



تأثیر دمای هوای و زمان بخار دهی بر ضریب پخش رطوبت موثر، انرژی فعال سازی و انرژی مصرفی ویژه گندم نیم جوش
ابراهیم تقی نژاد^۱؛ محمد کاوه^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، تاثیر شرایط مختلف بر روی زمان خشک شدن، ضریب پخش رطوبت موثر، انرژی فعال سازی و انرژی مصرفی ویژه مورد نیاز برای خشک کردن گندم نیم جوش با استفاده از یک خشک کن هوای گرم آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش ها در سه سطح دمایی ۵۰، ۶۰ و ۷۰ °C و سه سطح زمان بخار دهی ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه و در دمای خیساندن ۶۰ °C انجام شد. نتایج بررسی ها نشان داد که بیشترین مقدار ضریب پخش رطوبت موثر برای خشک شدن گندم نیم جوش به مقدار $10^{-9} \times 1/12$ در دمای ۷۰ °C و مدت زمان اعمال بخار ۱۵ دقیقه بود. همچنین بیشترین انرژی فعال سازی به (۶۷/۶۶ KJ/mol) محاسبه شد. بیشترین مقدار انرژی مصرفی ویژه به میزان (۱۱۰/۵۳ MJ/kg) در دمای هوای ۴۰ °C و مدت زمان اعمال بخار ۵ دقیقه به دست آمد.

کلمات کلیدی: گندم نیم جوش، خشک کردن، ضریب پخش رطوبت موثر، انرژی مصرفی ویژه

Effect of air temperature and steaming time on effective moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption of parboiled wheat

Ebrahim Taghinezhad^{1*}; Mohammad Kaveh²

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, the effect of different conditions on drying time, effective moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption required for drying of parboiled wheat using a hot air dryer were investigated. The experiments were carried out at three levels air temperature 50, 60 and 70 °C, and three levels of steaming time of 5, 10 and 15 minutes, and 60 °C temperature soaking. The results showed that the highest amount of effective moisture diffusivity was used for drying of parboiled wheat to 12.1×10^{-9} at air temperature 70 °C and 15 minutes application steam time. Also, the highest activation energy was calculated (67.66 kJ/mol). The highest amount of energy consumption was obtained at a rate of 110 MJ/kg in air temperature of 40 °C and a 5 minute application steam time.

Keywords: Parboiled wheat, Drying, Effective moisture diffusivity, Specific energy consumption



تیمار گرمایی بر روی گندم، قبل از فرآیند تبدیل را نیم جوش کردن گندم گویند که یک فرآیند هیدروگرمایی است و شامل سه مرحله غوطه‌وری، بخاردهی و خشک کردن می‌باشد. استفاده از روش نیم جوش کردن، به‌عنوان یک روش مفید، کاربردی و مطمئن برای حل مشکل شکستگی گندم است که تأثیر بسزایی در خودکفایی گندم دارد (Taghinezhad et al., 2015).

گندم نیم جوش به واسطه بالا بودن میزان محتوای رطوبتی، به طور جدی در معرض فساد قرار می‌گیرد. خشک کردن بهترین راه برای به حداقل رساندن ضایعات آن می‌باشد و نیز به واسطه کمتر شدن وزن و حجم محصول خشک شده، بسته بندی و حمل و نقل آن آسانتر و کم هزینه تر می‌شود. عمل خشک کردن فرآیندی است که انرژی ورودی بسیاری را به دلیل وجود گرمای نهان تبخیر آب و بازده نسبتاً کم خشک کن‌های صنعتی نیاز دارد (Kahyaoglu et al., 2012).

در روش‌های باستانی، برای خشک کردن محصولات کشاورزی از نور خورشیدی استفاده شد. با این حال، این فرآیند دارای چندین معایب مانند تغییرات نامطلوب در کیفیت محصولات غذایی، عدم کنترل در طول فرآیند خشک شدن، مدت زمان خشک شدن و آلودگی محصول می‌باشد. برای بهبود کیفیت روش خشک کردن سنتی با استفاده از روش خشک کردن صنعتی مانند خشک کن هوای داغ باید جایگزین شود (Kara and Doymaz, 2015).

خشک کردن لایه نازک به فرآیند خشک کردن دانه‌ها می‌گویند که تمام دانه‌ها در شرایط یکسان هوای داغ قرار گیرند. تمام خشک کن‌های هوای داغ بر اساس خشک شدن لایه نازک مدل سازی می‌شوند. تحقیقات زیادی در مورد ضریب نفوذ موثر رطوبت، انرژی فعال سازی و انرژی مصرفی ویژه بر روی لایه نازک محصولات از جمله سبزیجات و میوه‌های مختلف مانند قارچ (Ghanbarian et al., 2016)، سویا (Khoshtaghaza et al., 2015)، انار (Kara and Doymaz 2015)، و زرشک (Aghbashlo et al., 2008) انجام شده است. اهمیت خشک کردن گندم نیم جوش و کاهش رطوبت آن برای نگهداری طولانی مدت و استفاده از خصوصیات این محصول می‌باشد. اما در مورد خشک کردن گندم نیم جوش اطلاعات بسیار کمی وجود دارد که ضرورت این پژوهش را ایجاد می‌کند. بنابراین هدف از این تحقیق بررسی سینتیک خشک کردن، تعیین ضریب پخش رطوبت موثر، انرژی فعال سازی و انرژی مصرفی ویژه در طی خشک شدن گندم نیم جوش می‌باشد.

۲- بخش مواد و روش‌ها

آماده سازی نمونه‌ها

محتوای رطوبت نمونه‌ها طی فرآیند خشک کردن توسط رابطه‌ی (۱) محاسبه گردید (Amiri Chayjan et al., 2017):

$$MC = \frac{W_R - W_T}{W_T} \quad (1)$$

که در آن MC : محتوای رطوبتی در طول فاصله طی شده (بر پایه خشک)، W_R : وزن تر نمونه‌ها (کیلوگرم)، W_T : وزن خشک محصول در طول فاصله طی شده (کیلوگرم) می‌باشند.

نسبت رطوبت (MR) شکل بدون بعد محتوای رطوبتی است و با معادله (۲) تعریف می‌شود. این پارامتر رطوبتی که می‌تواند در زمان t از محصول خارج شود، نسبت به رطوبت قابل خروج اولیه از محصول را بیان می‌کند (Sharifian et al., 2012).

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

در رابطه M_t ، M_o و M_e به ترتیب میزان رطوبت در زمان t ، رطوبت اولیه محصول و رطوبت تعادلی همگی بر حسب (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد) هستند.

برای زمان‌های طولانی خشک شدن، مقادیر M_e در مقایسه با مقادیر M_o بسیار کوچک هستند. بنابراین می‌توان معادله (۲) را به صورت

معادله (۳) ساده کرد (Sharifian et al., 2012)



$$MR = \frac{M_t}{M_0}$$

قانون دوم فیک انتقال جرم در فرایند خشک کردن را توصیف می‌کند. حل عمومی این قانون با اعمال فرضیاتی توسط کرانک برای اجسام

کروی به صورت معادله (۴) ارائه شده است (Kara and Doymaz 2015).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{D_{eff} n^2 \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (4)$$

در این رابطه n تعداد جملات معادله، t زمان خشک شدن بر حسب ثانیه، r شعاع هندسی گندم بر حسب متر، D_{eff} ضریب پخش مؤثر رطوبت بر حسب متر مربع بر ثانیه است. در صورت طولانی بودن زمان خشک شدن تنها جمله اول سری را می‌توان در نظر گرفت. در این شرایط معادله (۴) به صورت رابطه (۵) ساده می‌شود.

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (5)$$

با اعمال لگاریتم از طرفین معادله می‌توان آن را به صورت خطی درآورد (رابطه ۶).

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}\right) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{D_{eff} \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (6)$$

حال می‌توان ضریب پخش مؤثر رطوبت را از روش شیب محاسبه نمود. در این روش با ترسیم مقدار لگاریتم نسبت رطوبت حاصل از داده‌های آزمایشگاهی در مقابل زمان، خط ثابتی با شیب K_o بدست می‌آید (Sharifian et al., 2012).

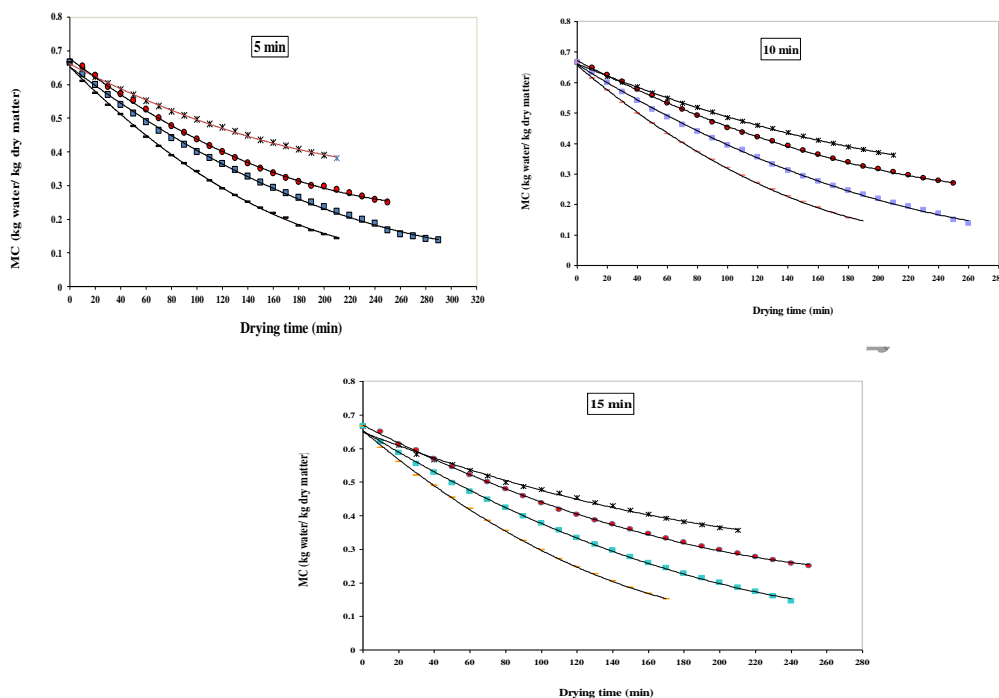
$$K_o = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \quad (7)$$

انرژی مصرفی ویژه به صورت مقدار انرژی مصرفی در واحد جرم رطوبت خارج شده از نمونه آزمایشی تعریف می‌شود. در این پژوهش، انرژی مصرفی ویژه با استفاده از معادله (۸) محاسبه شد (Kaveh et al., 2017).

$$SEC = Qt \frac{(T_{in} - T_{am})}{60m_v V_h} (C_{pa} + C_{pv} h_a) \quad (8)$$

که در آن SEC انرژی مصرفی ویژه بر حسب ژول بر کیلوگرم، C_{pv} و C_{pa} به ترتیب ظرفیت گرمایی بخار آب و هوا و برابر با $1828/8$ و $1004/16$ $(J/kg^\circ C)$ ، Q دبی هوای ورودی به اتاقک خشک‌کن بر حسب مترمکعب بر دقیقه، t زمان کل خشک کردن بر حسب دقیقه، h_a رطوبت مطلق هوا $(kg\ vapor/kg\ dry\ air)$ ، T_{in} و T_{am} به ترتیب دمای هوای ورودی به خشک‌کن و دمای محیط بر حسب درجه سلسیوس، m_v مقدار انتقال جرم بر حسب کیلوگرم و V_h حجم ویژه هوا بر حسب مترمکعب بر کیلوگرم می‌باشد.

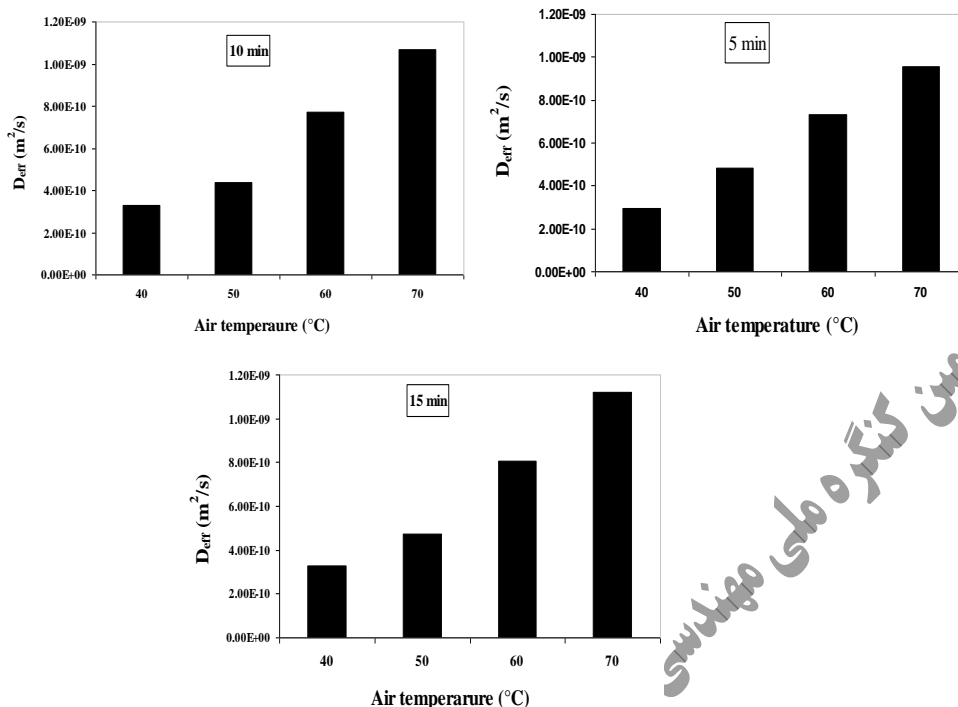
در شکل (۱) تاثیر افزایش دما بر زمان خشک کردن گندم نیم جوش در روش هوای داغ نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، در هر سه سطح زمان بخار دهی، با افزایش دمای هوا از 40°C به 70°C ، زمان خشک کردن محصول کاهش یافت. با افزایش دما، زمان خشک کردن به علت افزایش گرادیان حرارتی در داخل جسم و در نتیجه افزایش سرعت تبخیر رطوبت محصول کاهش یافت. این امر به دلیل افزایش دمای محفظه خشک کن است که انتقال جرم را سریعتر انجام می دهد و باعث کاهش زمان خشک کردن می شود (Ponkham et al., 2012).



شکل ۱- اثر دمای هوا (40°C ▲، 50°C ●، 60°C ◆ - 70°C) بر محتوای رطوبتی در زمان های مختلف بخاردهی

ضریب پخش رطوبت موثر

با افزایش دما و افزایش زمان بخار دهی، رطوبت نسبی محصول کاهش می یابد. افزایش دما و زمان بخار دهی در محفظه خشک کن باعث انتقال جرم و گرمای بالاتری شده و کاهش رطوبت را تشدید می کند. نتایج نشان می دهد که رابطه مستقیمی بین ضریب نفوذ رطوبت با دما و زمان بخار دهی وجود دارد (شکل ۲). ضریب نفوذ رطوبت، به دما و ترکیب مواد بستگی دارد؛ در این تحقیق ترکیب گندم نیم جوش در آزمایش ها ثابت بوده لذا دلیل اصلی تغییر میزان ضریب نفوذ رطوبت مربوط به دما و زمان بخار دهی مختلف اعمال شده می باشد. شکل (۲) نشان می دهد که میزان ضریب نفوذ رطوبت با افزایش دمای هوا و زمان بخار دهی افزایش می یابد. پایین ترین دما و زمان بخار دهی سبب کمترین مقدار ضریب نفوذ رطوبت شده و بیشترین مقدار ضریب نفوذ رطوبت در بالاترین دما و زمان بخار دهی اتفاق افتاده است. مقادیر ضریب نفوذ رطوبت گندم نیم جوش از $2/96 \times 10^{-10}$ تا $1/12 \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه تغییر کرد. معمولاً مقدار ضریب نفوذ محصولات غذایی و کشاورزی در بازه 10^{-8} تا 10^{-10} مترمربع بر ثانیه است (Kaveh et al., 2017). مقادیر محاسبه شده ضریب نفوذ در تحقیق حاضر نیز در بازه مذکور است.



شکل ۲- اثر دمای هوای ورودی بر ضریب پخش رطوبت (m^2/s) در زمان های مختلف بخاردهی

انرژی فعال سازی

برای محاسبه انرژی فعال سازی ابتدا مقدار $1/T_a$ محاسبه شد. سپس مقدار آن در مقابل $\ln(MR)$ ترسیم شد. سپس انرژی فعال سازی E_a با استفاده از معادله ۷ محاسبه شد. مقدار انرژی فعال سازی و ضریب همبستگی برای سطوح مختلف زمانهای بخار دهی در جدول (۱) نشان داده شده اند. کمترین و بیشترین مقدار انرژی فعال سازی گندم نیم جوش طی آزمایشات انجام شده به ترتیب $۳۲/۸۴$ و $۶۷/۶۶$ kJ/mol محاسبه شد.

جدول ۱- مقادیر انرژی فعال سازی و ضریب همبستگی (R^2) در سرعت های مختلف

زمان های بخاردهی (دقیقه)	۵	۱۰	۱۵
انرژی فعال سازی (kJ/mol)	۶۷/۶۶	۳۲/۸۴	۵۱/۵۵
ضریب همبستگی (R^2)	۰/۹۷۲۸	۰/۹۸۲۵	۰/۹۶۸۴

انرژی مصرفی ویژه

انرژی مصرفی ویژه برای گندم نیم جوش با استفاده از معادله (۸) محاسبه شد. مقادیر محاسبه شده در شکل (۳) آورده شده است. نتایج نشان می دهد که انرژی مصرفی در خشک کردن گندم نیم جوش با افزایش دما، افزایش پیدا کرده است. با افزایش زمان های بخار دهی در گندم نیم جوش انرژی مصرفی ویژه افزایش پیدا کرده است. بیشترین مقدار انرژی مصرفی ویژه برای گندم نیم جوش برابر با $۱۱۰/۵۳$ مگاژول بر کیلوگرم در زمان بخار دهی ۵ دقیقه و دمای ۴۰ درجه سلسیوس به دست آمدند. نتایج بدست آمده برای محصول بنه، مشابه با نتایج گزارش شده در خشک کردن محصولات دیگر مانند سویا (Khoshtaghaza *et al.*, 2015) و بادمجان (Kaveh *et al.*, 2017) است.



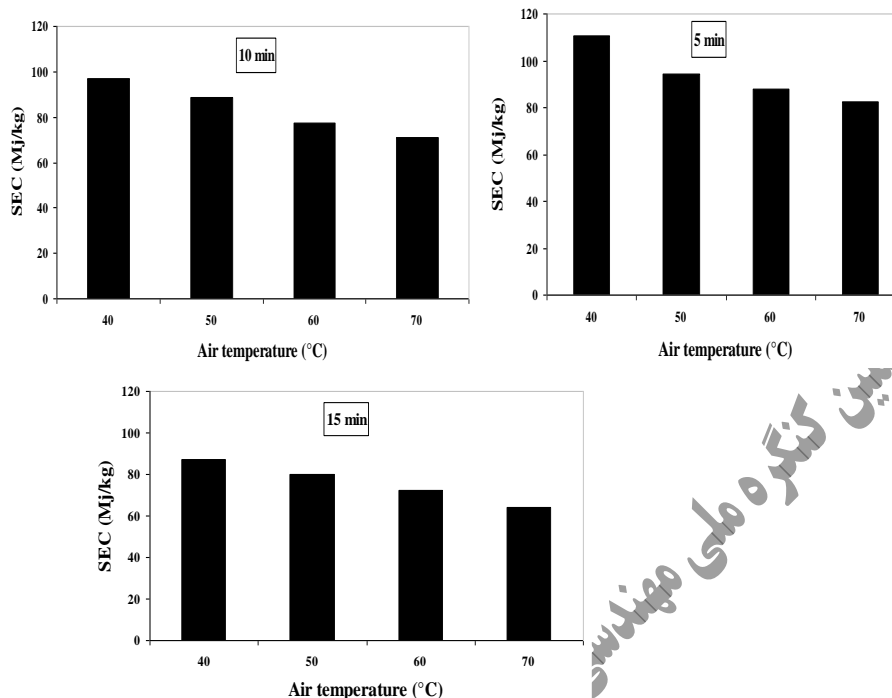
یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



انجمن مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون ایران



Buali Sina University



شکل ۳- تاثیر درجه حرارت بر انرژی مصرفی ویژه در زمان های مختلف بخار دهی

۴- نتیجه گیری

رفتار خشک کردن گندم نیم جوش در خشک کن آزمایشگاهی هوای داغ در دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ °C، سه سطح زمان بخار دهی (۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه) بررسی شد. دمای هوای ورودی و زمان بخار دهی عوامل مهمی در محاسبه زمان خشک شدن و میزان ضریب نفوذ موثر رطوبت و انرژی مصرفی ویژه در خشک شدن گندم نیم جوش بودند. بیشترین مقدار برای ضریب پخش رطوبت موثر $1/12 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ و کمترین مقدار $2/96 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ به دست آمد. بیشترین مقدار ضریب پخش رطوبت موثر در دمای هوای ۷۰ °C و زمان بخار دهی ۱۵ دقیقه به دست آمد. بیشترین مقدار انرژی مصرفی ویژه ۱۱۰/۵۳ مگاژول بر کیلوگرم و کمترین مقدار آن ۶۴/۲۱ مگاژول بر کیلوگرم بدست آمد.

۵- مراجع

- Aghbashlo, M., Kianmehr, M. and Samimi-Akhijahani, H. 2008. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). *Energy Conv. Manag.* 49(10): 2865-2871
- Amiri Chayjan, R., Kaveh, M., Dibagar, N. and ZarrinNejad, M. 2017a. Optimization of pistachio nut drying in a fluidized bed dryer with microwave pretreatment applying response surface methodology. *Chemical Product and Process Modeling*, 12(3): DOI: 10.1515/cppm-2016-0048.
- Ghanbarian, D., Dastjerdi M.B., Toriki-Harchegani M. (2016). Mass transfer characteristics of bisporus mushroom (*Agaricus bisporus*) slices during convective hot air drying. *Heat Mass Transfer*; 52(5): 1081-1088.
- Kahyaoglu, L.N., Sahin S, Sumnu G. (2012). Spouted bed and microwave-assisted spouted bed drying of parboiled wheat. *Food and Bioproducts Processing* 90:) 301-308.
- Kara, C. and Doymaz, I. 2015. Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of drying curves of apple pomace. *Heat and Mass Transfer*, 51(7): 983-989.
- Kaveh, M., Amiri Chayjan, R., Nikbakht, A. M. Mass transfer characteristics of eggplant slices during length of continuous band dryer. *Heat and Mass Transfer*, 53(6), 2045-2059 (2017).
- Khoshthagaza MH, Darvishi H, Minaei S (2015) Effects of microwave - fluidized bed drying on quality, energy consumption and drying kinetics of soybean kernels. *J Food Sci Technol* 52(8): 4749- 4760
- Ponkham, K., Meeso, N., Soponronnarit, S., Siriamornpun, S. Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage. *Food and Bioproducts Processing*, 90, 155-164 (2012).
- Sharifian, F., Motlagh, A.M. and Nikbakht, A.M. 2012. Pulsed microwave drying kinetics of fig fruit (*Ficus carica*



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



L.). Aust. J. Crop Sci. 6(10), 1441-1447.

Taghinezhad, E., Khoshtaghaza, M. H., Minaei, S. and Latifi, A. 2015. Effect of soaking temperature and steaming time on the quality of parboiled Iranian paddy rice. International journal of food engineering, 11: 547-556

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران