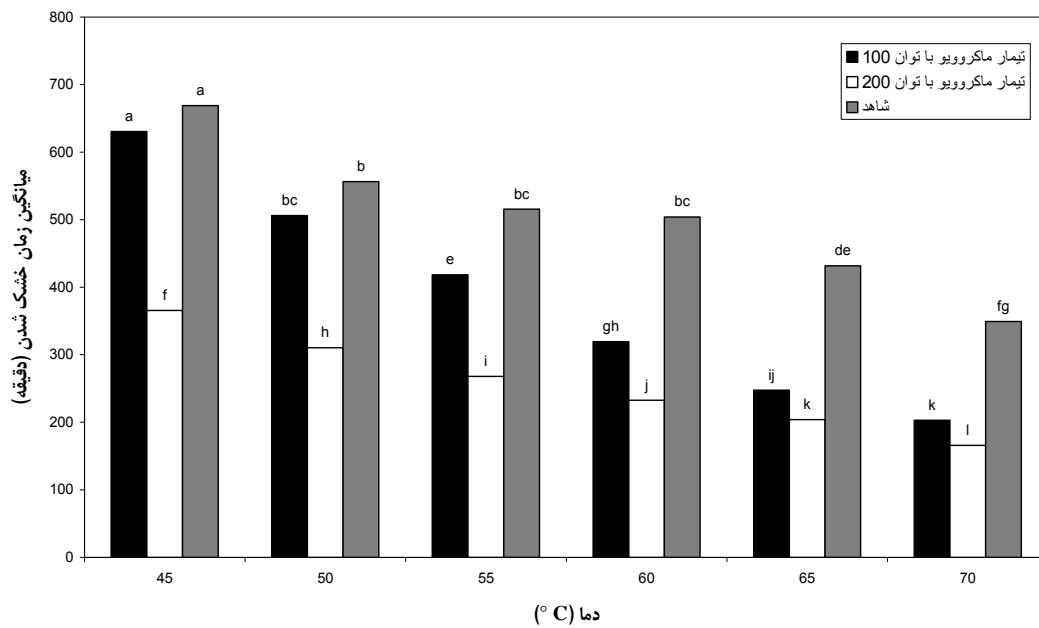
مقایسه میانگین زمان خشک شدن نمونه ها بر اساس دمای هوای خشک کن به وسیله آزمون چند دامنه ای دانکن انجام شد. مطابق جدول ۳، با افزایش دما از ۴۵ به ۷۰ درجه سلسیوس، زمان خشک شدن به طور معنی داری کاهش یافته است. افزایش دما موجب می شود که سرعت خروج رطوبت از دانه انار افزایش یافته، آهنگ خشک شدن افزایش یابد و منحنی های بدست آمده از تغییرات نسبت رطوبت محصول در واحد زمان دارای روندهای کاهشی قابل توجهی باشند. افزایش دما موجب شیب بیشتر منحنی های بدست آمده گردیده و بیانگر سرعت بالای فرآیند می باشد [۱۶ و ۱۷و۱۸].

اثر متقابل دما و پیش تیمار مایکروویوا

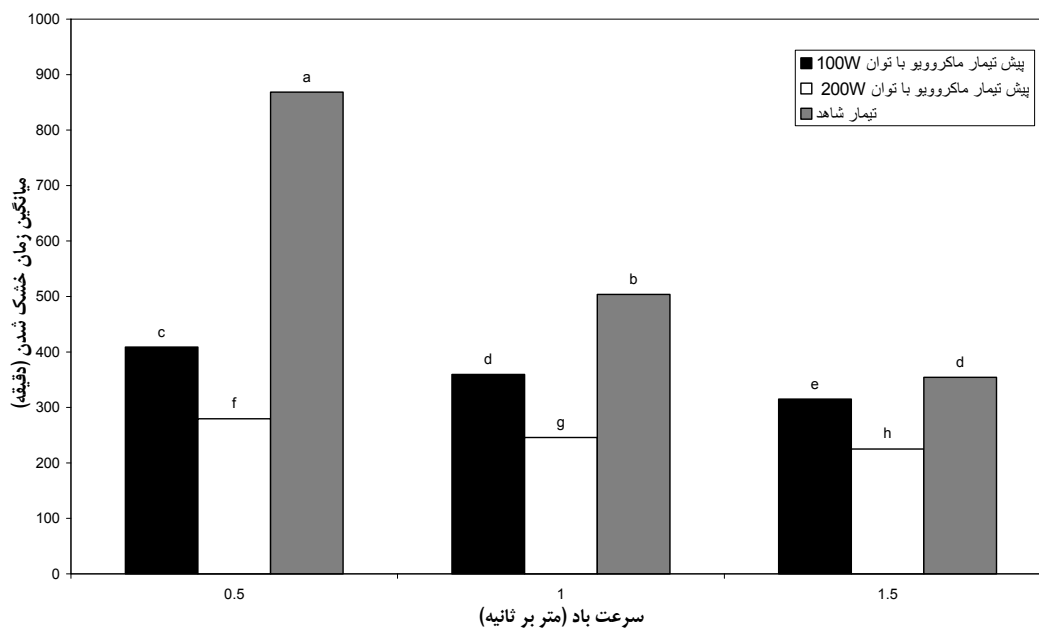
میانگین زمان خشک شدن بر اساس اثر متقابل دمای هوای خشک کن و نوع تیمار به وسیله آزمون چند دامنه ای دانکن مقایسه شد. همانطور که از شکل ۲ پیداست با افزایش دما، زمان خشک شدن کاهش یافته و همچنین در یک دمای ثابت، زمان خشک شدن برای تیمار شاهد بیشترین و برای پیش تیمار مایکروویوا توان ۲۰۰ وات کمترین مقدار است.

اثر متقابل سرعت هوای گرم و مایکروویوا

میانگین زمان خشک شدن بر اساس اثر متقابل سرعت هوای خشک کن و نوع پیش تیمار به وسیله آزمون چند دامنه ای دانکن مقایسه شد. همانطور که از شکل (۳) پیداست با افزایش سرعت هوا، زمان خشک شدن کاهش یافته و همچنین در یک سرعت ثابت، زمان خشک شدن برای تیمار

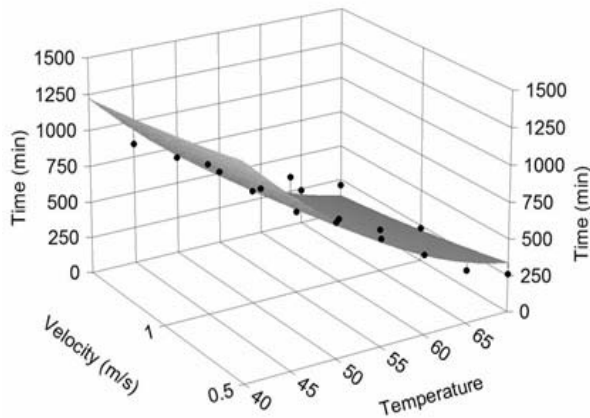


شکل ۲ اثر متقابل دما و پیش تیمار بر مقادیر میانگین زمان خشک شدن



شکل ۳ اثر متقابل سرعت باد و پیش تیمار مایکروویو بر میانگین زمان خشک شدن

در شکل‌های ۵، ۶، ۷ با استفاده از آنالیز رگرسیون چند متغیره رابطه‌ای بین زمان خشک شدن، دما و سرعت هوا به ترتیب برای سه تیمار شاهد، میکروویو ۱۰۰ وات و میکروویو ۲۰۰ وات برقرار شده است. معادلات و ضریب همبستگی  $R^2$  مربوط به هر شکل در زیر آن آمده است. دما در رابطه‌های ۶، ۷ و ۸ بر حسب درجه سلسیوس است. با استفاده از رابطه‌های تدوین شده، زمان خشک شدن را می‌توان بر حسب دو متغیر مستقل دما و سرعت هوا محاسبه نمود. با کاربرد چنین معادلاتی، لزوم انجام آزمایشات در سطوح مختلف دما و سرعت کم می‌شود.



شکل ۵ تاثیرات دما و سرعت هوا بر زمان خشک شدن دانه انار (تیمار شاهد)

$$\text{Drying Time} = 50.23/54 - 1.08/81T + 0.4926T^2 + 0.001975T^3 - 352.3333V + 173.3333V^2$$

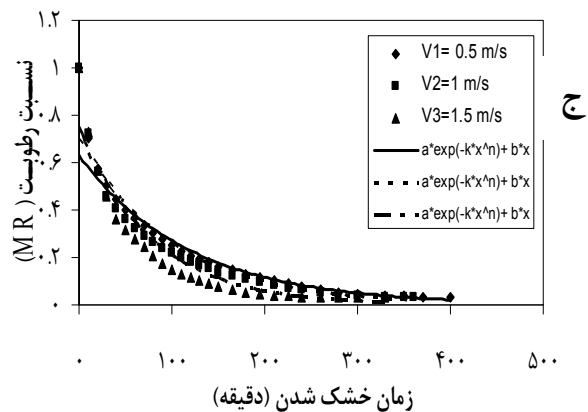
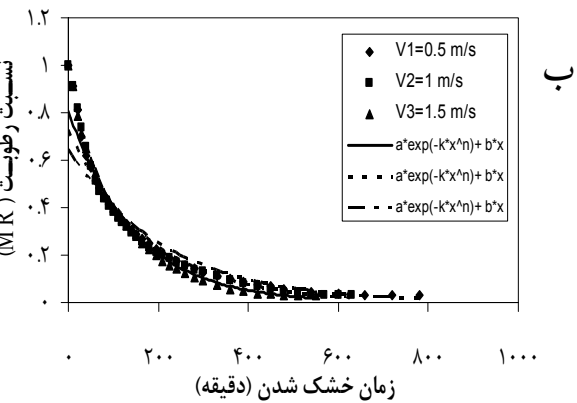
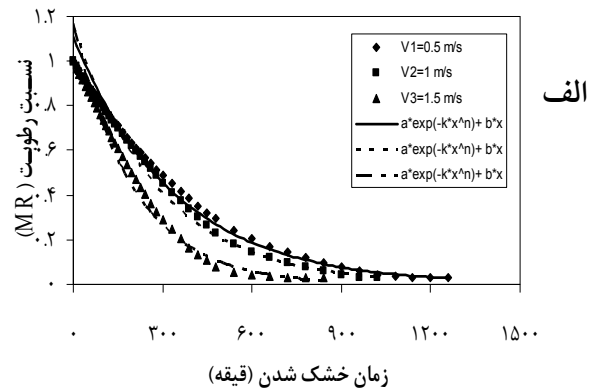
$$R^2 = 0.9738$$

$$\text{Drying Time} = 3315/80 - 73/669T + 0.42619T^2 - 545/2857V + 28.3333V^2 + 6/6571T \times V$$

$$R^2 = 0.9934$$

$$\text{Drying Time} = 1142/69 - 19/7357T + 0.09286T^2 - 166/2857V + 15V^2 + 1/4571T \times V$$

$$R^2 = 0.9936$$

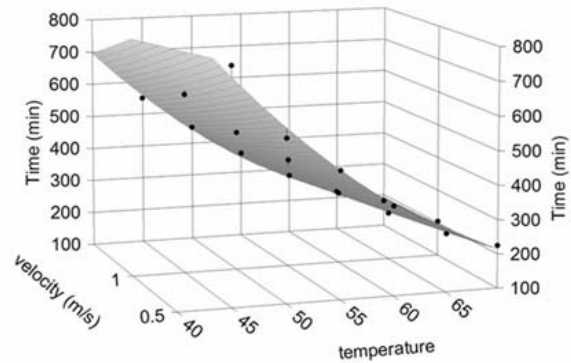
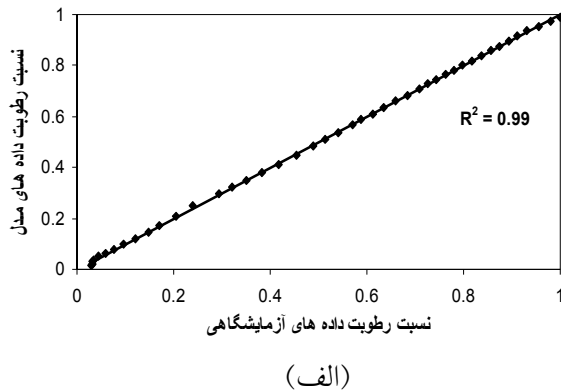


شکل ۴ منحنی های خشک شدن لایه نازک دانه انار در دمای ۴۵ درجه سلسیوس در الف) تیمار شاهد ب) تیمار میکروویو با توان ۱۰۰ وات ج) تیمار میکروویو با توان ۲۰۰ وات و به همراه خطوط پیشگوئی شده توسط مدل میدیلی در سرعت‌های مختلف هوا

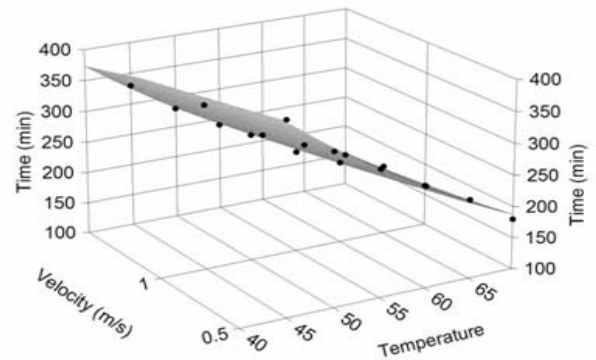
### ۳-۳- تاثیر شرایط هوا بر زمان خشک شدن

خشک شدن (k) افزایش می یابد. همچنین انجام عملیات پیش تیمار سبب افزایش آهنگ ثابت خشک شدن می شود. در خشک کردن دانه های انار به روش جریان هوای گرم، زمان مورد نیاز برای گرم کردن کل جرم لایه دانه انار تا دمای تبخیر از طریق رسانایی گرما به درون آن انجام می شود که به دلیل هدایت گرمایی پایین، طولانی می باشد. از سوی دیگر، چون خشک شدن محصول ابتدا در لایه خارجی آن صورت می گیرد، سطح ماده خشک شده و نفوذپذیری آن کاهش می یابد (پدیده سخت شدگی). این لایه سخت شده، مانعی در مقابل پخش رطوبت در سطح محصول ایجاد می کند و خروج رطوبت را از محصول طولانی می نماید. از طرف دیگر انجام عملیات پیش تیمار میکروویو بر روی دانه های انار سبب از بین رفتن پوسته نازک دانه انار می شود و این عملیات (پیش تیمار میکروویو) مانع ایجاد پدیده سخت شدگی می شود و دانه انار پس از عملیات پیش تیمار، در محیط خشک کن به راحتی رطوبت از دست داده و زمان خشک شدن نسبت به تیمار شاهد کاهش می یابد.

شکل ۸ مقایسه بین نسبت های رطوبتی به دست آمده از آزمایش را در مقابل نسبت های رطوبتی پیش بینی شده با مدل میدیلی در دما و سرعت های آزمایش شده به ترتیب برای تیمارهای شاهد، میکروویو با توان ۱۰۰ و ۲۰۰ وات را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود، خطی با زاویه ۴۵ درجه به داده ها برازش شده است که نشان دهنده دقت مدل میدیلی در پیش بینی تغییرات نسبت رطوبتی دانه انار در شرایط آزمایش می باشد.



شکل ۶ تاثیرات دما و سرعت هوا بر زمان خشک شدن دانه انار با استفاده از پیش تیمار میکروویو ۱۰۰ وات



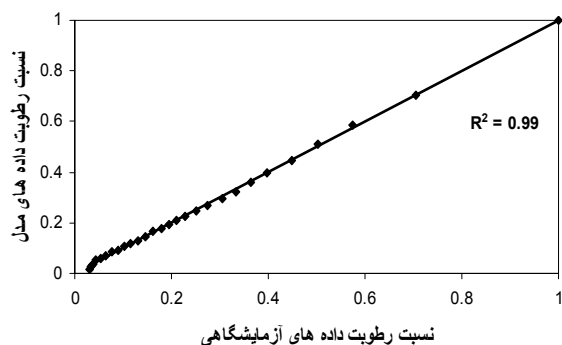
شکل ۷ تاثیرات دما و سرعت هوا بر زمان خشک شدن دانه انار با استفاده از پیش تیمار میکروویو ۲۰۰ وات

### ۳-۴- تاثیرات مختلف هوای خشک کن بر ضرایب مدل میدیلی

ارتباط بین ثابت های مدل میدیلی با دما و سرعت هوا برای سه تیمار شاهد، میکروویو ۱۰۰ وات و میکروویو ۲۰۰ وات با استفاده از رگرسیون چند متغیره به دست آمد و به صورت معادلات ۹ تا ۱۳ در جدول ۳ برای تیمار شاهد، ۱۴ تا ۱۸ برای تیمار میکروویو با توان ۱۰۰W و ۱۹ تا ۲۳ برای تیمار میکروویو با توان ۲۰۰ وات بیان شده است. در این معادلات دما بر حسب درجه کلونین آمده است.

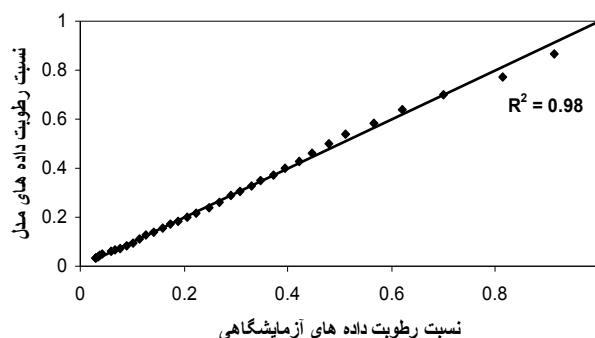
نتایج حاصل از برازش مدل میدیلی بر داده های آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش دما و سرعت هوا، آهنگ ثابت





(ج)

شکل ۸ مقایسه بین نسبت رطوبتی حاصل از آزمایش با نسبت رطوبتی پیش‌بینی شده توسط مدل میدیلی برای الف: تیمار شاهد (بدون مایکروویو) ب: پیش‌تیمار مایکروویو ۱۰۰ وات ج: پیش-تیمار مایکروویو ۲۰۰ وات



(ب)

شکل ۸ مقایسه بین نسبت رطوبتی حاصل از آزمایش با نسبت رطوبتی پیش‌بینی شده توسط مدل میدیلی برای الف: تیمار شاهد (بدون مایکروویو) ب: پیش‌تیمار مایکروویو ۱۰۰ وات ج: پیش-تیمار مایکروویو ۲۰۰ وات

جدول ۳ ضرایب و شاخص‌های آماری مربوط به مدل میدیلی الف: تیمار شاهد

Drying condition	R <sup>2</sup>	RMSE	SSE	$\chi^2$	a	b	k	n
NT1V1	0.9998	0.004647	0.0008749	2.18725E-05	0.9687	1.228e-005	0.0004747	1.377
NT1V2	0.9993	0.008478	0.002588	7.18889E-05	0.9689	-1.651e-005	0.0006982	1.325
NT1V3	0.9991	0.01035	0.003532	0.00010703	0.978	-1.023e-005	0.0007852	1.208
NT2V1	0.999	0.0106	0.003817	0.000112265	0.9702	1.347e-005	0.0006828	1.297
NT2V2	0.998	0.01492	0.01492	0.000452121	0.964	4.424e-006	0.0009141	1.285
NT2V3	0.9978	0.01537	0.007322	0.000236194	0.9897	-1.138e-005	0.001295	1.105
NT3V1	0.9995	0.007292	0.001648	5.31613E-05	0.9854	1.321e-005	0.001434	1.225
NT3V2	0.9942	0.005663	0.0009302	3.20759E-05	0.9822	2.34e-005	0.001919	1.26
NT3V3	0.9988	0.01126	0.003551	0.000126821	0.9942	-2.48e-005	0.00274	1.131
NT4V1	0.9987	0.01126	0.003551	0.000126821	0.9822	2.34e-005	0.001919	1.26
NT4V2	0.9997	0.005404	0.0007584	2.91692E-05	0.9985	0.0001096	0.004205	1.313
NT4V3	0.9997	0.005064	0.0005643	0.00002565	1.006	5.44e-006	0.004921	1.099
NT5V1	0.9996	0.006378	0.0009356	4.06783E-05	0.9876	6.357e-005	0.002401	1.303
NT5V2	0.9999	0.003137	0.0002066	9.8381E-06	0.995	7.633e-005	0.004758	1.233
NT5V3	0.9999	0.002509	0.0001133	6.29444E-06	0.994	3.636e-005	0.006712	1.124
NT6V1	0.9998	0.004837	0.0004445	2.33947E-05	0.9926	2.59e-005	0.003791	1.286
NT6V2	0.9997	0.006267	0.0007069	3.92722E-05	0.9973	0.004157	0.004157	1.292
NT6V3	0.9998	0.004437	0.000315	1.96875E-05	0.993	8.772e-005	0.008578	1.148

N = تیمار شاهد

T = دما

V = سرعت هوا

ب: پیش تیمار مایکروویو با توان ۱۰۰ وات

Drying condition	R <sup>2</sup>	RMSE	SSE	$\chi^2$	a	b	k	n
P1T1V1	0.9971	0.01458	0.006801	0.000213	1.008	2.271e-008	0.002795	0.8464
P1T1V2	0.9962	0.01703	0.009282	0.00029	1.034	2.775e-005	0.004791	0.7782
P1T1V3	0.9993	0.007656	0.0017	5.86E-05	1.029	2.507e-005	0.005271	0.7471
P1T2V1	0.9983	0.01161	0.004042	0.000135	1.019	2.462e-005	0.0051	0.8455
P1T2V2	0.9988	0.01027	0.002954	0.000106	1.007	4.98e-005	0.005284	1.037
P1T2V3	0.9996	0.005951	0.0009208	3.54E-05	1.008	5.25e-005	0.005899	1.134
P1T3V1	0.9986	0.01099	0.003263	0.000121	1.017	1.708e-005	0.006513	0.8745
P1T3V2	0.9995	0.007097	0.001259	5.04E-05	0.9927	-3.788e-006	0.006483	1.063
P1T3V3	0.9943	0.02309	0.01227	0.000533	1.033	0.0001272	0.007206	1.1
P1T4V1	0.999	0.01015	0.002371	0.000103	0.9938	1.65e-005	0.009173	1.123
P1T4V2	0.9998	0.00508	0.0005677	2.58E-05	0.9987	3.673e-005	0.009597	1.167
P1T4V3	0.9969	0.01657	0.005491	0.000275	1.023	0.0001212	0.009523	1.162
P1T5V1	0.9988	0.01209	0.002921	0.000146	1.017	9.613e-005	0.01139	1.122
P1T5V2	0.9996	0.006739	0.0008175	4.54E-05	1.008	0.0001284	0.01886	1.281
P1T5V3	0.9993	0.008874	0.00126	7.88E-05	1.009	0.0001408	0.0188	1.291
P1T6V1	0.9988	0.01164	0.002305	0.000136	1.01	0.000152	0.02065	1.238
P1T6V2	0.9994	0.008737	0.001221	7.63E-05	1.006	5.433e-005	0.02694	1.273
P1T6V3	0.9996	0.006442	0.000581	4.15E-05	0.9978	0.0001412	0.03056	1.453

P<sub>1</sub> = پیش تیمار مایکروویو با توان ۱۰۰ وات

T = دما

V = سرعت هوا

ج: پیش تیمار مایکروویو با توان ۲۰۰ وات

Drying condition	R <sup>2</sup>	RMSE	SSE	$\chi^2$	a	b	k	n
P2T1V1	0.9993	0.006235	0.000972	0.00003888	0.9983	-6.934e-005	0.02894	0.5918
P2T1V2	0.9984	0.009877	0.002341	9.7542E-05	1.005	-2.513e-005	0.0303	0.613
P2T1V3	0.9993	0.00685	0.001032	4.6909E-05	1.002	5.584e-005	0.03402	0.7586
P2T2V1	0.9958	0.01602	0.005906	0.00025678	1.005	-0.0001504	0.03239	0.5741
P2T2V2	0.9968	0.015	0.004722	0.00022486	0.9911	-0.0001431	0.04586	0.6914
P2T2V3	0.9871	-7.138e-5	0.004258	0.0002129	0.9871	-7.138e-005	0.04689	0.7639
P2T3V1	0.9966	0.01541	0.004989	0.00023757	0.9906	-0.0002002	0.05009	0.6562
P2T3V2	0.9992	0.007626	0.001105	5.8158E-05	0.997	-0.0001639	0.05239	0.6491
P2T3V3	0.9983	0.01136	0.002323	0.00012906	0.9925	-4.439e-005	0.05358	0.7711
P2T4V1	0.999	0.008786	0.001467	7.7211E-05	0.994	-6.655e-005	0.05913	0.7435
P2T4V2	0.9994	0.00686	0.000847	4.7056E-05	0.9999	-0.0001222	0.05952	0.7054
P2T4V3	0.9991	0.00799	0.001022	6.3875E-05	0.9977	-7.34e-005	0.06198	0.7817
P2T5V1	0.9981	0.012	0.00245	0.00014412	0.9985	-9.226e-005	0.06345	0.7352
P2T5V2	0.999	0.008949	0.001281	8.0063E-05	0.9976	2.201e-005	0.06568	0.8512
P2T5V3	0.9994	0.007437	0.0007743	5.5307E-05	0.996	0.0001138	0.07742	0.9587
P2T6V1	0.9998	0.004791	0.0003214	2.2957E-05	0.998	0.0001233	0.08964	0.9866
P2T6V2	0.9988	0.01087	0.001536	0.00011815	0.9919	5.543e-005	0.09128	0.9789
P2T6V3	0.991	0.00949	0.001081	9.0083E-05	0.9947	0.0001157	0.09605	1.016

P<sub>2</sub> = پیش تیمار مایکروویو با توان ۲۰۰ وات

T = دما

V = سرعت هوا

جدول ۴ ارتباط بین الف) تیمار شاهد ضرایب مدل میدیلی با دما و سرعت هوا

$a=0.0030833T_{abs}+0.002958V$	$R^2=0.99$	(۹)
$b=e^{-0.03374T_{abs}+0.7473V}$	$R^2=0.97$	(۱۰)
$k=e^{0.02088T_{abs}-0.071944V}$	$R^2=0.97$	(۱۱)
$n=0.00363T_{abs}+0.06558V$	$R^2=0.99$	(۱۲)
$MR(T,V)=[0.0030833T_{abs}+0.002958V] \times \exp[-e^{0.02088T_{abs}-0.071944V} \times t^{0.00363T_{abs}+0.06558V}] + [e^{-0.03374T_{abs}+0.7473V} t]$ (۱۳)		
ب) پیش تیمار مایکروویو با توان ۱۰۰ وات		
$a=0.003148T_{abs}+0.034957V$	$R^2=0.99$	(۱۴)
$b=e^{-0.02959T_{abs}-0.5342V}$	$R^2=0.96$	(۱۵)
$k=e^{-0.01291T_{abs}-0.4399V}$	$R^2=0.99$	(۱۶)
$n=0.00211841T_{abs}+0.190233V$	$R^2=0.98$	(۱۷)
$MR(T,V)=[0.003148T_{abs}+0.034957V] \times \exp[-e^{-0.01291T_{abs}-0.4399V} t^{0.00211841T_{abs}+0.190233V}] + [e^{-0.02959T_{abs}-0.5342V} t]$ (۱۸)		
ج) پیش تیمار مایکروویو با توان ۲۰۰ وات		
$a=0.003008T_{abs}+0.001746V$	$R^2=0.99$	(۱۹)
$b=e^{-0.02721T_{abs}-0.4165V}$	$R^2=0.99$	(۲۰)
$k=e^{-0.00793T_{abs}-0.01764V}$	$R^2=0.99$	(۲۱)
$n=0.0020991T_{abs}+0.11261V$	$R^2=0.98$	(۲۲)
$MR(T,V)=[0.003008T_{abs}+0.001746V] \times \exp[-e^{-0.00793T_{abs}-0.01764V} t^{0.0020991T_{abs}+0.11261V}] + [e^{-0.02721T_{abs}-0.4165V} t]$ (۲۳)		

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیرات پیش تیمار مایکروویو بر زمان و مدل خشک شدن دانه انار ترش بررسی شد. آزمایش‌های خشک شدن لایه نازک دانه انار در سه تیمار شاهد، پیش تیمار مایکروویو با توان ۱۰۰ وات و پیش تیمار مایکروویو با توان ۲۰۰ وات و در شش سطح دمایی ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۶۵ و ۷۰ درجه سلسیوس و سه سطح سرعت هوا ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه انجام شد. با توجه به ضرایب  $R^2$ ،  $\chi^2$  و  $RMSE$  بدست آمده از برازش مدل‌های تجربی بر داده‌های آزمایشگاهی، مشخص گردید که مدل میدیلی بهترین برازش را بر داده‌های آزمایشگاهی دارد. انجام عملیات پیش تیمار با استفاده از مایکروویو با توان‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ وات، زمان خشک شدن دانه‌های انار را نسبت به تیمار شاهد به طور معنی‌داری کاهش داد. همچنین با افزایش دما و سرعت باد، زمان خشک شدن به طور

معنی‌داری در سطوح مختلف کاهش یافت. افزون بر این، آهنگ ثابت خشک شدن ( $k$ ) در مدل میدیلی با انجام عملیات پیش تیمار افزایش یافت به طوری که بیشترین مقدار آن در پیش تیمار مایکروویو با توان ۲۰۰ وات برابر با ۰/۰۹۱۲۸ گرم بر دقیقه بدست آمد.

#### ۵- منابع

- [1] Das, I., Das, S. K. and Bal, S., (2004). Specific energy and quality aspects of infrared (IR) dried parboiled rice. *Journal of Food Engineering*, 68: 249-255.
- [2] Chakraverty, A., & Singh, R. P. (1988). *Post harvest Technology of Cereals, Pulses and Oilseeds*. OXFORD & IBH PUBLISHING CO. PVT. LTD. New Delhi.
- [3] Simal, S., Femenia, A., Garau, M.C., Rossello, C., (2005). Use of Exponential, Page's and Diffusional models to simulate the drying Kinetics of Kiwi Fruit. *Journal of Food Engineering*. 66: 323-328.

- and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management*, 44(10), 1689–1705.
- [17] Yaldiz, O., and Ertekin, C. (2001). Thin layer solar drying of some different vegetables. *Drying Technology*, 19, 583–596.
- [18] Nguyen, H. M, Price, E. W. (2007). Air drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. *Journal of Food Engineering*. Vol, 79, 200-207.
- [19] Menges, H. O and C. Ertekin. (2005). Mathematical modeling of thin layer drying of golden apples. *Journal of Food Engineering*. 177: 119-125.
- [20] 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.
- [21] Chhinnan, M. S. (1984). Evaluation of selected mathematical models for describing thin-layer drying of in-shell pecans. *Transactions of the ASAE*, 27, 610–615.
- [22] Dandamrongrak, R., Young, G., and Mason, R. (2002). Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. *Journal of Food Engineering*, 95, 139–146.
- [23] Wang, Z., J. Sun, X. Liao, F. Chen, G. Zhao, J. Wu, and X. Hu. (2007). Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*, 40:39–46
- [24] Diamante, L. M., and Munro, P. A., (1991). Mathematical modeling of hot air drying of sweet potato slices. *International Journal of Food Science and Technology*, 26, 99.
- [25] Ertekin, C., and Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63, 349–359.
- [26] Ayensu, A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy*, 59(4–6), 121–126.
- [4] Bozkır, O., (2006). Thin-layer drying and mathematical modeling for washed dry apricots. *Journal of Food Engineering*, 77: 146–151.
- [5] Demir, V., T. Gunhan, and A.K. Yagcioglu. (2007). Mathematical modelling of convection drying of green table olives. *Biosystems engineering*, 98: 47 – 53.
- [6] Doymaz, I and M. Pala. (2003). The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*, 60 : 125–130.
- [7] Sharma G. P., R. C. Verma and P. Pankaj .(2005) .Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of Food Engineering* .Vol 171. 282-286.
- [8] Schiffman, R.F., 1992, Microwave processing in the U.S. food industry. *Food Technology*, 50–52: 56
- [9] Adu B; Otten L (1996). Diffusion characteristics of white beans during microwave drying. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 64(1), 61–69.
- [10] Walde S G; Balaswamy K; Velu V; Rao D G (2002). Microwave drying and grinding characteristics of wheat (*Triticum aestivum*). *Journal of Food Engineering*, 55, 271–276.
- [11] Litvin S; Mannheim C H; Miltz J (1998). Dehydration of carrots by a combination of freeze drying, microwave heating and air or vacuum drying. *Journal of Food Engineering*, 36, 103–111.
- [12] Lin T M; Durance T D; Seaman C H., (1998). Characterization of vacuum microwave air and freeze dried carrot slices. *Food Research International*, 4, 111–117.
- [13] Funebo T; Ohlsson T., (1998). Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. *Journal of Food Engineering*, 38, 353–367.
- [14] Doymaz, I. (2005). Influence of pretreatment solution on the drying of Sour-Cherry. *Journal of Food Engineering* 78, 591–596.
- [15] Doymaz, I. (2007). Air drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*. 78, 1291-1297.
- [16] Akpınar, E. K., Midilli, A., and Bicer, Y. (2003b). Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer

## Effect of microwave pretreatment on drying time of pomegranate arils and Simulation model coefficients

Motevali, A.<sup>1</sup>, Minaei, S.<sup>2\*</sup>, Khoshtaghaza, M. H.<sup>3</sup>, Azizi, M. H.<sup>4</sup>

1-Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University

2-Corresponding author, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University

3-Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University

4-Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University

(Received: 89/5/6 Accepted: 89/9/23)

Ten semi-theoretical and empirical models were fitted to the experimental data to evaluate and select the best model for thin-layer drying of pomegranate arils. Experiments were conducted at six temperature levels of 45, 50, 55, 60, 65 and 70 °C and three levels of air velocity (0.5, 1 and 1.5 m/s). Microwave pretreatments were used for samples and the results were compared to those of control (no pretreatments). Regression analysis of mathematical models showed that the Midilli *et al.* model fitted best to the measured data. Midilli *et al.* model coefficients increased with increasing temperature and air velocity. Also, the results of statistical analyses showed that pretreatment of pomegranate arils significantly reduces drying time.

**Keyword:** Pretreatment, Drying, Microwave, Simulation coefficients

---

\* Corresponding Author E-mail address: [minaee@modares.ac.ir](mailto:minaee@modares.ac.ir)