

بررسی سنتیک و مدل سازی تجربی فرآیند خشک شدن ورقه های موز

کیانوش پیرنظری، علی اسحق بیگی، مرتضی صادقی

گروه مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، 84156-83111

E-mail: eshaghbeygi@cc.iut.ac.ir

چکیده

یکی از فرآیندهای نوین خشک کردن، روش الکتروهیدرودینامیک می باشد. در این شیوه از میدان الکتریکی با ولتاژ بالا برای خشک کردن محصولات کشاورزی استفاده می شود. مکانیزم خشک شدن به شیوه الکتروهیدرودینامیک عموماً به باد الکتریکی ناشی از میدان الکتریکی به عنوان نیروی محرکه اساسی در خشک کردن نسبت داده می شود. باد الکتریکی به ماده تر برخورد می کند و سبب افزایش انتقال جرم به منظور بهبود نرخ خشک شدن می شود. آزمایش های تحقیق حاضر با خشک کردن لایه نازک ورقه های موز به شیوه های الکتروهیدرودینامیک در شدت میدان های الکتریکی 6، 8 و 10 کیلو ولت بر سانتی متر انجام شد و منحنی های تغییرات محتوای رطوبتی بر حسب زمان و آهنگ خشک شدن بر حسب محتوای رطوبتی برای هر تیمار محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از حل تحلیلی رابطه قانون دوم فیک به روش حل کرانک برای صفحه نامتناهی، مقدار ضریب انتشار موثر رطوبت در محدوده $3/12 \times 10^{-10}$ تا $4/23 \times 10^{-10}$ متر مربع بر ثانیه بدست آمد. به منظور مدل سازی تجربی داده های افت رطوبت از 12 مدل تجربی استفاده شد و بر اساس بالاترین ضریب تبیین و کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا، مدل دیفوزیون با ضریب تبیین بیشتر از 0/9987 و ریشه میانگین مربعات خطای کمتر از 0/01030 به عنوان مناسب ترین مدل برای توصیف فرآیند خشک کردن ورقه های موز انتخاب شد و روابط حاکم بر ثابت های مدل دیفوزیون نسبت به سطوح مختلف شدت میدان الکتریکی در فرآیند خشک شدن ورقه های موز به شیوه الکتروهیدرودینامیک بدست آمد.

کلمات کلیدی: الکتروهیدرودینامیک، باد الکتریکی، خشک کردن، مدل سازی تجربی، ورقه های موز

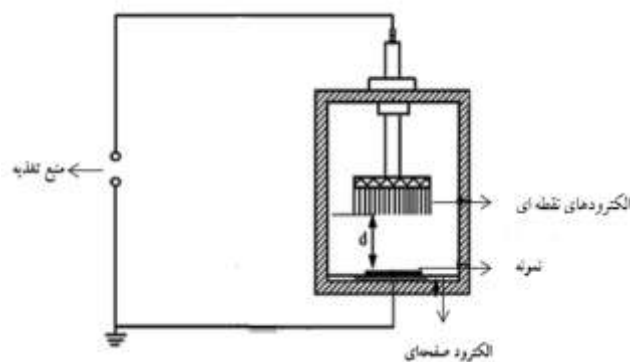
مقدمه

خشک کردن یکی از قدیمی ترین روشهای نگهداری مواد غذایی می باشد که به علت امکان تغییرات نامطلوب در کیفیت مواد غذایی در اثر خشک شدن، کنترل آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است؛ در نتیجه برای نگهداری مطمئن مواد غذایی لازم است آن ها را به رطوبت مشخصی رساند. جهت دستیابی به این هدف، باید سینتیک خشک شدن مدل سازی گردد تا بتوان روند خشک کردن را به طور صحیح پیش بینی نمود، تا از بیش خشک شدن محصولات کشاورزی که باعث کاهش کیفیت، تغییر رنگ، مزه و همچنین اتلاف زمان و انرژی می گردد جلوگیری شود. یکی از فرآیند های نوین خشک کردن، روش الکتروهیدرودینامیک می باشد. خشک کردن به روش الکتروهیدرودینامیک برای مواد حساس به حرارت های بالا مانند فرآورده های کشاورزی که با استفاده از روش خشک کردن معمول بوسیله هوای گرم در دماهای بالا آسیب می بینند، مناسب می باشد. مکانیزم خشک شدن به شیوه الکتروهیدرودینامیک عموماً به باد الکتریکی تولید شده توسط میدان الکتریکی به عنوان نیروی محرکه اساسی در خشک کردن نسبت داده می شود. تعداد زیادی از یون های هوا توسط تخلیه کورونا در سیستم الکترو د و صفحه یونیزه کننده در ناحیه کوچک اطراف الکتروود نقطه ای تولید می شود. یون های تولید شده، بوسیله میدان الکتریکی

شتاب داده می شوند و سبب حرکت هوا شده و از این رو سبب تولید باد الکتریکی می شود. باد الکتریکی به ماده تر برخورد می کند و سبب افزایش انتقال جرم به منظور بهبود نرخ خشک شدن می شود [Asakawa, 1976]. تحقیقات محدودی در زمینه خواص کیفی و کمی محصولات خشک شده توسط میدان الکتریکی ولتاژ بالا صورت گرفته است از جمله می توان به خشک کردن ورقه های سیب توسط هاشیناگا و همکاران (1999)، خشک کردن ورقه های ترب ژاپنی توسط باجگای و هاشیناگا (2001)، خشک کردن ورقه های گوجه فرنگی توسط اسحق بیگی و بصیری (2011) اشاره کرد اما تاکنون تحقیقی در مورد سنتیک و مدل سازی تجربی فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی به شیوه الکترو هیدرودینامیک صورت نگرفته است. اهداف تحقیق حاضر عبارتند از الف) بررسی سنتیک خشک کردن ورقه های موز به شیوه الکترو هیدرودینامیک در میدان های الکتریکی با شدت 6، 8 و 10 کیلو ولت بر سانتی متر. ب) محاسبه ضریب انتشار رطوبتی موثر ج) مدل سازی تجربی فرآیند خشک شدن ورقه های موز به منظور ارائه بهترین مدل برای توصیف فرآیند خشک کردن ورقه های موز.

مواد و روش ها

نمونه های موز با نام تجاری چیکویتا از بازار اصفهان خریداری شد. برای تعیین میزان رسیدگی و یکنواخت بودن سفتی نمونه های موز از دستگاه سفتی سنج میوه استفاده شد. موزهایی با رسیدگی یکسان و قطر متوسط 28 میلی متر را بعد از پوست کندن به روش مکانیکی توسط کاتر به صورت ورقه هایی به ضخامت 3 میلی متر در آورده شد. در هر آزمایش حدود 20 گرم ورقه موز به شیوه الکترو هیدرودینامیک در شدت میدان های الکتریکی 6، 8 و 10 کیلوولت بر سانتی متر خشک شدند. آزمایش ها در دمای اتاق ($27 \pm 3^\circ \text{C}$ ، 60-63% RH) انجام شد. سامانه خشک کردن الکترو هیدرودینامیک شامل دو صفحه فولادی مربعی مقابل هم با فاصله قابل تنظیم بود که بر روی یکی از صفحات 25 عدد سوزن یونیزه کننده وجود داشت. سامانه مورد نظر از یک منبع تغذیه ولتاژ بالا با قابلیت تنظیم ولتاژ بین 0 تا 22 کیلو ولت و حداکثر خروجی جریان 1 میلی آمپر تشکیل شده، بطوری که قطب مثبت منبع تغذیه به صفحه زائده دار و قطب منفی به صفحه بدون زائده متصل بود. طرحواره کلی سامانه الکترو هیدرودینامیک در شکل (1) نشان داده شده است. در این آزمایش فاصله بین نوک الکترودهای یونیزه کننده و صفحه بدون زائده برابر 2 سانتی متر در نظر گرفته شد. خشک شدن ورقه های موز تا محتوای رطوبتی 17/5% بر پایه خشک صورت گرفت. و روند سنتیک خشک شدن در فواصل زمانی منظم دقیقه با ترازوی دیجیتال با دقت 0/001 ثبت شد و نمودارهای تغییرات محتوی رطوبتی در مقابل زمان و آهنگ خشک شدن در مقابل محتوی رطوبتی. برای هر تیمار رسم شد. هر آزمایش سه بار تکرار شد.



شکل (1) طرحواره کلی خشک کردن به شیوه الکترو هیدرودینامیک

به منظور اندازه گیری ضریب انتشار موثر رطوبت، از منحنی های سینتیک افت رطوبت با استفاده از حل کرانک بر رابطه قانون دوم فیک در صفحه نامتناهی (رابطه 1) استفاده شد. برای این منظور، ابتدا منحنی محتوی رطوبتی بر حسب زمان برای فرآیند خشک کردن رسم شد، سپس مقدار نسبت رطوبت محاسبه و نمودار لگاریتم طبیعی آن ($\ln(MR)$) بر حسب زمان رسم و رابطه یک خط راست به آن برازش شد. شیب خط برازش شده به نمودار لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت بر حسب زمان (m) تعیین شد. چنانچه اولین جمله از سری جواب رابطه قانون دوم فیک برای صفحه نامتناهی (رابطه 1) در نظر گرفته شود، رابطه (2) بدست می آید. اگر از طرفین رابطه لگاریتم طبیعی گرفته شود، رابطه (3) که رابطه یک خط است بدست می آید. با مساوی قرار دادن شیب این خط با شیب خط برازش شده به نمودار لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت بر حسب زمان (m)، مقدار ضریب انتشار موثر رطوبت بدست آمد (رابطه 4) [میرزاییگی کسبی، 1389].

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4 L^2}\right) \quad (1)$$

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

$$\ln(MR) = - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4 L^2} + \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) \quad (3)$$

$$D_{eff} = \frac{4mL^2}{\pi^2} \quad (4)$$

به منظور مدل سازی تجربی سینتیک افت رطوبت از مدل نیوتن و یازده مدل تجربی و نیمه تجربی خشک کردن لایه نازک محصولات کشاورزی استفاده شد. این مدل ها در جدول (1) نشان داده شده است. داده های اندازه گیری شده بر مدل های انتخابی به کمک نرم افزار متلب برازش و ضرایب هر مدل بدست آمد. انطباق بین داده های اندازه گیری شده و پیش بینی شده توسط مدل های مزبور بر مبنای مقایسه ضریب تبیین بیشتر (رابطه 5) و نیز ریشه میانگین مربعات خطای (RMSE) کمتر (رابطه 6) انجام شد [Fellows, 1990]. رطوبت تعادلی در تمام آزمایش ها برابر صفر فرض شد.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - \overline{MR})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR})^2} \quad (5)$$

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

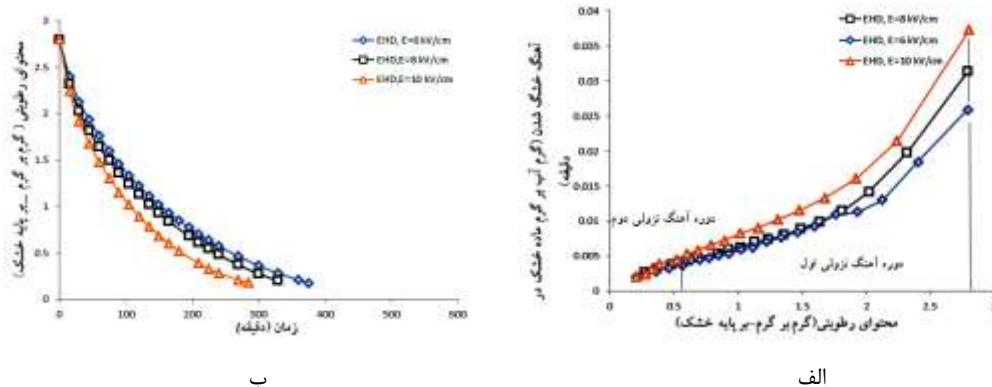
در این روابط MR_{exp} نسبت رطوبت مشاهده شده در آزمایش، MR_{pre} نسبت رطوبت پیش بینی شده توسط مدل، \overline{MR} میانگین نسبت رطوبت در کل آزمایش و n تعداد مشاهدات می باشد.

جدول 1- مدل های تجربی شناخته شده برای پیش بینی فرآیند خشک شدن لایه نازک محصولات کشاورزی

| نام مدل | فرمول |
|---------------------------|---|
| نیوتن | $MR = \exp(-kt)$ |
| پیچ | $MR = \exp(-kt^n)$ |
| پیچ اصلاح شده | $MR = \exp(-kt)^n$ |
| هندرسون و پابیس | $MR = a \exp(-kt)$ |
| لگاریتمی | $MR = a \exp(-kt) + c$ |
| دو جمله ای | $MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$ |
| دو جمله ای نمایی | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$ |
| وانگ و سینگ | $MR = 1 + at + bt^2$ |
| دیفوزیون | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$ |
| هندرسون و پابیس اصلاح شده | $MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t) + c \exp(-k_3 t)$ |
| میدیلی و همکاران | $MR = a \exp(-kt^n) + bt$ |
| ورما و همکاران | $MR = a \exp(-k_1 t) + (1-a) \exp(-k_2 t)$ |

نتایج و بحث

شکل (2-ب) تغییرات محتوای رطوبتی بر حسب زمان را برای خشک کردن ورقه های موز به شیوه EHD تحت شدت میدان های الکتریکی 6، 8 و 10 کیلو ولت بر سانتی متر نشان می دهند. در شیوه الکترو هیدرودینامیک با افزایش شدت میدان الکتریکی مدت زمان خشک کردن کاهش یافت. آهنگ خشک شدن ورقه های موز بر حسب محتوای رطوبتی در شکل (2-الف) نشان داده شده است. در تمام تیمارهای آزمایشی، با گذشت زمان، آهنگ خشک شدن کاهش یافت. در شیوه الکترو هیدرودینامیک با افزایش شدت میدان الکتریکی آهنگ خشک شدن افزایش یافت. با توجه شکل (2-الف) در زمان های ابتدایی آزمایش به علت وجود رطوبت در سطح و لایه های نزدیک آن، آهنگ خشک شدن بسیار سریع افت پیدا کرد. از اینرو تغییرات آهنگ خشک شدن در واحد زمان (شیب منحنی) زیاد بود و با گذشت زمان و از بین رفتن رطوبت سطح و لایه های نزدیک آن، تغییرات آهنگ خشک شدن در واحد زمان کاهش یافت. میانگین آهنگ خشک شدن در شیوه الکترو هیدرودینامیک در شدت میدان های الکتریکی 6، 8 و 10 کیلو ولت بر سانتی متر به ترتیب برابر 0/78، 0/86 و 0/99 درصد بر پایه وزن خشک بر دقیقه بود.



شکل (2) - الف. تغییرات آهنگ خشک شدن ورقه های موز بر حسب محتوی رطوبتی ب. تغییرات محتوی رطوبتی بر حسب زمان

در تمام تیمارها، فقط دو مرحله آهنگ نزولی اول و دوم وجود دارد که منطبق بر رفتار خشک شدن محصولات کشاورزی با ساختار متخلخل و ساختمان سلولی می باشد [Pakowski and Adamski., 2007]. تغییرات آهنگ خشک شدن ورقه های موز بر حسب محتوای رطوبتی به شیوه الکترویهیدرودینامیک نشان داد که در دوره اول آهنگ نزولی خشک شدن، آهنگ خشک شدن به طور غیر خطی همراه با کاهش محتوای رطوبتی کاهش یافت و هنگامی که محتوای رطوبتی ورقه های موز به حدود 0/55 بر پایه خشک رسید، دوره آهنگ نزولی دوم آغاز شد و به صورت خطی دنبال شد (شکل 2-الف). در دوره آهنگ نزولی اول، تبخیر رطوبت نزدیک سطح صورت می گیرد و هنگامی که خشک شدن ادامه پیدا می کند، رطوبت سطح و قسمت های نزدیک آن از بین می رود، در حالی که هنوز ناحیه درونی تر می باشد. مدت زمانی که رطوبت از ناحیه درونی به سطح محصول می رسد طولانی تر است، در نتیجه در دوره آهنگ نزولی دوم، آهنگ خشک شدن افت پیدا می کند و شیب منحنی نسبت به دوره آهنگ نزولی اول تندتر خواهد بود [Prachayawarakorn *et al.*, 2008]. با توجه به اینکه در تمام روش های خشک کردن، فقط دوره آهنگ نزولی خشک شدن وجود دارد، بیانگر اینست که پدیده انتشار، مکانیسم فیزیکی حاکم بر جابجایی رطوبت در ورقه های موز است [Kechaou and Maalej., 2000]. مقادیر ضریب انتشار موثر رطوبت با در نظر گرفتن اولین جمله از سری جواب حل کرانک بر معادله قانون دوم فیک برای صفحه نامتناهی، تحت شرایط مختلف خشک کردن ورقه های موز بدست آمد. مقادیر ضریب انتشار موثر رطوبت برای شدت میدان های الکتریکی 6، 8 و 10 کیلو ولت بر سانتی متر به ترتیب برابر $3/12 \times 10^{-10}$ ، $3/64 \times 10^{-10}$ و $4/23 \times 10^{-10}$ متر مربع بر ثانیه بدست آمد. مادامبا و همکاران (1996) گزارش کردند که مقدار ضریب انتشار موثر رطوبت در خشک کردن محصولات کشاورزی در محدوده 10^{-11} - 10^{-9} متر مربع بر ثانیه متغیر است. در شیوه الکترویهیدرودینامیک با افزایش شدت میدان الکتریکی، مقدار ضریب انتشار موثر رطوبت افزایش یافت، بطوریکه با افزایش شدت میدان الکتریکی از 6 به 10 کیلو ولت بر سانتی متر، ضریب موثر انتشار رطوبت 1/36 برابر شد. علت افزایش مقدار ضریب موثر انتشار رطوبت مربوط به تسریع جدا شدن رطوبت از سطح ماده با افزایش باد الکتریکی می باشد. در اثر جدا شدن سریع رطوبت از سطح توسط باد الکتریکی، اختلاف رطوبت در سطح خارجی و درون ماده غذایی زیاد شده و

رطوبت سریعتر از درون به سطح ماده غذایی می‌رسد، از اینرو ضریب انتشار رطوبت افزایش یافته است. روند خشک شدن ورقه‌های موز توسط روش‌های الکتروهایدرودینامیک در شدت میدان‌های الکتریکی 6 و 8 و 10 کیلوولت بر سانتی‌متر به 12 مدل تجربی بشرح (جدول 1) برازش داده شد. در تمامی مدل‌ها مقدار ضریب تبیین بیشتر از 96 درصد و ریشه میانگین مربعات خطا کمتر از 0/0537 می‌باشد. بنابراین تمامی مدل‌های تجربی مورد نظر روند خشک شدن ورقه‌های موز را به خوبی پیش‌بینی کرده و همخوانی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند. بر اساس بالاترین ضریب تبیین و کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا، مدل دیفیوژن با ضریب تبیین بیشتر از 0/9987 و ریشه میانگین مربعات خطای کمتر از 0/01030 به عنوان مناسب‌ترین مدل برای توصیف فرآیند خشک کردن ورقه‌های موز به شیوه الکتروهایدرودینامیک، انتخاب شد. مقادیر ثابت‌های مدل دیفیوژن به همراه پارامترهای آماری دقت مدل‌سازی برای خشک کردن ورقه‌های موز در جدول (2) نشان داده شده است.

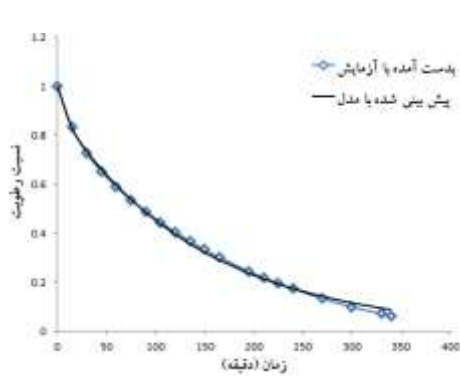
جدول (2) - مقادیر ثابت‌های مدل دیفیوژن به همراه پارامترهای آماری دقت مدل‌سازی برای خشک کردن ورقه‌های موز

| روش خشک کردن | دما (°C) | میدان الکتریکی (kV/cm) | a | b | k | R ² | RMSE |
|---------------------|----------|------------------------|--------|---------|--------|----------------|---------|
| الکتروهایدرودینامیک | 27 | 6 | 0/0885 | 0/06019 | 0/1047 | 0/9988 | 0/01029 |
| الکتروهایدرودینامیک | 27 | 8 | 0/1035 | 0/05953 | 0/1149 | 0/9989 | 0/00887 |
| الکتروهایدرودینامیک | 27 | 10 | 0/1033 | 0/06196 | 0/1311 | 0/9994 | 0/00702 |

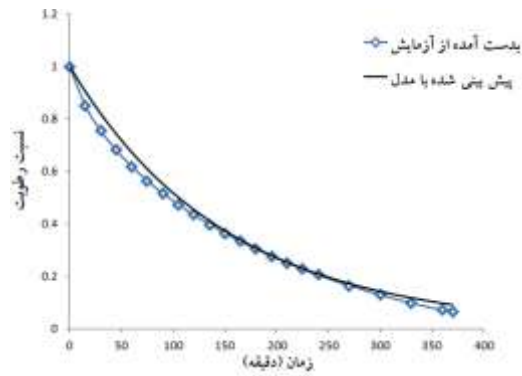
برازش مدل دیفیوژن به عنوان مناسب‌ترین مدل به داده‌های آزمایشگاهی خشک کردن ورقه‌های موز به شیوه الکتروهایدرودینامیک در شکل (3) نشان داده شده است. روابط حاکم بر ثابت‌های مدل دیفیوژن نسبت به سطح ولتاژ در فرآیند خشک شدن ورقه‌های موز به شیوه الکتروهایدرودینامیک در جدول (3) نشان داده شده است.

جدول (3) - روابط حاکم بر ثابت‌های مدل دیفیوژن در خشک کردن ورقه‌های موز به شیوه

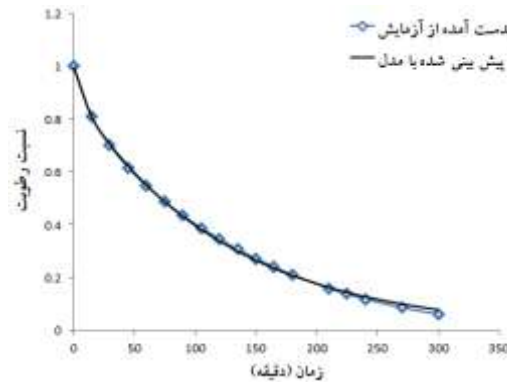
| الکتروهایدرودینامیک نسبت به شدت میدان الکتریکی | |
|--|--------------------|
| روابط حاکم بر ثابت‌های مدل انتخابی | شدت میدان الکتریکی |
| $a = -0/0005 E^2 + 0/017 E - 0/0477$ | 6 kV/cm |
| $b = 0/0001 E^2 - 0/0029 E + 0/0807$ | 8 kV/cm |
| $k = 0/0002 E^2 - 0/0027 E + 0/1101$ | 10 kV/cm |



ب



الف



ج

شکل (3) - مقادیر پیش‌بینی شده نسبت رطوبت بر حسب زمان توسط مدل دیفیوژن و نسبت رطوبت بدست آمده از داده‌های آزمایشی فرآیند خشک‌کردن ورقه‌های موز به شیوه الکترو هیدرودینامیک با شدت الف . 6 . ب . 8 ج 10 کیلو ولت بر سانتی متر

منابع

- [1] میرزابیگی کسبی، ا. 1389. بررسی و مدل سازی فرآیند خشک کردن ترکیبی همرفتی - میکروویو ورقه‌های لیمو ترش، پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- [2] Asakawa, Y. (1976). Promotion and retardation of heat transfer by electric field. *Nature*, 261: 220-221.
- [3] Bajgai, T., and Hashinaga, F. (2001). High electric field drying of Japanese radish. *Drying Technology*, 19: 2291-2302.
- [4] Esehaghbeygi, A., and Basiry, M. (2011). Electrohydrodynamic (EHD) drying of tomato slices (*Lycopersicon esculentum*). *Journal of Food Engineering*, 104: 628-631.
- [5] Fellows, P. 1990. *Food Processing Technology, Principles and Practice*. Ellis Horwood, New York.
- [6] Hashinaga, F., Bajgai, T. R., Isoble, S., and Barthakur, N. N. (1999). Electrohydrodynamic (EHD) drying of apple slice. *Drying Technology*, 17: 479-483.
- [7] Kechaou, N., and Maalej, M. (2000). A simplified model for determination of moisture diffusivity of date from experimental drying curves. *Drying Technology*, 18: 1109-1125.

-
- [8] Madamba, P. S., Driscoll, R. H., and Buckle, K. A. (1996). The thin layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29: 75-97.
- [9] Pakowski, Z., and Adamski, A. (2007). The comparison of two models of convective drying of shrinking materials using apple tissue as an example. *Drying Technology*, 25: 1139- 1147.
- [10] Prachayawarakorn, S. W., Plyto, N., and Soponronarit, S. (2008). Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature. *Journal of Food Engineering*, 85: 509-517.