



بررسی خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ بر خواص ترمودینامیکی (مطالعه موردی : گیاه دارویی ترخون)

ابراهیم تقی نژاد^۱، محمد کاوه^۲، حامد کرمی^۲

^۱ استادیار دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان؛ آدرس پست الکترونیکی: e.taghinezhad@uma.ac.ir
^۲ دانشجوی دکتری دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی؛ آدرس پست الکترونیکی: sirwankaweh@gmail.com

چکیده

در این پژوهش، خشک شدن لایه نازک گیاه دارویی ترخون در یک خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. خشک کردن محصول در سه دمای ۴۰، ۵۵ و ۷۵ درجه سلسیوس و در سرعت جریان هوای ۱ متر بر ثانیه و سه توان مادون قرمز ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ وات انجام شد. برای انتخاب یک منحنی خشک کردن مناسب، پنج مدل لایه نازک خشک شدن به داده های آزمایشگاهی برازش شده در میان مدل های ریاضی مورد تحقیق مدل Logistic، بهترین مدل برای شرح دادن رفتار خشک شدن لایه نازک ترخون با بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقدار برای و RSME انتخاب شد. نتایج بررسی های مقدار ضریب پخش رطوبت موثر برای خشک شدن لایه نازک ترخون نیز نشان داد که دمای ۷۰ °C و توان میکروویو ۱۵۰۰ W دارای بیشترین ضریب پخش رطوبت موثر است. همچنین بیشترین انرژی مصرفی ویژه (۷۰/۹۰ Mj/kg) در توان ۵۰۰ W به دست آمد.

کلمات کلیدی: ترخون، مادون قرمز، خشک کن ترکیبی، انرژی مصرفی ویژه

Investigation of the Effect of Combined Infrared- Convection Dryer on Thermodynamic Properties (Case Study: TARRAGON Medicine Plant)

Ebrahim Taghinezhad¹, Mohammad Kaveh², Hamed Karami²

¹: Professor Assistant, Moghan College of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

²: PhD Student, College of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

* Corresponding Author

ABSTRACT

In this study, thin layer drying of tarragon medicine plant was investigated in infrared- convection dryer. Product drying was conducted at three temperatures of 40, 55 and 70 °C and one air velocities of 1 m/s and three infrared powers of 500, 1000 and 1500 W. To select a suitable drying curve, four thin-layer drying models were fitted to the experimental data. Among the applied mathematical models, Logistic model was the best model to describe the thin layer drying behavior of tarragon with the high value for R^2 and the low value for χ^2 and RMSE. Results showed that the effective moisture diffusivity for thin layer drying of tarragon was the highest at infrared power of 1500 W and air temperature of 70 °C. The highest value of specific energy consumption (70.90 Mj/kg) at infrared power of 500 W was obtained.

Keywords: Tarragon, Drying, Infrared, Combined dryer, Specific energy consumption



در طول دهه های گذشته گیاهان دارویی به اهمیت جهانی دست یافته اند. ترخون (*Artemisia dracuncululus L.*) یک گیاه معطر قوی و همچنین به عنوان یک گیاه دارویی در نظر گرفته می شود. عمدتاً دو نوع ترخون روسی وجود دارد ترخون را می توان به عنوان یک گیاه تازه، خشک شده و یخ زده مصرف کرد. ترخون به دلیل افزایش ترشح اسید معده و خاصیت اشتها آوری از گذشته، به عنوان ادویه مخصوص گوشت مورد توجه بوده و سبب کاهش فشارخون هم می شود (Arabhosseini et al., 2009).

خشک کردن یکی از مهمترین فرآیندهای پس از برداشت محصول های کشاورزی می باشد. خشک کردن با هدف حذف اکثریت آب محصول و افزایش مدت نگهداری میوه است و از قدیمی ترین روش های حفظ مواد غذایی و محصولات کشاورزی می باشد. در طی فرآیند خشک کردن، آب از ماده غذایی خارج شده و در نتیجه امکان رشد میکروارگانیسم ها و ایجاد واکنش های شیمیایی نامطلوب به حداقل رسیده و مدت زمان نگهداری محصول افزایش می یابد (Kaveh & Amiri Chayjan, 2017).

استفاده از انرژی توان تابش مادون قرمز، یکی از روش های جدید در خشک کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی است. وقتی که اشعه مادون قرمز به سمت محصول تابانده شود، بسته به نوع محصول و طول موج اشعه تابیده شده، قسمتی از اشعه از محصول عبور کرده، درصدی از آن منعکس می شود و بالاخره بخشی هم جذب شده و به داخل محصول نفوذ می کند و به انرژی حرارتی تبدیل می گردد. سپس محصول به شدت گرم شده و گرادیان حرارتی در داخل جسم در طی مدت کوتاهی به شدت افزایش پیدا می کند. از آنجایی که هوا انرژی تشعشعی مادون قرمز را از خود عبور می دهد، بدون اینکه هوای محیط گرم شود، انرژی تابش مادون قرمز، محصول مورد نظر را گرم می کند (Khir et al., 2011).

در رابطه با خشک کردن میوه ها و محصولات کشاورزی به روش مادون قرمز تحقیقات زیادی انجام گرفته است از جمله: شوید (Naidu et al., 2016)، توت فرنگی (Adak et al., 2017) و سیب (El-Mesery and Mwithiga, 2015).

اهمیت خشک کردن ترخون و کاهش رطوبت آن برای نگهداری و انبارداری این محصول می باشد. در مورد سینتیک خشک کردن و خواص ترمودینامیکی ترخون با استفاده از خشک کن مادون قرمز- هوای داغ اطلاعاتی وجود ندارد. بنابراین هدف از این پژوهش عبارت است از: مدل سازی سینتیک کاهش رطوبت، تعیین ضریب پخش رطوبت موثر و انرژی فعال سازی ترخون در خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ.

۲- بخش مواد و روش ها

ترخون تازه از سبزی فروشی در شهر اردبیل تهیه شد و برای انجام آزمایش ها در یخچال در دمای $4 \pm 1^\circ\text{C}$ نگهداری شد. مقدار رطوبت اولیه ترخون با استفاده از آون به دست آمد. نمونه های ۲۰ گرمی در آون در دمای $70 \pm 1^\circ\text{C}$ به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد. مقدار رطوبت اولیه ترخون (d.b.) ۰/۸۲ به دست آمد.

برای انجام آزمایشات از یک خشک کن مادون قرمز- هوای داغ آزمایشگاهی استفاده شد. آزمایشها در یک سطح سرعت ۱ متر بر ثانیه، در سه سطح دمایی ۴۰، ۵۵ و ۷۰ درجه سانتیگراد و در سه سطح توان مادون قرمز ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ وات در شرایط آزمایشگاهی که مقدار رطوبت نسبی محیط آزمایشگاه در طی آزمایشها ۲۴/۳-۳۰/۵٪ بود و دمای محیط آزمایشگاه بین ۲۲/۱۲ تا $28/42^\circ\text{C}$ اندازه گیری شده بود، انجام شد. قانون دوم فیک که توسط کرانک برای شرایط لایه نازک در محصولات دارای ضخامت ارائه شد با نادیده گرفتن اثرات دما و مجموع گرادیان فشار می تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف می کند. با فرض اینکه در فرآیند خشک کردن، پخش رطوبتی موثر ثابت و شعاعی است می توان مقدار آن را از معادله زیر محاسبه نمود (Sadin et al., 2014):

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

که در آن n تعداد جملات معادله (۱، ۲، ۳، ...)، t زمان خشک شدن (s)، L نصف ضخامت نمونه ها (m)، MR نسبت رطوبت، M_t رطوبت در یک زمان (d.b.)، M_b مقدار رطوبت اولیه (d.b.)، M_e مقدار رطوبت تعادل (d.b.)، D_{eff} ضریب پخش رطوبت موثر (m^2/s). وقتی t افزایش می یابد، تمام جملات به غیر از جمله اول، صفر می شوند در نتیجه خواهیم داشت (Doymaz, 2015).

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

بعد از ساده شدن، معادله بالا را می توان به صورت خطی نوشت. با اعمال لگاریتم از طرفین معادله می توان آن را به صورت خطی درآورد.



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

با رسم $\ln(MR)$ نسبت به زمان، خطی با شیب K_1 به دست می‌آید که از مساوی قرار دادن این شیب با ضریب t در رابطه ۳، ضریب پخش رطوبت موثر را می‌توان از رابطه ۴ به دست آورد.

$$K_1 = \left(\frac{D_{eff} \pi^2}{r^2}\right) \quad (4)$$

برای مدل‌سازی رفتار خشک‌شدن بنه و همچنین متوسط نسبت رطوبت خشک‌شدن آن در درجه حرارت‌های مختلف از ۵ مدل ریاضی (Page, Logarithmic, Resgression, Logistic, Midili et al) استفاده شد. برای محاسبه مقادیر ضریب تعیین (R^2)، مربع کای (χ^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) از نرم‌افزار Curve Expert (Ver 1.4) استفاده شد.

۲-۱- تعیین انرژی مصرفی ویژه

انرژی مصرفی ویژه مورد نیاز برای خارج کردن یک کیلوگرم آب از ترخون با استفاده از خشک‌کن مادون قرمز-هوای داغ به عنوان انرژی مصرفی ویژه (SEC) بیان می‌گردد و برای ترخون در خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز-هوای داغ از رابطه زیر به دست می‌آید (Kaveh et al., 2017):

$$SEC = (C_{pa} + C_{pv} h_a) Q t \frac{(T_{in} - T_{am})}{m_{vcon} V_h} \quad (5)$$

که در آن SEC انرژی مصرفی ویژه مادون قرمز (J/kg) و C_{pa} و C_{pv} به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه بخار و هوا ($J/kg^\circ C$) و Q هوای ورودی به اتاق خشک‌کن (m^3/min)، t زمان کل خشک‌کردن (دقیقه)، h_a رطوبت مطلق هوا ($kg \text{ vapor}/kg \text{ dry air}$)، T_{in} و T_{am} به ترتیب دمای ورودی به خشک‌کن و دمای محیط، m_v مقدار انتقال جرم (kg) و V_h حجم ویژه هوا (m^3/kg) می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

شکل (۱) نسبت رطوبت در مقابل زمان (ثانیه) را در سرعت ۱ متر بر ثانیه، دماها و توان‌های مادون قرمز مختلف نشان می‌دهند. در این آزمایش‌ها درجه حرارت و توان مادون قرمز بیشترین نقش را در تغییرات نمودارها ایفا می‌کند. این منحنی‌ها فرآیند خشک‌شدن ترخون با خشک‌کن مادون قرمز- هوای داغ را نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌ها، با افزایش دمای محفظه خشک‌کن و همچنین توان مادون قرمز، رطوبت محصول سریعتر کاهش می‌یابد. افزایش دمای هوای ورودی در محفظه خشک‌کن باعث افزایش انتقال جرم و حرارت شده و کاهش رطوبت سریعتر انجام می‌شود. منحنی‌های خشک‌کردن نشان می‌دهند که شیب منحنی با افزایش دما افزایش معنی‌داری می‌یابد (شکل ۱).

نتایج به دست آمده از مدل‌سازی سینتیک گیاه دارویی ترخون در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. نتایج نشان داد که مدل Logistic دارای بهترین نتایج بود زیرا $R^2 = 0.9996$ ، $\chi^2 = 0.0011$ و $RMSE = 0.0203$ به دست آمدند. با توجه به داده‌های حاصله از جدول ۱ مقدار ضریب تعیین هر پنج مدل (Page, Logarithmic, Resgression, Logistic, Midili et al) بیشتر از ۰/۹۹۵ بودند. اما نتایج به دست آمده نشان داد مدل Logistic دارای بیشترین مقدار R^2 است.



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



انجمن مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون ایران

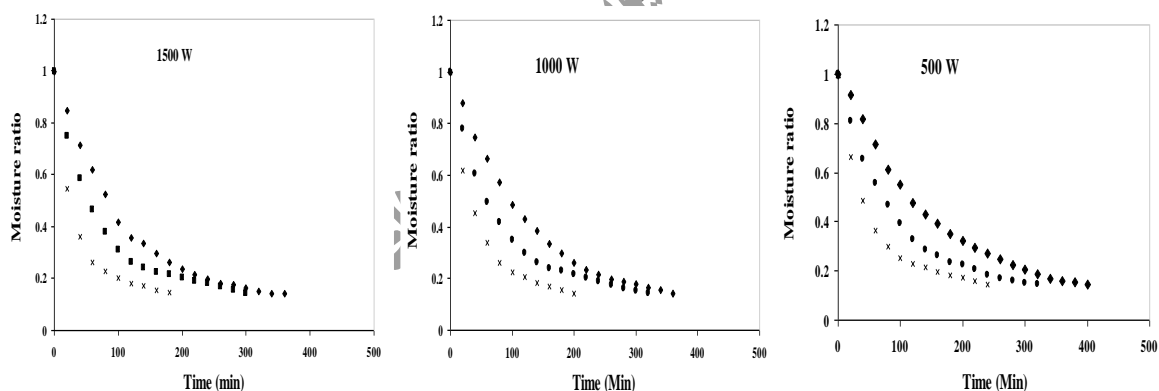


BuAli Sina University

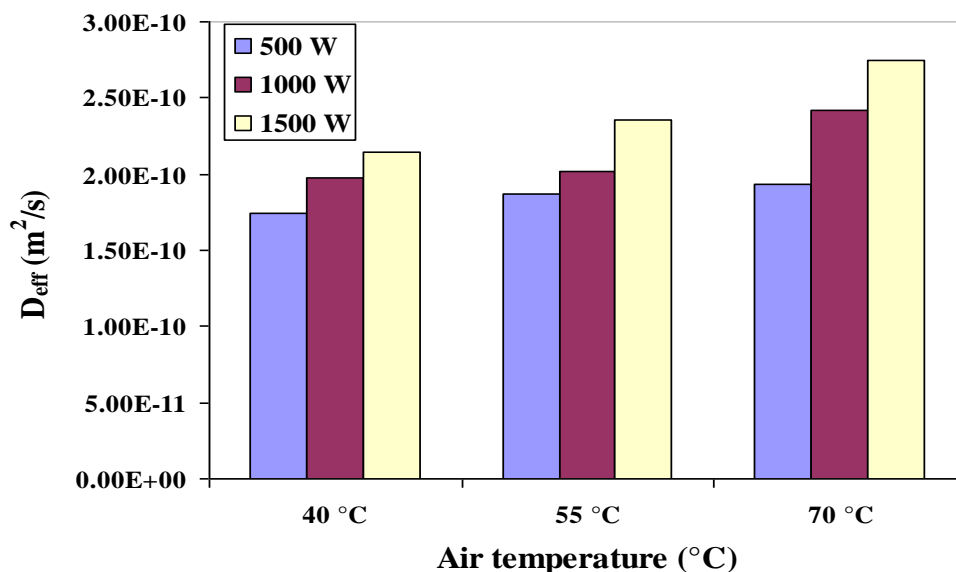
جدول ۱- نتایج آماری مدل‌های خشک کردن ترخون

Model	R^2	χ^2	RMSE
Page	0.9959	0.0098	0.0310
Logarithmic	0.9978	0.0072	0.0284
Regression	0.9980	0.0065	0.0268
logestic	0.9996	0.0011	0.0203
Midili et al	0.9993	0.0016	0.0221

تاثیر توان مادون قرمز بر روی ضریب پخش رطوبت موثر (D_{eff}) در شکل (۲) نشان داده شده است که با افزایش توان مادون قرمز در هر دما مقدار D_{eff} نیز افزایش پیدا می‌کند. بیشترین مقدار D_{eff} ($2/74 \times 10^{-11} m^2/s$) در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد و توان مایکروویو ۱۵۰۰ وات به دست آمده است و کمترین مقدار آن ($1/53 \times 10^{-11} m^2/s$) در دمای ۴۰°C و توان مادون قرمز ۲۷۰ وات به دست آمد. با توجه به شکل (۲) با افزایش دما میزان ضریب پخش رطوبت موثر افزایش می‌یابد. محاسبات نشان می‌دهد رابطه مستقیمی بین ضریب نفوذ موثر رطوبت با درجه حرارت و توان مادون قرمز وجود دارد. معمولاً مقادیر ضریب نفوذ موثر رطوبت در آزمایش‌ها بین 10^{-9} و $10^{-11} m^2/s$ می‌باشد که مقادیر به دست آمده برای ترخون نیز در این محدوده می‌باشد. نتایج به دست آمده در مورد ارتباط ضریب پخش رطوبت موثر ترخون با توان مادون قرمز و دمای خشک کردن با نتایج محققان دیگر مانند خشک کردن گوجه فرنگی (Sadin et al., 2016)، عناب (Doymaz et al., 2016) و زردآلو (Kayran and Doymaz., 2017) مشابهت دارد.



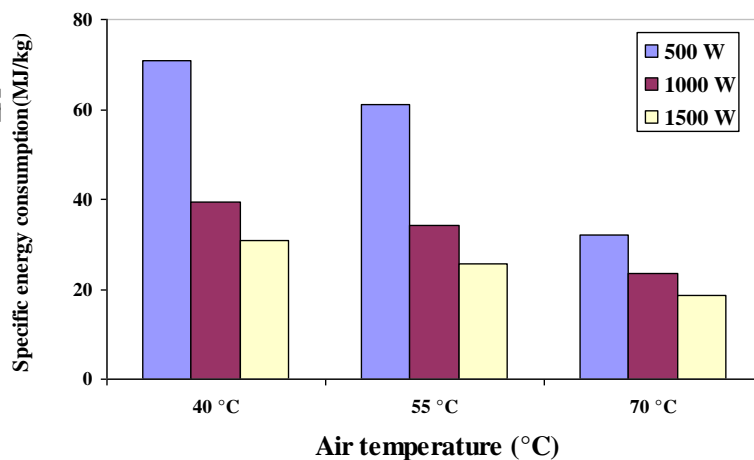
شکل ۱: نسبت رطوبت در مقابل زمان (ثانیه) در توان‌های مادون قرمز و دماهای مختلف (♦ 40 °C, ● 55 °C, ▲ 70 °C)



شکل ۲: نمودار ضریب نفوذ در مقابل دماهای مختلف در توان‌های مختلف

۲-۳- انرژی مصرفی ویژه

انرژی مصرفی ویژه برای ترخون در خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ از رابطه (۵) محاسبه شد. روند مصرف انرژی برای ترخون در دماهای هوای ورودی و توان‌های مادون قرمز در خشک‌کن مادون قرمز- هوای داغ در شکل (۳) نشان داده شده است. بیشترین مقدار انرژی مصرفی ویژه برای ترخون به ترتیب ۷۰/۹۰ MJ/kg در توان مایکروویو ۵۰۰ W و دمای ۴۰ °C به دست آمد. انرژی مصرفی ویژه مورد نیاز با افزایش توان مادون قرمز و دمای هوای ورودی، کاهش پیدا کرد. با افزایش دمای هوای ورودی و توان مادون قرمز، زمان خشک شدن کاهش پیدا کرد بنابراین باعث کاهش انرژی مصرفی ویژه شد. انرژی مصرفی تابع عوامل مختلفی مانند توان مادون قرمز، سرعت هوای ورودی، دمای محیط، گرمای نهان تبخیر آب، گرمای ویژه هوا و دمای هوای ورودی بود. پژوهشگران دیگر نیز نتایج مشابهی را گزارش نموده‌اند (Salarikia et al., 2017; Darvishi et al., 2013; El-Mesery and Mwithiga, 2011).



شکل ۳: نمودار انرژی مصرفی ویژه در مقابل دماهای مختلف در توان‌های مختلف



۴- نتیجه گیری

رفتار خشک کردن گیاه دارویی ترخون در خشک کن مادون قرمز- هوای داغ آزمایشگاهی در دماهای ۴۰، ۵۵ و ۷۰ °C در سرعت هوای ورودی ۱ متر بر ثانیه و توان های مادون قرمز ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ بررسی شد. دمای هوای ورودی و توان مادون قرمز عوامل مهمی در محاسبه زمان خشک شدن، میزان ضریب نفوذ موثر رطوبت و انرژی مصرفی ویژه در خشک شدن ترخون بودند. همچنین برای پیش بینی رطوبت ترخون از پنج مدل ریاضی استفاده شد که نتایج نشان داد مدل Logistic بهترین مدل برای پیش بینی بود. همچنین مقادیری برای ضریب پخش رطوبت موثر پیدا شد که بیشترین مقدار آن $2/74 \times 10^{-10}$ و کمترین مقدار m/s^2 $1/54 \times 10^{-10}$ به دست آمد. بیشترین مقدار انرژی مصرفی ویژه در توان مادون قرمز ۵۰۰ وات و دمای ۴۰ و کمترین مقدار آن در توان مادون قرمز ۱۵۰۰ وات و دمای ۷۰ به دست آمدند.

۵- مراجع

- Arabhosseini A., Huisman W. van Boxtel A. Muller J. (2009). Modeling of thin layer drying of tarragon (*Artemisia dracunculus* L.). *industrial crops and products*.29: 53–59
- Khair, R., Pan, Z., Salim, A., Hartsough, B.R. and Mohamed, S. (2011). Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying. *LWT-Food Sci. Technol.* 44: 1126-1132.
- Kaveh, M. and Amiri Chayjan, R. (2017). Modeling thin-layer drying of turnip slices under semi-industrial continuous band dryer. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41: e12778
- Naidu, M. M., Vedhashree, M., Satapathy, P., Khanum, H., Ramsamy, R., Hebbar H.U. (2016) Effect of drying methods on the quality characteristics of Dill (*Anethumgraveolens*) greens. *Food Chemistry*, 19: 849-856.
- Adak, N., Heybeli N., Ertekin, C. (2017). Infrared drying of strawberry. *Food Chem.* 15:219:109-116
- El-Mesery H.S., Mwithiga G (2015). Performance of a convective, infrared and combined infrared- convective heated conveyor-belt dryer. *J Food Sci Technol.* 52(5):2721-30.
- Kaveh, M., Amiri chayjan, R., and Nikbakht, A., M. (2017). Mass transfer characteristics of eggplant slices during length of continuous band dryer. *Heat and Mass Transfer* 53: 2045-2059
- Sadin R., Chegini G., Sadin H (2014). The effect of temperature and slice thickness on drying kinetics tomato in the infrared dryer. *Heat Mass Transfer*, 50:501–507.
- Doymaz I. (2015). Infrared Drying Kinetics and Quality Characteristics of Carrot Slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39: 2738–2745.
- Doymaz, I., Karasu, S., Baslar M. (2016). Effects of infrared heating on drying kinetics, antioxidant activity, phenolic content, and color of jujube fruit. *Food Measure.* 10(2): 283-291.
- Kayran, S., Doymaz, I. (2017). Infrared Drying and Effective Moisture Diffusivity of Apricot Halves: Influence of Pretreatment and Infrared Power. *Journal of Food Processing and Preservation.* 41(2):e12827
- Salarikia, A., Ashtiani, S.M., Golzarian M.R. (2017). Comparison of Drying Characteristics and Quality of Peppermint Leaves Using Different Drying Methods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3): e12930.
- Darvishi, H., Najafi, G., Hosainpour, A., Khodaei, J., Aazdbakht M. (2013). Far-Infrared Drying Characteristics of Mushroom Slices. *Chemical Product and Process Modeling*, 8(2): 107–117.