

## انتخاب مدل ریاضی مناسب برای کینتیک خشک شدن ماست در خشک کن مایکروویو - خلاء

عبدالرحمن قادری<sup>۱</sup>، سلیمان عباسی<sup>۲\*</sup>، زهره حمیدی<sup>۲</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

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

\*نویسنده مسئول (sabbasfood@modares.ac.ir)

### چکیده

در مطالعه‌ی حاضر، کینتیک خشک شدن ماست بدون چربی با ضخامت ۲/۲ میلی متر در توان های ۳۵، ۱۳۰ و ۲۶۰ وات و فشارهای مطلق ۶۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی بار در خشک کن مایکروویو-خلاء مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین برای انتخاب مناسب‌ترین مدل، میزان برازش داده های بدست آمده با ۱۲ مدل تجربی و نیمه تجربی اندازه گیری شد. براساس یافته‌های این بررسی، توان مایکروویو تاثیر بسزایی در زمان خشک شدن داشت به طوری که با افزایش توان مایکروویو زمان خشک شدن از ۹۰ دقیقه به ۱۵ دقیقه کاهش یافت. اما کاهش فشار مطلق سامانه تاثیری در زمان خشک شدن نداشت. در میان مدل-های برازش شده نیز دو مدل لوجیستیک و میدیلی و همکاران به دلیل دارا بودن بالاترین  $R^2$  و کمترین RMSE به عنوان مناسب ترین مدل ها انتخاب شدند. در ضمن، با افزایش توان مایکروویو، ضریب نفوذ موثر از  $10^{-9}$  تا  $4/42 \times 10^{-9}$  افزایش یافت در حالی که فشار روی این عامل بی تاثیر بود. انرژی فعال سازی هم با استفاده از معادله اصلاح شده آرنیوس محاسبه شد.

تاریخ دریافت: ۹۰/۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۹۰/۸/۳۰

### واژه‌های کلیدی

خشک کن مایکروویو-خلاء  
کینتیک  
ضریب نفوذ ویژه  
ماست  
مدلسازی

### مقدمه

مطمئناً دلیل آن افزایش آگاهی مردم در ارتباط با منافع سلامتی بخش محصولات شیری تخمیر شده بود (Farnworth, 2008). بالاترین میزان تولید و مصرف ماست مربوط به کشورهای حوزه مدیترانه، کشورهای آسیایی و اروپای مرکزی است (Hayaloglu et al., 2007). معروفیت و مصرف بالای ماست به دلیل ارزش تغذیه ای آن و اثرات سودمند باکتری های آغازگر می باشد (Hamann and Marth, 1984). در ضمن، این فرآورده به دلیل غلظت بالاتر، قابلیت

ماست معروف ترین فرآورده تخمیری شیری است که از تخمیر اسید لاکتیکی شیر توسط باکتری های آغازگر ماست (استرپتوکوکوس ترموفیلوس و لاکتوباسیلوس بولگاریکوس) تولید می شود (Hayaloglu et al., 2007). در چند دهه گذشته مصرف محصولات تخمیر شده شیری به ویژه ماست به طور چشمگیری افزایش پیدا کرده است. بیشترین افزایش در طی دهه ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ روی داد که

هضم و جذب بهتر چربی، لاکتوز، پروتئین و مواد معدنی مغذی تر از شیر (Sarkar and Misra, 2002) جزء منابع غنی از کلسیم، فسفر، ریبوفلاون، ویتامین B<sub>12</sub>، اسید نیکوتینک، ویتامین B<sub>5</sub>، روی و منیزیم می باشد (Tamime and Robinson, 2007).

معمولا ماست در سراسر زنجیره توزیع در دمای ۲-۴ درجه سانتیگراد نگهداری می شود که این شرایط علاوه بر جلوگیری از فساد به وسیله مخمرها و کپک ها از فعالیت بیشتر باکتری های آغازگر نیز ممانعت می کند، ولی به هر حال استفاده از زنجیره سرما به قیمت تمام شده محصول می افزاید. لذا، با توجه به توضیحات بالا ماندگاری ماست در شکل طبیعی آن کوتاه است یعنی در شرایط محیط (۲۵-۳۰ درجه سانتیگراد) و ۷ درجه سانتیگراد می توان این فرآورده را به ترتیب به مدت یک تا پنج روز نگهداری نمود که این امر مانع تجاری شدن این محصول مفید شده است (Kumar and Mishra, 2004). همچنین، احتمال دارد این عیب یکی از دلایل عدم علاقه مندی کارخانجات به استفاده از این محصول (با توجه به طعم خاص) در فرمولاسیون مواد غذایی باشد. به منظور افزایش عمر انبارمانی ماست چندین روش نظیر حذف آب بوسیله صافی و خشک کردن در آفتاب یا استفاده از روش های مطلوب تر خشک کردن نظیر انجمادی، پاششی، میکروویوی و همرفتی پیشنهاد شده است (Hayaloglu et al., 2007). خشک کردن ماست دارای مزایایی نظیر عمر انبارانی بالاتر بدون استفاده از یخچال، کاهش حجم فرآورده، کاهش هزینه حمل و نقل، نگهداری و بسته بندی می شود. با توجه به ارزش تغذیه ای و دارا بودن طعم ویژه، می توان ماست خشک شده را در صنعت غذا به عنوان یک جزء افزودنی در شیرینی سازی، آب نبات، محصولات نانوایی، ویفر، شکلات، سوپ و غیره استفاده کرد (Tamime and Robinson, 2007; Hayaloglu et al., 2007). لازم به ذکر است که در حال حاضر شاید بهترین روش برای خشک کردن مواد غذایی به ویژه ماست خشک کردن انجمادی باشد (Tamime and Robinson, 2007) اما این روش به دلیل هزینه بالای تولید و زمان طولانی فرآیند بیشتر برای محصولاتی با ارزش افزوده بالا به کار می رود

هضم و جذب بهتر چربی، لاکتوز، پروتئین و مواد معدنی مغذی تر از شیر (Sarkar and Misra, 2002) جزء منابع غنی از کلسیم، فسفر، ریبوفلاون، ویتامین B<sub>12</sub>، اسید نیکوتینک، ویتامین B<sub>5</sub>، روی و منیزیم می باشد (Tamime and Robinson, 2007).

معمولا ماست در سراسر زنجیره توزیع در دمای ۲-۴ درجه سانتیگراد نگهداری می شود که این شرایط علاوه بر جلوگیری از فساد به وسیله مخمرها و کپک ها از فعالیت بیشتر باکتری های آغازگر نیز ممانعت می کند، ولی به هر حال استفاده از زنجیره سرما به قیمت تمام شده محصول می افزاید. لذا، با توجه به توضیحات بالا ماندگاری ماست در شکل طبیعی آن کوتاه است یعنی در شرایط محیط (۲۵-۳۰ درجه سانتیگراد) و ۷ درجه سانتیگراد می توان این فرآورده را به ترتیب به مدت یک تا پنج روز نگهداری نمود که این امر مانع تجاری شدن این محصول مفید شده است (Kumar and Mishra, 2004). همچنین، احتمال دارد این عیب یکی از دلایل عدم علاقه مندی کارخانجات به استفاده از این محصول (با توجه به طعم خاص) در فرمولاسیون مواد غذایی باشد. به منظور افزایش عمر انبارمانی ماست چندین روش نظیر حذف آب بوسیله صافی و خشک کردن در آفتاب یا استفاده از روش های مطلوب تر خشک کردن نظیر انجمادی، پاششی، میکروویوی و همرفتی پیشنهاد شده است (Hayaloglu et al., 2007). خشک کردن ماست دارای مزایایی نظیر عمر انبارانی بالاتر بدون استفاده از یخچال، کاهش حجم فرآورده، کاهش هزینه حمل و نقل، نگهداری و بسته بندی می شود. با توجه به ارزش تغذیه ای و دارا بودن طعم ویژه، می توان ماست خشک شده را در صنعت غذا به عنوان یک جزء افزودنی در شیرینی سازی، آب نبات، محصولات نانوایی، ویفر، شکلات، سوپ و غیره استفاده کرد (Tamime and Robinson, 2007; Hayaloglu et al., 2007). لازم به ذکر است که در حال حاضر شاید بهترین روش برای خشک کردن مواد غذایی به ویژه ماست خشک کردن انجمادی باشد (Tamime and Robinson, 2007) اما این روش به دلیل هزینه بالای تولید و زمان طولانی فرآیند بیشتر برای محصولاتی با ارزش افزوده بالا به کار می رود

هضم و جذب بهتر چربی، لاکتوز، پروتئین و مواد معدنی مغذی تر از شیر (Sarkar and Misra, 2002) جزء منابع غنی از کلسیم، فسفر، ریبوفلاون، ویتامین B<sub>12</sub>، اسید نیکوتینک، ویتامین B<sub>5</sub>، روی و منیزیم می باشد (Tamime and Robinson, 2007).

معمولا ماست در سراسر زنجیره توزیع در دمای ۲-۴ درجه سانتیگراد نگهداری می شود که این شرایط علاوه بر جلوگیری از فساد به وسیله مخمرها و کپک ها از فعالیت بیشتر باکتری های آغازگر نیز ممانعت می کند، ولی به هر حال استفاده از زنجیره سرما به قیمت تمام شده محصول می افزاید. لذا، با توجه به توضیحات بالا ماندگاری ماست در شکل طبیعی آن کوتاه است یعنی در شرایط محیط (۲۵-۳۰ درجه سانتیگراد) و ۷ درجه سانتیگراد می توان این فرآورده را به ترتیب به مدت یک تا پنج روز نگهداری نمود که این امر مانع تجاری شدن این محصول مفید شده است (Kumar and Mishra, 2004). همچنین، احتمال دارد این عیب یکی از دلایل عدم علاقه مندی کارخانجات به استفاده از این محصول (با توجه به طعم خاص) در فرمولاسیون مواد غذایی باشد. به منظور افزایش عمر انبارمانی ماست چندین روش نظیر حذف آب بوسیله صافی و خشک کردن در آفتاب یا استفاده از روش های مطلوب تر خشک کردن نظیر انجمادی، پاششی، میکروویوی و همرفتی پیشنهاد شده است (Hayaloglu et al., 2007). خشک کردن ماست دارای مزایایی نظیر عمر انبارانی بالاتر بدون استفاده از یخچال، کاهش حجم فرآورده، کاهش هزینه حمل و نقل، نگهداری و بسته بندی می شود. با توجه به ارزش تغذیه ای و دارا بودن طعم ویژه، می توان ماست خشک شده را در صنعت غذا به عنوان یک جزء افزودنی در شیرینی سازی، آب نبات، محصولات نانوایی، ویفر، شکلات، سوپ و غیره استفاده کرد (Tamime and Robinson, 2007; Hayaloglu et al., 2007). لازم به ذکر است که در حال حاضر شاید بهترین روش برای خشک کردن مواد غذایی به ویژه ماست خشک کردن انجمادی باشد (Tamime and Robinson, 2007) اما این روش به دلیل هزینه بالای تولید و زمان طولانی فرآیند بیشتر برای محصولاتی با ارزش افزوده بالا به کار می رود

## مواد و روش ها

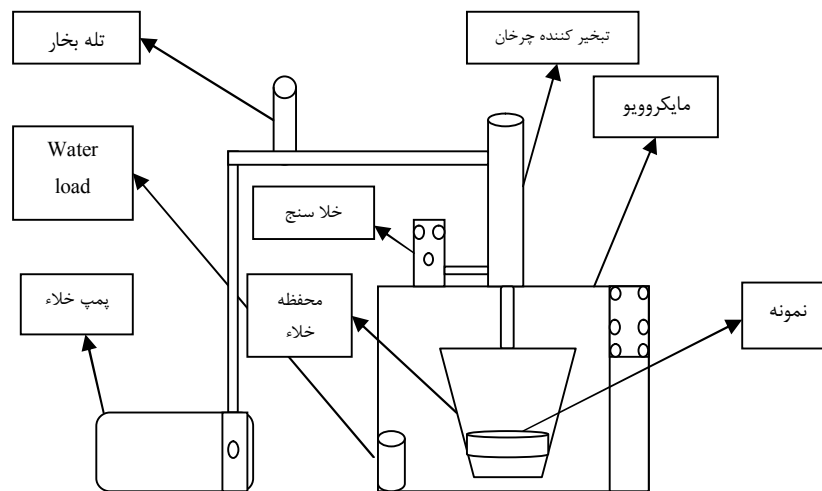
### مواد

برای تهیه ماست بدون چربی، شیر پس چرخ از کارخانه پاک تهران تهیه شد و پس از پاستوریزاسیون در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه مایه

ماست اضافه و مخلوط در دمای ۴۲-۴۵ درجه سانتیگراد به مدت ۴ ساعت در گرمخانه نگهداری شد. سپس ماست تهیه شده در فریزر ۱۸- درجه سانتیگراد تا زمان مصرف نگهداری شد تا از تغییرات ناخواسته و ترش شدن آن ممانعت شود. در ضمن، محتوای رطوبت اولیه نمونه های ماست (روش آنون) و چربی (روش ژرب) به ترتیب ۸/۳۰ کیلوگرم آب در کیلوگرم ماده خشک و ۰/۲۵ درصد بدست آمد (AOAC, 1999).

**دستگاه خشک کن**

در این تحقیق از یک خشک کن مایکروویو- خلاء آزمایشگاهی که در شکل ۱ نمایش داده شده است، استفاده گردید. برای تامین فشارهای مطلق تا ۲۰۰ میلی بار از پمپ خلاء Kawake airvac مدل jp-120h ساخت کشور تایوان) و برای فشارهای مطلق پایین تر (تا حدود ۶۰ میلی بار) از پمپ خلاء دیگری



شکل ۱- نمایش شماتیک نحوه و محل استقرار قسمت های مختلف خشک کن مایکروویو- خلاء مورد استفاده

#### روش اندازه گیری توان خروجی مایکروویو

در این پژوهش، اندازه گیری توان خروجی مایکروویو با استفاده از روش حرارت دهی تعیین شد. بدین صورت که تغییرات دمایی مقدار مشخص آب (برای مثال ۱۰۰۰ گرم) در یک مدت زمان معین اندازه گیری شد که بیانگر توان خروجی مایکروویو بود. افزایش دمای آب در واحد زمان را می توان بوسیله معادله ۱ محاسبه کرد:

$$(1) \quad Q_{abs} = Q = \frac{mCp\Delta\theta}{t} = \frac{4187 \times \Delta\theta}{t}$$

که در این فرمول  $Q$  = توان خروجی مایکروویو در مگنترون (W)،  $Q_{abs}$  = انرژی جذب شده بوسیله نمونه در واحد زمان (W)،  $m$  = جرم نمونه (kg)،  $Cp$  = گرمای ویژه نمونه (J/kgK)،  $\Delta\theta$  = افزایش دمای

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

در اینجا، MR: نسبت رطوبت (بدون بعد)،  $M_t$ : رطوبت نمونه ها در هر لحظه بر پایه خشک (kg water/kg solids)،  $M_e$ : رطوبت تعادلی نمونه ها (kg water/kg solids) و  $M_0$ : رطوبت اولیه نمونه ها (kg water/kg solids) می باشد. طرف چپ معادله، نسبت رطوبت را که مشخص کننده فرآیند خشک کردن است نشان می - دهد. از آنجایی که محتوای رطوبت تعادلی برای خشک کردن با میکروویو صفر در نظر گرفته می شود بنابراین، می توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت رابطه ۳ ساده کرد (Ozbek and Dadali, 2007).

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad (3)$$

در نتیجه برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه گیری رطوبت تعادلی نیست. برخی از مدل های استاندارد خشک شدن لایه نازک محصولات کشاورزی در جدول ۱ آمده است. نسبت های رطوبت بدست آمده طی آزمایشات مختلف با مدل های ارائه شده با استفاده از نرم افزار 7 MATLAB 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.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{pre} - MR_{exp,i})^2} \quad (4)$$

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

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

که در این رابطه ها  $MR_{exp,i}$ : امین نسبت رطوبتی آزمایش،  $MR_{pre,i}$ : امین نسبت رطوبتی پیش بینی شده توسط مدل، z: تعداد ثابت های مدل خشک شدن، N: تعداد مشاهدات آزمایش می باشد (McMinn, 2006).

نمونه ( $^{\circ}C$ )، t = زمان حرارت دهی میکروویو (s) می باشد (Cui et al., 2004).

### روش خشک کردن

به منظور بررسی کینتیک خشک کردن، عملیات خشک کردن ماست بدون چربی در شرایط مختلف ترکیبی فشار هوا و توان میکروویو مورد ارزیابی قرار گرفت. روش های مورد استفاده عبارت بودند از:

- نمونه های ۲۴ گرمی ماست بدون چربی با ضخامت ۲/۲ میلی متر داخل محفظه خلاء گذاشته شد و در توان های عملی ۳۵، ۱۳۰ و ۲۶۰ وات میکروویو و فشارهای مطلق (۵±۶۰، ۱۰±۲۰۰، ۱۰±۴۰۰، ۱۰±۶۰۰ و ۱۰±۸۰۰ میلی بار) و با سرعت چرخش ۲۰ دور در دقیقه برای رسیدن به رطوبت حدود ۵٪ خشک شدند (البته برای توان ۲۶۰ وات فقط از ۲ سطح فشار و برای توان ۳۵ وات علاوه بر ۴ فشار ذکر شده از فشار ۵±۶۰ میلی بار نیز استفاده شد). اعمال امواج میکروویو به صورت ۱۰ نوبت سه دقیقه ای، ۴ نوبت پنج دقیقه ای و بقیه ۱۰ دقیقه ای بود.

- روش ترکیبی ۲ (توان ثابت و فشار متغیر): در این روش از توان ثابت ۱۳۰ وات و فشار متغیر استفاده شد. فشارهای اعمال شده بدین شرح بود: ۹ دقیقه اول فشار ۴۰۰ میلی بار، ۳ دقیقه فشار ۶۰۰ میلی بار، ۳ دقیقه فشار ۴۰۰ میلی بار، بقیه زمان باقی مانده فشار ۲۰۰ میلی بار.

- روش ترکیبی ۳ (فشار مطلق ثابت و توان متغیر): در این روش عملیات خشک کردن ماست در فشار ثابت ۲۰۰ میلی بار و توان متغیر میکروویو انجام شد. توان - های اعمال شده بدین شرح بود: ۳ دقیقه اول توان ۱۳۰ وات، ۱۸ دقیقه توان ۳۵ وات، ۳ دقیقه توان ۱۳۰ وات، ۳ دقیقه توان ۳۵ وات، بقیه زمان باقی مانده در توان ۱۳۰ وات.

### مدل سازی ریاضی داده های خشک کردن

برای مدل سازی خشک شدن لایه نازک ماست، از نسبت رطوبت در طی خشک شدن نمونه ها استفاده شد. نسبت رطوبت با توجه به رابطه ۲ به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه ها در هر لحظه در طی خشک شدن وابسته است (Doymaz, 2005).

نفوذ ویژه (m<sup>2</sup>/s) و a نصف ضخامت نمونه و n عدد صحیح است. برای زمان‌های طولانی خشک کردن معادله بالا را می‌توان به صورت معادله ۸ خلاصه کرد. که از طرفین لگاریتم طبیعی نیز گرفته شده است.

محاسبه ضریب نفوذ موثر رطوبت و انرژی فعال سازی ضریب نفوذ موثر ماست در طی خشک کردن را میتوان بوسیله معادله ریاضی ساده شده مدل فیک محاسبه نمود. معادله نفوذ فیک برای یک تیغه نامحدود به صورت معادله ۷ نوشته می‌شود. مطابق قانون دوم فیک، رفتار خشک شدن ماست را می‌توان مطابق فرمول زیر بیان کرد. در این جا، D<sub>eff</sub> ضریب

جدول ۱- معادلات خشک کردن لایه نازک مورد استفاده برای انواع فرآورده‌های کشاورزی

| معادله مدل                                     | نام مدل                   | منبع                        | محصول   |
|------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------|
| $MR = \exp(-kt)$                               | نیوتن                     | (McMinn, 2006)              | جو      |
| $MR = \exp(-kt^n)$                             | پیچ                       | (Overhults et al., 1973)    | ذرت     |
| $MR = \exp(-(kt)^n)$                           | پیچ اصلاح شده             | (Ozbek and Dadali, 2007)    | سویا    |
| $MR = a \exp(-kt)$                             | هندرسون و پاییس           | (Panchariya et al., 2002)   | غلات    |
| $MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$ | هندرسون و پاییس اصلاح شده | (Rahman et al., 1998)       | میوه‌ها |
| $MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$         | دو جمله‌ای                | (Sarkar and Misra, 2002)    | ذرت     |
| $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$          | تقریب انتشار              | (Sharaf-Elden et al., 1980) | انگور   |
| $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$           | ورما و همکاران            | (Sharma and Prasad, 2005)   | برنج    |
| $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$          | دو جمله‌ای نمایی          | (Soysal et al., 2006)       | ذرت     |
| $MR = a \exp(-kt) + c$                         | لگاریتمی                  | (Tamime and Robinson, 2007) | سبزیجات |
| $MR = a \exp(-kt^n) + bt$                      | میدیلی و همکاران          | (Verma et al., 1985)        | ---     |
| $MR = b / (1 + a \exp(kt))$                    | لوچیسستیک                 | (Wang et al., 2007)         | ---     |

$$MR(t) = \frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-\frac{\pi^2(2n-1)^2 D_{eff} t}{4a^2}\right] \quad (7)$$

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\pi^2 \frac{D_{eff} t}{4a^2}\right) \quad (8)$$

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a m}{p} \quad (10)$$

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a m}{p}\right) \quad (11)$$

که با لگاریتم‌گیری از طرفین معادله ۱۰، رابطه ۱۱ به صورت خطی در می‌آید.

یعنی برای بدست آوردن انرژی فعال سازی در مایکروویو وابستگی بین ضریب انتشار رطوبت موثر و نسبت توان خروجی مایکروویو در برابر مقدار نمونه (وزن/توان) بر اساس مدل آرینوس بدست آید (Ozbek and Dadali, 2007).

ضریب k<sub>0</sub> (شیب معادله ۸) با رسم منحنی ln(MR) در مقابل زمان (t) محاسبه می‌شود (Wang et al., 2005; Doymaz, 2007). بدین ترتیب ضریب نفوذ موثر رطوبتی (D<sub>eff</sub>) از رابطه ۹ بدست می‌آید.

$$k_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4a^2} \quad (9)$$

از آنجایی که دما در خشک کن مایکروویو در هنگام کار به طور دقیق قابل اندازه گیری نیست، برای به دست آوردن انرژی فعال سازی باید از شکل اصلاح شده رابطه آرینوس استفاده کرد.

#### آنالیز آماری

شده است. دلیل اینکه بعضی فشارها فقط در ترکیب با برخی توان ها استفاده شدند این بود که در فشارهای مذکور در توان‌های بالا (که نتایج نشان داده نشده است) پرتاب ماست اتفاق می افتاد که هم باعث کثیف شدن محفظه و هم عدم صحت نمودارهای خشک کردن نمونه های در حال خشک شدن می گردید (زیرا همانطوری که گفته شد نمودارهای خشک کردن بوسیله توزین های متوالی رسم می شد).

همانطوری که دیده می شود هنگامی که توان میکروویو ثابت بود سرعت خشک شدن با کاهش فشار ثابت مانده و تغییر خاصی دیده نشد و زمان خشک شدن برای همه فشارهای استفاده شده در یک محدوده قرار داشت و حدود ۹۰ دقیقه طول کشید. به طور کلی تفاوت قابل ملاحظه ای در روند خشک شدن در فشارهای ۶۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی بار دیده نشد و شیب نمودار برای همه فشارها از دقیقه ۹ به بعد افزایش یافت. احتمالاً علت چنین پدیده ای این است که توان ۳۵ وات، فاقد قدرت لازم برای تبخیر سریع آب باشد، بطوریکه چند دقیقه اول صرف گرم شدن و افزایش دمای نمونه شده، در حالیکه مقدار آب تبخیر شده ناچیز است. اما در ادامه و با گرم شدن نمونه ها بعد از ۹ دقیقه عمل خشک شدن با سرعت بیشتری صورت گرفته است.

نمودار تغییرات نسبت رطوبت در سه فشار مختلف (۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی بار) در توان ۱۳۰ وات در شکل ۲ (ب) نمایش داده شده است. همانطوری که از نمودار پیداست افزایش فشار از ۴۰۰ به ۶۰۰ و متعاقباً به ۸۰۰ میلی بار در زمان خشک شدن تاثیری نداشته و زمان خشک شدن برای شرایط مختلف فشار تقریباً یکسان بوده است. در صورت استفاده از این توان میکروویو، زمان مورد نیاز برای رسیدن محتوای رطوبت از ۸/۷۵ به ۰/۰۵ در حدود ۲۷ دقیقه طول کشید.

نمودار تغییرات محتوای رطوبت برای فشارهای مختلف (۶۰۰ و ۸۰۰ میلی بار) در توان ۲۶۰ وات نیز در شکل ۲ (ج) نمایش داده شده است. همانطوری که در شکل ۲ (ج) دیده می شود خشک شدن در این توان با شیب تندتری نسبت به دو توان قبلی آغاز شده است که علت آن قدرت بالای توان اعمال شده و

برای برازش مدل های استاندارد خشک شدن لایه نازک با داده های آزمایشی از محیط برازش منحنی های نرم افزار MATLAB 7 استفاده شد. رسم منحنی ها هم با استفاده از نرم افزار Excel انجام شد.

## نتایج و بحث

### توان عملی دستگاه مایکروویو

آون های مایکروویو معمولاً مطابق توان اسمی طبقه بندی می شوند. به طور کلی خروجی توان مایکروویو با توانی که در دفترچه تولیدکننده قید شده است متفاوت است که دلایل زیادی علت این پدیده هستند. زمانی که مگنترون فرسوده تر شد فیلامنت مدت زمان بیشتری نیاز دارد تا به شرایط تشعشع برسد. همچنین، اگر مگنترون برای مدت زمان طولانی کار کند تغییرات توانی ممکن است اتفاق بیفتد. زیرا حرارت دهی طولانی آهن ربای دائمی منجر به کاهش میدان مغناطیسی شده که این عمل باعث کاهش ولتاژ و در نتیجه افت توان خروجی می شود. بنابراین، اندازه گیری توان خروجی مایکروویو و اطمینان از ثابت بودن توان خروجی امری ضروری است. برای تعیین توان خروجی از روش استاندارد اسپچیفامن<sup>۱</sup> استفاده شد (Cui et al., 2004). در این روش دمای آب قبل و بعد از حرارت دهی با مایکروویو بوسیله ترموکوپل اندازه گیری شد و با جای گذاری در معادله ۱ توان عملی بدست آمد. این اندازه گیری برای هر توان در ۳ تکرار انجام گردید، و میانگین حاصله همراه انحراف معیار توان خروجی گزارش شد. در مطالعه حاضر توان خروجی برای ۱۰ (۱۲۰ وات)، ۳۰ (۳۶۰ وات) و ۵۰ درصد (۶۰۰ وات) توان کامل اسمی به ترتیب  $2 \pm 35$ ،  $3 \pm 260$  و  $5 \pm 130$  وات بدست آمدند. بنابراین، توان‌های استفاده شده در این بررسی بر مبنای همین توان‌های عملی اندازه‌گیری شده بیان شده‌اند.

### کینتیک خشک کردن

نمودار تغییرات محتوای رطوبت در فشارهای مطلق مختلف (۶۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی بار) در توان ۳۵ وات در شکل ۲ (الف) نمایش داده

باشد که در این زمان ها توان اعمال شده از ۳۵ به ۱۳۰ وات افزایش یافته است.

تیمار ترکیبی ۳ که در آن تقریباً به طور مساوی از دو توان ۳۵ و ۱۳۰ وات استفاده شده است حدود ۴۵ دقیقه طول کشیده است که این زمان تقریباً حد واسط زمان خشک شدن ماست با هریک از توان های ۳۵ و ۱۳۰ وات به تنهایی می باشد. با مشاهده روند خشک شدن برای تیمار ترکیبی ۳ در شکل ۵ می توان پی برد که هر جا شیب نمودار شبیه توان ۳۵ وات می باشد توان اعمال شده ۳۵ وات و هر جا شیب شبیه توان ۱۳۰ وات می باشد توان اعمال شده ۱۳۰ وات بوده که این یافته نیز موثرتر بودن توان و کم تاثیرتر بودن خلا را در فرآیند خشک شدن توسط خشک کن میکروویو- خلاء نشان می دهد.

همانطوری که دیده می شود هنگامی که توان میکروویو ثابت ماند تغییر فشار تاثیری در سرعت خشک شدن نشان نداد و زمان خشک شدن برای همه فشارهای استفاده شده در یک محدوده قرار داشت. این نتایج با نتایج بدست آمده توسط برخی محققان (Kiranoudis et al., 1997; Abbasi and Azari, 2009; Line et al., 1999; Kaensup, et al., 2002; Cui, et al., 2004; Sharma and Arora, 1995; Bondaruk, et al., 2007) هم خوانی داشت. علت این تفاوتها را می توان به تاثیر ضخامت نمونه غذایی در فرآیند خشک کردن نسبت داد. در ضخامت های کم (حدود ۳ تا ۵ میلی متر) سرعت خشک شدن بوسیله نرخ اتلاف انرژی کنترل می شود. در حالی که در ضخامت های بیشتر (۳ تا ۴ سانتی متر) سرعت خشک شدن بوسیله انتشار رطوبت کنترل می شود و بنابراین تحت تاثیر فشار سامانه قرار می گیرد و فشار پایین تر (به دلیل گرادیان فشار بیشتر) منجر به سرعت خشک شدن سریع تر می شود (Cui, et al., 2004; Bondaruk, et al., 2007).

به طور کلی، در همه تیمارهای مورد استفاده در این بررسی زمان خشک شدن با افزایش توان میکروویو کاهش یافت و سرعت خشک شدن بالاتر در توان بالاتر میکروویو بدست آمد. بنابراین، توان میکروویو نقش بسیار مهم و موثری روی زمان خشک شدن داشت که با نتایج سایر محققین نیز همخوانی

جذب بیشتر انرژی توسط مولکول های آب می باشد. در اینجا نیز همانند توان های ۳۵ و ۱۳۰ وات اختلاف چندانی بین ۲ فشار اعمال شده در سرعت و روند خشک شدن مشاهده نمی شود و زمان پایانی خشک شدن برای هر دو تقریباً یکسان است.

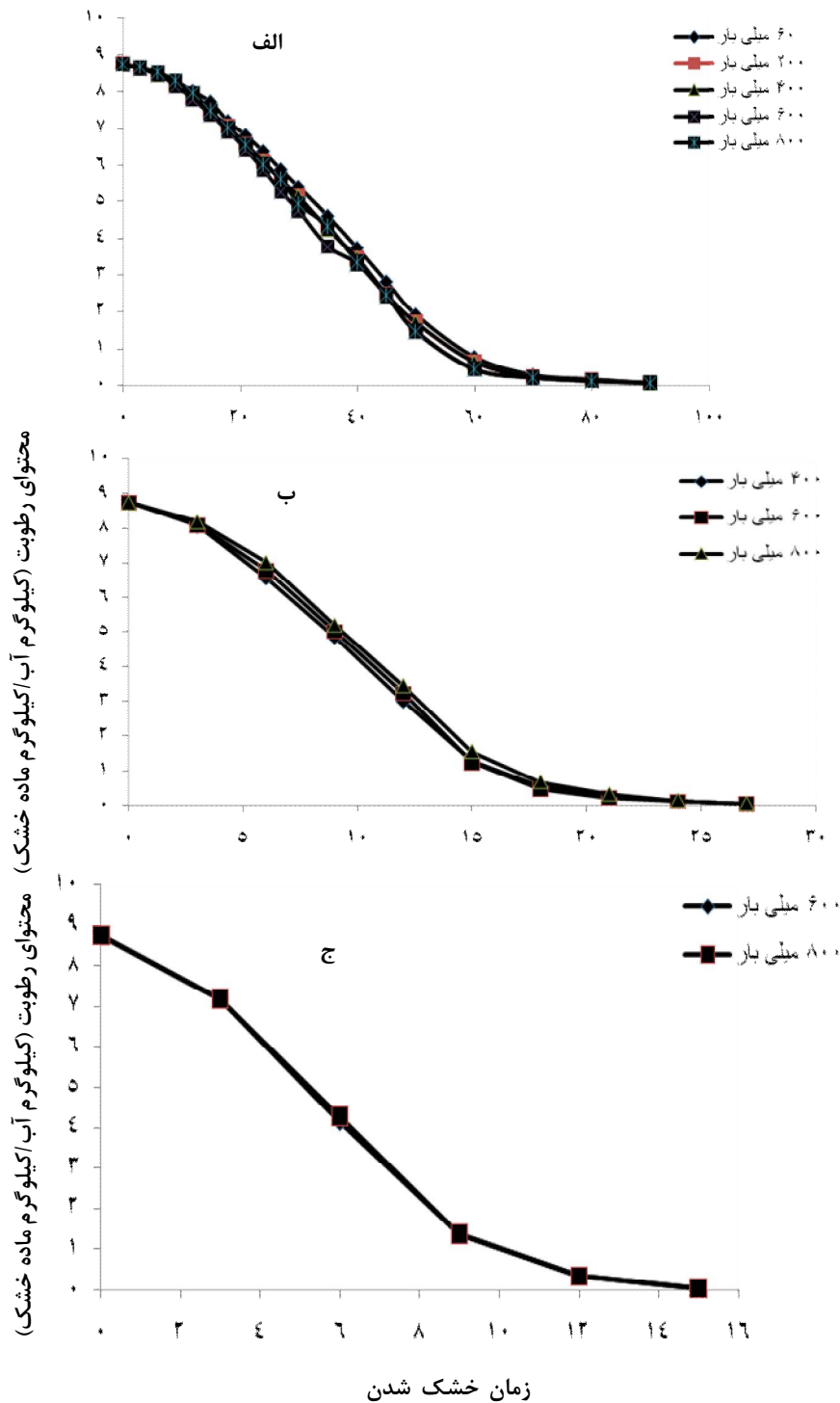
نمودار تغییرات محتوای رطوبت برای تیمار ترکیبی ۲ (توان ثابت ۱۳۰ وات، فشار مطلق متغیر) در شکل ۳ نمایش داده شده است. همانطوری که پیداست روند خشک شدن مشابه روندهای مشاهده شده در سایر تیمارهای قبلی می باشد و تغییر فشار مطلق از ۲۰۰ تا ۶۰۰ میلی بار تاثیر خاصی در روند خشک شدن نداشته است. برای مثال در دقیقه ۹، میزان فشار از ۴۰۰ به ۶۰۰ میلی بار افزایش یافت اما شیب نمودار خشک شدن تغییری نشان نداد، و یا از دقیقه ۱۵ به بعد، فشار از ۴۰۰ به ۲۰۰ میلی بار کاهش یافت و تا انتها فرآیند خشک شدن، این شرایط حفظ شد اما در روند خشک شدن باز هم تغییری دیده نشد. روند خشک شدن در این تیمار ترکیبی می تواند تا حدودی ادعاهای ذکر شده در بالا را، مبنی بر عدم تاثیر قابل ملاحظه تغییر فشار در برابر توان میکروویو تایید نماید. زمان خشک شدن برای این تیمار نیز در حدود ۲۷ دقیقه طول کشید که برابر زمان خشک شدن ماست با توان ۱۳۰ وات می باشد.

نمودار تغییرات محتوای رطوبت برای تیمار ترکیبی ۳ (فشار مطلق ۲۰۰ میلی بار، توان متغیر) در شکل ۴ نمایش داده شده است. همانطوری که دیده می شود روند خشک شدن مشابه روندهای مشاهده شده در سایر تیمارهای قبلی نبوده و نمودار در چند نقطه دارای شکستگی می باشد. علت این امر، تغییر توان میکروویو می باشد که تاثیر قابل ملاحظه ای در فرآیند خشک شدن دارد. این تیمار نشان داد که سرعت خشک شدن به طور موثری بوسیله توان میکروویو تحت تاثیر قرار می گیرد و فشار محفظه نقش کم تری دارد.

با مراجعه به شکل ۴ می توان مشاهده کرد که روند خشک شدن در ۳ زمان تغییر قابل ملاحظه ای داشته است و خشک شدن با شدت بیشتری انجام گرفته است. این زمان ها دقیقاً ۰-۳، ۲۱-۲۴ و ۲۷-۳۰ می

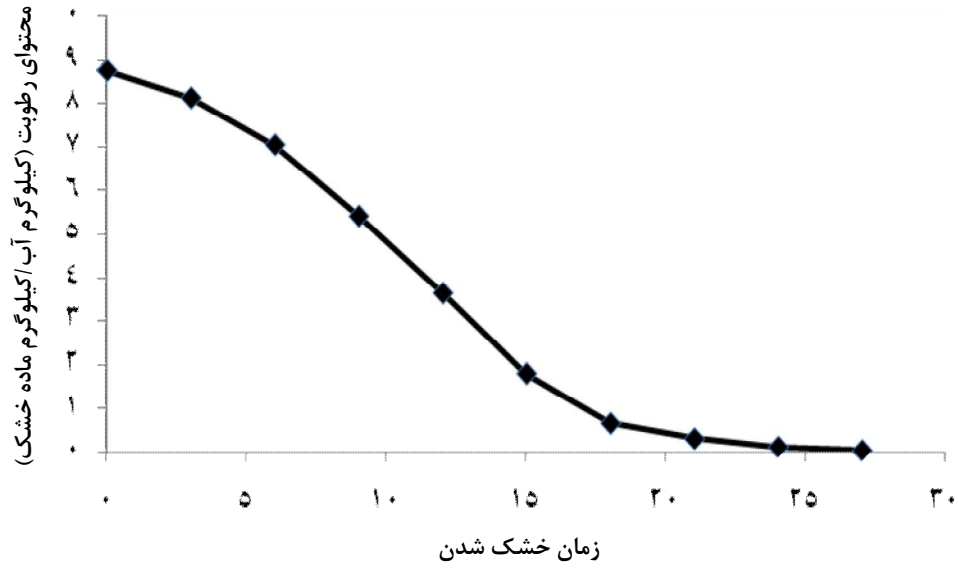
زمان خشک شدن به ترتیب حدود ۷۰ و ۸۴ درصد کاهش پیدا کرده است (شکل ۵).

داشت (Cui et al., 2004; Abbasi and Azari, 2009) به طوری که با افزایش توان از ۳۵ به ۱۳۰ و ۲۶۰ وات

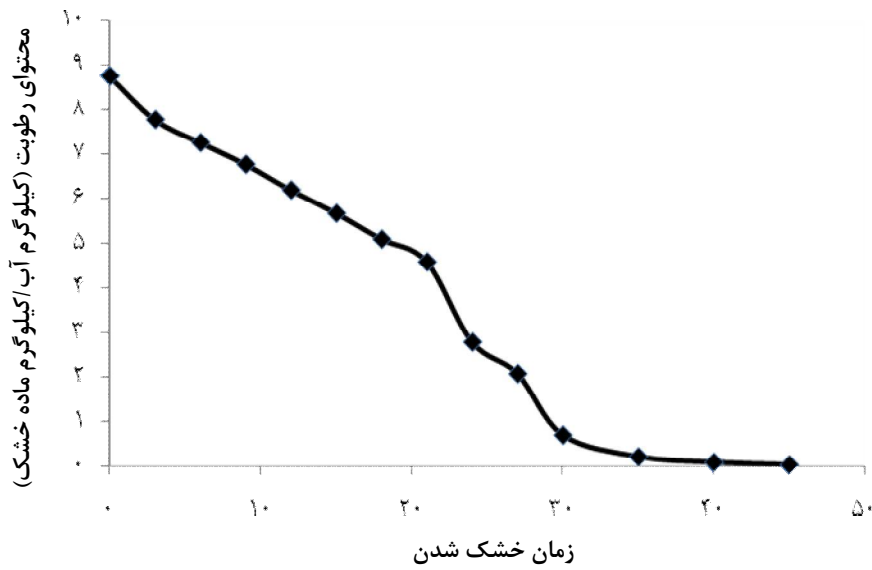


شکل ۲- تاثیر فشارهای مختلف روی محتوای رطوبت ماست در حین فرآیند خشک شدن توسط خشک کن مایکروویو- خلاء در الف) توان ۳۵ وات، ب) توان ۱۳۰ وات و ج) توان ۲۶۰ وات

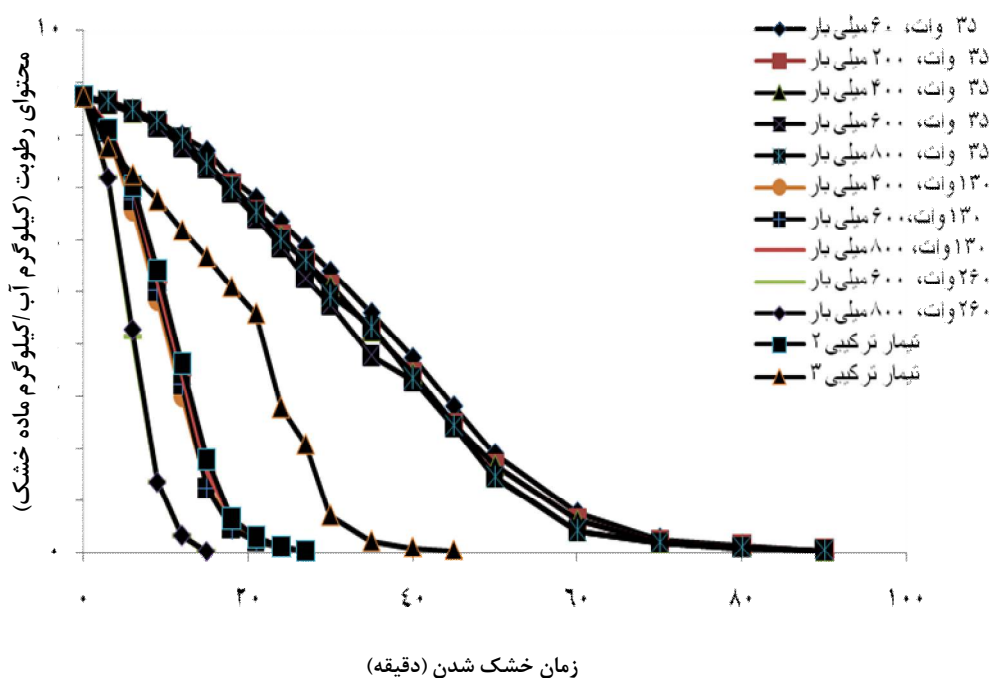




شکل ۳- تاثیر تغییرات فشار محفظه روی محتوای رطوبت ماست در حین فرآیند خشک شدن توسط خشک کن مایکروویو- خلاء (توان ۱۳۰ وات)



شکل ۴- تاثیر تغییرات توان مایکروویو روی محتوای رطوبت نمونه ماست در حین فرآیند خشک شدن توسط خشک کن مایکروویو- خلاء (فشار مطلق ۲۰۰ میلی بار)



شکل ۵- مقایسه تاثیر توان مایکروویو و فشار محفظه روی محتوای رطوبت نمونه ماست در حین فرآیند خشک شدن توسط خشک کن مایکروویو- خلاء

نوعی ماست چکیده با هوای گرم مدل میدیلی و همکاران را به عنوان مناسبترین مدل گزارش کردند (Hayaloglu et al., 2007).

#### تعیین ضریب نفوذ موثر

در بررسی حاضر برای محاسبه ضریب نفوذ موثر رطوبت عملیات مربوط به خشک شدن مواد تا زمانی ادامه می یافت که اختلاف وزنی محسوسی بین دو توزین متوالی مشاهده نشود. سپس نسبت رطوبت (MR) نمونه های در حال خشک شدن هم با استفاده از معادله ۳ محاسبه شد. آنگاه با رسم نمودار  $\ln(MR)$  در مقابل زمان خشک کردن و تعیین شیب قسمت خطی نمودار (شکل ۶)، مقادیر ضریب نفوذ موثر رطوبتی ( $D_{eff}$ )، توسط معادله ۴ محاسبه شده و در جدول ۳ نشان داده شده است. مشاهده می شود که این ضریب در توان های ۳۵ تا ۲۶۰ وات از  $10^{-10}$  تا  $4/42 \times 10^{-9}$  متر مربع بر ثانیه تغییر کرد.

انتخاب مدل مناسب برای کینتیک خشک شدن ماست رطوبت نمونه های ماست در شروع خشک شدن ۸۹/۷۵ درصد بر پایه وزن مرطوب بود. پس از به دست آوردن مقادیر نسبت رطوبت در توان ها و فشارهای مختلف، ۱۲ مدل موجود در جدول ۱، بر منحنی های خشک شدن حاصل از داده های آزمایشی برازش داده شدند. سپس مدل های خشک شدن لایه نازک مختلف بر اساس بالاترین مقادیر  $R^2$  و کمترین مقادیر  $\chi^2$  و RMSE انتخاب شدند. نتایج حاصل از برازش داده های آزمایشگاهی با بعضی از مدل های ارائه شده در جدول ۲ نشان داده شده است.

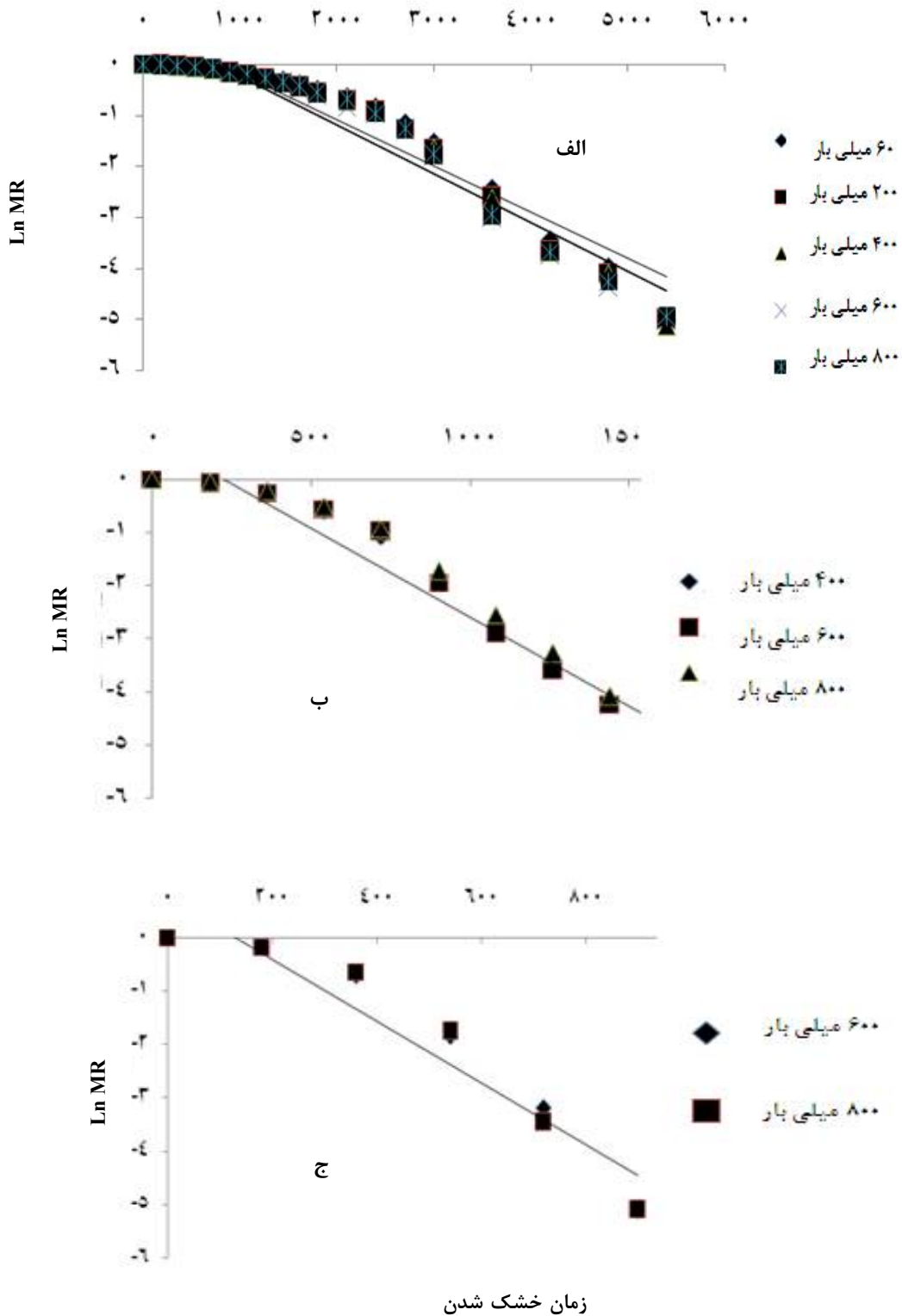
با مقایسه مقادیر  $R^2$  و  $\chi^2$  و RMSE به ترتیب میزان برازش، مدل های لوجیستیک، میدیلی و همکاران، پیچ و پیچ اصلاح شده به عنوان مدل هایی که بالاترین برازش را با داده های خشک کن مایکروویو- خلاء داشتند انتخاب شدند و بدترین مدل نیز مدل تقریب پخش معرفی شد. پژوهشگران ترک هم در خشک کردن

جدول ۲- مقایسه میزان برازش داده های تجربی خشک کردن ماست با روش های مختلف با انواع مدل های ریاضی بر مبنای سه شاخص  $R^2$  و  $RMSE$

| نام مدل        | لوجستیک |          |         | میدیلی و همکاران |          |        | بیج   |          |        | لگارتمی |          |         |
|----------------|---------|----------|---------|------------------|----------|--------|-------|----------|--------|---------|----------|---------|
|                | $R^2$   | $\chi^2$ | RMSE    | $R^2$            | $\chi^2$ | RMSE   | $R^2$ | $\chi^2$ | RMSE   | $R^2$   | $\chi^2$ | RMSE    |
| توان           |         |          |         |                  |          |        |       |          |        |         |          |         |
| میکروویو (وات) |         |          |         |                  |          |        |       |          |        |         |          |         |
| ۶۰             | ۰/۹۲    | ۰/۱۰۸۸   | ۰/۱۰۴۳  | ۰/۹۹             | ۰/۰۰۰۲   | ۰/۱۶۱۵ | ۰/۹۹  | ۰/۰۰۰۲۶  | ۰/۱۶۱۵ | ۰/۹۹    | ۰/۰۰۰۲۶  | ۰/۱۰۴۳  |
| ۲۰۰            | ۰/۹۳    | ۰/۰۰۹۷۴  | ۰/۰۹۸۶۹ | ۰/۹۹             | ۰/۰۰۰۲   | ۰/۱۶۲۶ | ۰/۹۹  | ۰/۰۰۰۲۶  | ۰/۱۶۲۶ | ۰/۹۹    | ۰/۰۰۰۲۶  | ۰/۰۹۸۶۹ |
| ۴۰۰            | ۰/۹۳    | ۰/۰۰۹۷۵  | ۰/۰۹۸۷۷ | ۰/۹۹             | ۰/۰۰۰۲   | ۰/۱۶۲۴ | ۰/۹۹  | ۰/۰۰۰۲۶  | ۰/۱۶۲۴ | ۰/۹۹    | ۰/۰۰۰۲۶  | ۰/۰۹۸۷۷ |
| ۶۰۰            | ۰/۹۳    | ۰/۰۰۹۰۹  | ۰/۰۹۵۳۶ | ۰/۹۹             | ۰/۰۰۰۲۹  | ۰/۱۷۰۶ | ۰/۹۹  | ۰/۰۰۰۲۹  | ۰/۱۷۰۶ | ۰/۹۹    | ۰/۰۰۰۲۹  | ۰/۰۹۵۳۶ |
| ۸۰۰            | ۰/۹۳    | ۰/۰۱۰۴۱  | ۰/۱۰۲   | ۰/۹۹             | ۰/۰۰۰۳   | ۰/۱۸۸۸ | ۰/۹۹  | ۰/۰۰۰۳   | ۰/۱۸۸۸ | ۰/۹۹    | ۰/۰۰۰۳   | ۰/۱۰۲   |
| ۴۰۰            | ۰/۹۳    | ۰/۰۱۲۴۴  | ۰/۱۱۱۵  | ۰/۹۹             | ۰/۰۰۰۲   | ۰/۱۴۵۵ | ۰/۹۹  | ۰/۰۰۰۲   | ۰/۱۴۵۵ | ۰/۹۹    | ۰/۰۰۰۲   | ۰/۱۱۱۵  |
| ۱۳۰            | ۰/۹۲    | ۰/۰۱۴۶۱  | ۰/۱۲۰۹  | ۰/۹۹             | ۰/۰۰۰۳   | ۰/۱۶۶۷ | ۰/۹۹  | ۰/۰۰۰۳   | ۰/۱۶۶۷ | ۰/۹۹    | ۰/۰۰۰۳   | ۰/۱۲۰۹  |
| ۸۰۰            | ۰/۹۲    | ۰/۰۱۴۸   | ۰/۱۲۲   | ۰/۹۹             | ۰/۰۰۰۱۷  | ۰/۱۳۳۳ | ۰/۹۹  | ۰/۰۰۰۱۷  | ۰/۱۳۳۳ | ۰/۹۹    | ۰/۰۰۰۱۷  | ۰/۱۲۲   |
| ۶۰۰            | ۰/۹۲    | ۰/۰۱۶۹   | ۰/۱۳۰۳  | ۰/۹۹             | ۰/۰۰۰۲۱  | ۰/۱۴۶۱ | ۰/۹۹  | ۰/۰۰۰۲۱  | ۰/۱۴۶۱ | ۰/۹۹    | ۰/۰۰۰۲۱  | ۰/۱۳۰۳  |
| ۸۰۰            | ۰/۹۱    | ۰/۰۱۹۲۱  | ۰/۱۳۸۶  | ۰/۹۹             | ۰/۰۰۰۴   | ۰/۲۰۱۸ | ۰/۹۹  | ۰/۰۰۰۴   | ۰/۲۰۱۸ | ۰/۹۹    | ۰/۰۰۰۴   | ۰/۱۳۸۶  |
| ۲ ترکیبی       | ۰/۹۱    | ۰/۰۱۵۳   | ۰/۱۲۴   | ۰/۹۹             | ۰/۰۰۰۲   | ۰/۱۷۰۳ | ۰/۹۹  | ۰/۰۰۰۲   | ۰/۱۷۰۳ | ۰/۹۹    | ۰/۰۰۰۲   | ۰/۱۲۴   |
| ۳ ترکیبی       | ۰/۸۹    | ۰/۰۱۴۲   | ۰/۱۱۹۳  | ۰/۹۷             | ۰/۰۰۰۲۸  | ۰/۱۶۶۶ | ۰/۹۸  | ۰/۰۰۰۲۸  | ۰/۱۶۶۶ | ۰/۹۸    | ۰/۰۰۰۲۸  | ۰/۱۱۹۳  |

جدول ۳- مقادیر ضریب نفوذ موثر ( $D_{eff}$ ) در ماست در شرایط مختلف خشک کردن

| ضریب نفوذ موثر ( $m^2/s$ ) | توان، فشار مطلق       |
|----------------------------|-----------------------|
| $4/42 \times 10^{-10}$     | ۳۵ وات، ۶۰ میلی بار   |
| $4/55 \times 10^{-10}$     | ۳۵ وات، ۲۰۰ میلی بار  |
| $4/61 \times 10^{-10}$     | ۳۵ وات، ۴۰۰ میلی بار  |
| $4/73 \times 10^{-10}$     | ۳۵ وات، ۶۰۰ میلی بار  |
| $4/67 \times 10^{-10}$     | ۳۵ وات، ۸۰۰ میلی بار  |
| $1/61 \times 10^{-9}$      | ۱۳۰ وات، ۴۰۰ میلی بار |
| $1/63 \times 10^{-9}$      | ۱۳۰ وات، ۶۰۰ میلی بار |
| $1/57 \times 10^{-9}$      | ۱۳۰ وات، ۸۰۰ میلی بار |
| $2/77 \times 10^{-9}$      | ۲۶۰ وات، ۶۰۰ میلی بار |
| $2/83 \times 10^{-9}$      | ۲۶۰ وات، ۸۰۰ میلی بار |
| $1/58 \times 10^{-9}$      | تیمار ترکیبی ۲        |



شکل ۶- تغییرات نسبت رطوبت ( $\ln MR$ ) در مقابل زمان خشک شدن ماست در فشارهای مطلق ۶۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی بار و توان های الف) ۳۵ وات، ب) ۱۳۰ وات، ج) ۲۶۰ وات

افزایش توان مایکروویو کاهش یافت اما کاهش فشار روی خشک شدن تاثیری نشان نداد و توان مایکروویو به عنوان عامل اصلی در مدت زمان خشک شدن شناخته

نتیجه گیری  
با مطالعه کینتیک خشک شدن ماست در توان ها و فشارهای مختلف دیده شد که زمان خشک شدن با

شدند. علاوه بر این، ضریب نفوذ برای تیمارهای مختلف بین  $4/42 \times 10^{-10}$  تا  $2/83 \times 10^{-9}$  متر مربع بر ثانیه متغیر بود و با افزایش توان این ضریب افزایش یافت در حالیکه فشار بی تاثیر بود. انرژی فعال سازی نیز در حدود  $2/90$  وات بر گرم بدست آمد.

شد. همچنین تحقیق حاضر نشان داد که همیشه کاهش فشار در زمان خشک شدن تاثیر مثبت ندارد و باید فاکتورهای دیگری هم نظیر ضخامت نمونه در نظر گرفت. در میان ۱۳ مدل مورد مطالعه، مدل لوجیستیک و میدیلی و همکاران به عنوان بهترین مدل ها انتخاب

## منابع

- 1- Abbasi, S., & Azari, S. 2009. Novel microwave-freeze drying of onion slices. *International Journal of Food Science & Technology*, 44: 974–979.
- 2- Akpinar, E. K. 2006. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering*, 73:75–84.
- 3- Altan, A., & Maskan, M. 2005. Microwave assisted drying of short-cut (ditalini) macaroni: Drying characteristics and effect of drying processes on starch properties. *Food Research International*, 38: 787–796.
- 4- AOAC 1999. *Official Methods for Analysis*, 15th ed. (Vol. II). Arlington, VA: Association of Official Analytical Chemists.
- 5- Bondaruk, J., Markowski, M. & Blaszczyk, W. 2007. Effect of drying conditions on the quality of vacuum–microwave dried potato cubes. *Journal of Food Engineering*, 81: 306–312.
- 6- Chandra P. K. & Singh, R. P. 1995. *Applied Numerical Methods for Food and Agricultural Engineers*. CRC Press, Boca Raton, FL pp. 163–167.
- 7- Cui, Z. W., Xu, S. Y. & Sun, D. W. 2004. Microwave–vacuum drying kinetics of carrot slices. *Journal of Food Engineering*, 65: 157–164.
- 8- Dadali, G., Apar, D. K. & Ozbek, B. 2007. Microwave drying kinetics of okra. *Drying Technology*, 25: 925–936.
- 9- Doymaz, I. 2005. Influence of pretreatment solution on the drying of sour cherry. *Journal of Food Engineering*, 78: 591–596.
- 10- Drouzas, A. E. & Schubert, H. 1996. Microwave application in vacuum drying of fruits. *Journal of Food Engineering*, 28: 203–209.
- 11- Farnworth, E. 2008. *Handbook of Fermented Functional Foods*. 2nd ed. CRC Press: New York, USA.
- 12- Hamann, W.T. & Marth, E. H. 1984. Survival of *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus bulgaricus* in commercial and experimental yogurts. *Journal of Food Protection*, 47: 781–786.
- 13- Hayaloglu, A. A., Karabulut, I., Alpaslan M. & Kelbaliyev, G. 2007. Mathematical modeling of drying characteristics of strained yoghurt in a convective type tray-dryer. *Journal of Food Engineering*, 78: 109–117.
- 14- Henderson, S. M. & Pabis, S. 1961. Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agriculture Research Engineering*, 6: 169–174.
- 15- Kaensup, W., Chutima, S. & Wongwiset, S. 2002. Experimental study on drying of chilli in a combined microwave–vacuum–rotary drum dryers. *Drying Technology*, 20: 2067–2079.
- 16- Karathanos, V. T. 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39: 337–344.
- 17- Kiranoudis, C. T., Tsami, E. & Maroulis, Z. B. 1997. Microwave vacuum drying kinetics of some fruits. *Drying Technology*, 15: 2421–2440.
- 18- Krokida, M. K., Maroulis, Z. B. & Saravacos, G. D. 2001. The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products. *International Journal of Food Science and Technology*, 36: 53–59.
- 19- Kumar, P. & Mishra, H. N. 2004. Yoghurt powder—A review of process technology, storage and utilization. *Food and Bioproducts Processing*, 82(C2): 133–142.
- 20- Kurda, T. & Mujumdar, A. S. 2009. *Advanced Drying Technologies*. Second Edition. CRC press, Boca Raton, USA.
- 21- Lewis, W. K. 1921. The rate of drying of solid materials. *Journal of Industrial Engineering*, 13: 427–443.

- 22- Li, Y., Xu, S.Y. & Sun, D.W. 2007. Preparation of garlic powder with high allicin content by using combined microwave-vacuum and vacuum drying as well as microencapsulation. *Journal of Food Engineering*, 83:76–83.
- 23- Lin, T. M., Durance, T. D. & Scaman, C. H. 1999. Physical and sensory properties of vacuum microwave dehydrated shrimp. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 8: 41–53.
- 24- Maskan, M. 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44(2): 71–78.
- 25- McMinn, W. A. M. 2006. Thin-layer modelling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave-vacuum drying of lactose powder. *Journal of Food Engineering*, 72: 113–123.
- 26- Overhults, D. G., White, H. E., Hamilton, H. E. & Ross, I. J. 1973. Drying soybeans with heated air. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 16: 112–113.
- 27- Ozbek, B. & Dadali, G. 2007. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, 83:541–549.
- 28- Panchariya, P. C., Popovic, P. C. & Sharma, A. L. 2002. Thin-layer modelling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering*, 52: 349–357.
- 29- Rahman, M. S., Perera, C. O. & Theband, C. 1998. Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. *Food Research International*, 30: 485–491.
- 30- Sarkar, S. & Misra, A. K. 2002. Yoghurt: Nutritional and therapeutic aspects. *Indian Journal of Microbiology*, 42: 275–287.
- 31- Sharaf-Elden, Y. I., Blaisdell, J. L. & Hamdy, M. Y. 1980. A model for ear corn drying. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 23: 1261–1265.
- 32- Sharma, G. P., & Prasad, S. 2005. Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves. *Journal of Food Engineering*, 75(4): 441–446.
- 33- Sharma, N. K. & Arora, C. P. 1995. Influence of product thickness, chamber and heating conditions on production rate of freeze-dried yoghurt. *International Journal of Refrigeration*, 18: 297–307.
- 34- Soysal, Y., Oztekin, S. & Eren O. 2006. Microwave drying of parsley: Modelling, kinetics, and energy aspects. *Biosystems Engineering*, 93: 403–413.
- 35- Tamime, A. Y. & Robinson, R. K. 2007. *Yoghurt Science and Technology*. 3<sup>rd</sup> ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, England.
- 36- Verma, L. R., Bucklin, R. A., Endan, J. B. & Wraten, F. T. 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 28: 296–301.
- 37- Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen F., Zhao, G., Wu, J. & Hu, X. 2007. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*, 40: 39–46.
- 38- Yaldiz, O. & Ertekin, C. 2001. Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, 19: 583–597.
- 39- Yongsawatdigul J. & Gunasekaran, S. 1996. Microwave–vacuum drying of cranberries: Part I: energy use and efficiency. *Journal of Food Processing and Preservation*, 20: 121–143.

## Selecting a mathematical model for drying kinetics of yoghurt in a microwave–vacuum dryer

A. Ghaderi<sup>1</sup>, S. Abbasi<sup>2\*</sup>, Z. Hamidi<sup>2</sup>

1- MSc. Graduated Student, Department of Food Science and Technology, College of Agriculture, Tarbiat Modares University

2- Associate professor, Department of Food Science and Technology, College of Agriculture, Tarbiat Modares University

\*Corresponding author (sabbasifood@modares.ac.ir)

### Abstract

In the present study, the drying kinetics of non-fat yoghurt with constant thickness of (2.2 mm) in a microwave–vacuum dryer to the power of (35, 130, and 260 W) as well as 5 absolute pressure levels (60, 200, 400, 600, and 800 mbar) were evaluated. To choose the best, also 12 experimental/ semi-theoretical and/or empirical thin-layer drying models were examined. Based on the findings of this study various ranges of microwave power affects drying time where by increasing the microwave power (from 35 to 260 W), drying time significantly decreases from 90 min to 15) which is (600%). However, no significant effects in drying time were observed when reduced the absolute pressure in the system. RMSE was picked to be the most suitable model when the comparison runs between Logistic, Middilli and coworkers models for it contained maximum  $R^2$  and minimum  $\chi^2$  so it could satisfactorily describe the drying kinetics of non-fat yoghurt. The effective moisture diffusivity was increased by increasing the microwave power from  $4.42 \times 10^{-10}$  to  $2.83 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  while the pressure had zero effect on this value. In addition, the activation energy was calculated using the modified Arrhenius equation method.

**Keywords:** Effective moisture diffusivity; Kinetics; Microwave–vacuum dryer; Modelling; Yoghurt