



بررسی سینتیک و مدل‌سازی خشک کردن رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) با استفاده از مادون قرمز

سیدسجاد حسینی، مهدی کاشانی‌نژاد*، حبیب‌اله میرزایی، یحیی مقصودلو

دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گیلان، گلستان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۳

چکیده

سابقه و هدف: گیاه رزماری، بوته‌ای همیشه سبز و معطر از خانواده نعنائیان می‌باشد که دارای ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی و دارویی زیادی است. امروزه جهت افزایش میزان استحصال اسانس و بهبود کیفیت آن، ابتدا گیاه مورد نظر خشک شده و سپس اسانس‌گیری انجام می‌شود. لذا روش‌های جدید، برای خشک کردن گیاهان دارای اسانس مورد مطالعه می‌باشد. در گذشته در مورد رزماری روش‌های خشک کردن مختلفی از جمله هوای داغ، میکروویو، انجمادی، آفتابی و... توسط محققین مختلف به کار برده شده است. اما امروزه خشک کردن با مادون قرمز، برای بسیاری از محصولات کشاورزی مورد توجه قرار گرفته که این روش در مورد رزماری تاکنون به کار گرفته نشده است. هدف از این تحقیق، مدل‌سازی خشک کردن برگ‌های رزماری با مادون قرمز می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه با استفاده از پرتوهای امواج الکترومغناطیس در محدوده‌ی طیف مادون قرمز (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ وات)، برگ‌های تازه چپن شده گیاه رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.)، خشک شدند و سپس با استفاده از هشت مدل شناخته شده که کاربرد زیادی در خشک کردن محصولات مختلف دارند، مدل‌سازی در نرم‌افزار متلب ۲۰۱۶ انجام شد.

یافته‌ها: مدل میدیلی برای توان‌های ۲۰۰ و ۳۰۰ وات و مدل ورما و همکاران برای توان ۱۰۰ وات، جهت پیش‌بینی روند خشک شدن، انتخاب گردید.

نتیجه‌گیری: مدل‌های میدیلی و ورما و همکاران بهترین مدل‌ها برای پیشگویی رفتار خشک شدن رزماری به روش مادون قرمز هستند.

واژه‌های کلیدی: رزماری، خشک کردن، مدل‌سازی، امواج مادون قرمز

مقدمه

امروزه جهت افزایش میزان استحصال اسانس و بهبود کیفیت آن، ابتدا گیاه مورد نظر را خشک کرده و سپس اسانس‌گیری انجام می‌شود. روش پرتودهی مادون قرمز نسبت به روش‌های متداول خشک کردن دارای مزایایی از جمله انتقال حرارت سریع‌تر، زمان کوتاه‌تر، مصرف انرژی پایین‌تر و در نتیجه حفظ کیفیت محصول است (۷، ۱۲). در این روش، می‌توان

گیاه رزماری از خانواده *Laminaceae* دارای ویژگی‌های دارویی متنوعی از جمله، خاصیت آنتی‌اکسیدانی، ادرار آور، ضد اسپاسم، ضد التهابی، ویژگی‌های ضد میکروبی و ضد قارچی است (۵).

* مسئول مکاتبه: kashaninejad@yahoo.com

خشک شدن، ابتدا پارامتر نسبت رطوبت در طی خشک شدن برگ‌های رزماری با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad \text{رابطه ۱.}$$

MR = نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t = رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه بر پایه خشک، M_0 = رطوبت اولیه نمونه‌ها بر پایه خشک، و M_e = رطوبت تعادلی نمونه‌ها بر پایه خشک می‌باشند).

با توجه به قرارگرفتن منحنی آهنگ خشک کردن رزماری در مرحله سرعت نزولی، از مدل انتشار برای تجزیه و تحلیل فرآیند خشک کردن استفاده شد. ضمن اینکه برگ‌های رزماری پخش شده روی سینی خشک کن، به صورت تیغه فرض شد، با استفاده از قانون دوم فیک (رابطه ۲) خواهیم داشت (۳، ۱۶):

$$MR = \frac{(M - M_e)}{(M_0 - M_e)} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- (2n+1)^2 \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right) \right]$$

که در آن M = میزان رطوبت در مبنای خشک در هر نمونه برداری، M_e = مقدار رطوبت تعادلی، M_0 = میزان رطوبت اولیه، MR = نسبت رطوبت، t = زمان نمونه برداری، D_{eff} = ضریب نفوذ موثر، و L = نیم ضخامت برگ‌های رزماری بر حسب متر که در طول آزمون ثابت فرض شده است. لازم به ذکر است که در معادله فوق n مساوی صفر فرض شده است.

به دلیل اینکه دما، در خشک کن مادون قرمز در هنگام کار به درستی قابل اندازه‌گیری نیست، برای به دست آوردن انرژی فعال‌سازی باید از شکل اصلاح شده‌ی رابطه آرنیوس^۳ که در آن از توان خروجی لامپ مادون قرمز بهره گرفته شده است استفاده کرد (۴، ۱۰).

$$D_{eff} = D_0 \exp \left(\frac{E_a}{P} \right) \quad \text{رابطه ۳.}$$

تجهیزات را فشرده و اتوماتیک نمود و همچنین امکان پایش پارامترهای فرآوری با دقت بالا نیز وجود دارد (۹). دریا ارسلان و موسا اوزجان (۲۰۰۷) برگ‌های رزماری را به روش‌های خشک کردن آفتابی، هوای داغ و مایکروویو خشک کردند و مدل‌های لگاریتمی^۱ و میدیلی و کوچوک^۲ را برای روش‌های آفتابی و آون هوای داغ، همچنین مدل‌های پیچ^۳، پیچ اصلاح شده^۴ و میدیلی و کوچوک را برای روش مایکروویو معرفی کردند (۱). از آنجا که تاکنون از روش مادون قرمز برای خشک کردن رزماری استفاده نشده است؛ لذا هدف از این تحقیق، مدل‌سازی فرآیند خشک کردن گیاه رزماری با مادون قرمز بود.

مواد و روش‌ها

خشک کردن: رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) مورد نیاز برای این پژوهش در شهریور ماه ۱۳۹۶ از محوطه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، جمع‌آوری گردید. سرشاخه رزماری‌های چیده شده، پس از شستشو و آب‌گیری و خشک کردن آب سطحی، به صورت برگ برگ، جدا شده و برای آزمون آماده‌سازی شدند. خشک کردن توسط دستگاه خشک‌کن مادون قرمز انجام شد. از یک لامپ رشته ای مادون قرمز نزدیک با توان‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ وات جهت بررسی اثر تغییر توان پرتودهی بر سرعت خشک کردن رزماری استفاده شد. تغییرات وزن با استفاده از ترازو (AND مدل EK-610i ساخت ژاپن) که در زیرمحفله‌ی خشک کن تعبیه شده بود، با دقت ± 0.01 گرم طی زمان، در رایانه ثبت شد.

سینتیک فرآیند خشک شدن و تعیین ضرایب نفوذ موثر و انرژی فعال‌سازی: جهت مدل‌سازی فرآیند

1. Logarithmic
2. Midilli and Kucuk
3. Page
4. Modified Page

جدول ۱- مدل‌های مورد آزمون در مدل‌سازی فرآیند خشک شدن رزماری با تابش مادون قرمز

Table 1. The applied models in fitting the experimental data during infrared radiation drying of rosemary

شماره	نام مدل	معادله	منبع
number	Model name	Equation	References
1	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(۸)
2	Verma et al	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	(۱۴)
3	Two term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(۶)
4	Parabolic	$MR = a + (bt) + (ct^2)$	(۱۱)
5	Page	$MR = \exp(-ktn)$	(۱۸)
6	Weibull	$MR = \exp(-t/b)^a$	(۲)
7	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	(۱۵)
8	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	(۱۹, ۱۷)

لامپ مادون قرمز سبب افزایش دمای محفظه‌ی خشک کن می‌شود. افزایش دما باعث بالا رفتن ظرفیت جذب رطوبت هوای محفظه و متعاقباً تبخیر بهتر و سرعت بیشتر خشک شدن می‌شود. دویماز (۲۰۱۳) در گزارش خود اعلام کرد که افزایش توان مادون قرمز در فرآیند خشک کردن ورقه‌های هویج، باعث کاهش معنی‌دار زمان خشک شدن می‌شود (۸).

ضرایب نفوذ موثر و انرژی فعال‌سازی: شکل ۲

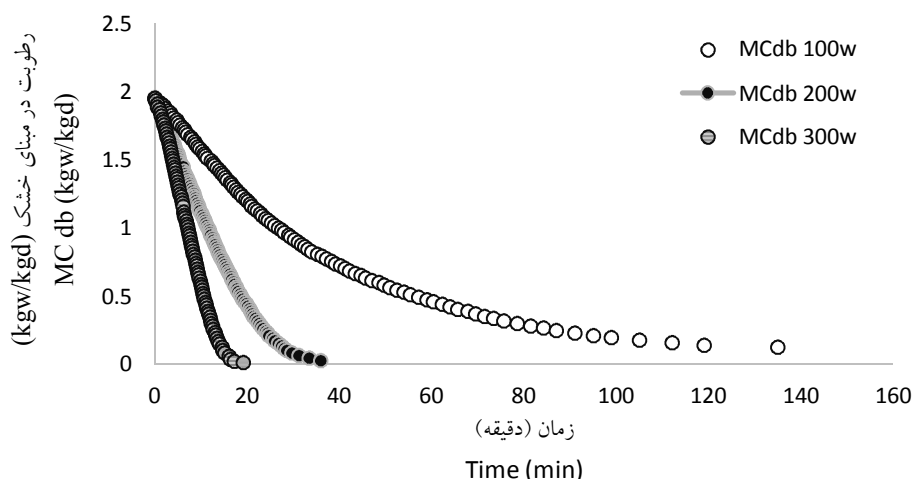
روند تغییرات $\ln MR$ نسبت به زمان در توان‌های متفاوت را نشان می‌دهد. از شیب این خطوط جهت محاسبه ضرایب نفوذ موثر استفاده گردید. مقدار ضرایب نفوذ موثر برای توان‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ وات به ترتیب $۳/۳۳ \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ، $۱/۰۷ \times 10^{-8}$ و $۱/۹۰۷ \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ محاسبه شد. ژو و همکاران (۲۰۱۰) نیز اعلام کردند که با افزایش توان پرتو مادون قرمز، ضرایب نفوذ موثر در برش‌های سیب افزایش می‌یابد. آنها میزان ضرایب نفوذ موثر را برای سیب $۴/۵۰ \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ تعیین کردند (۱۹).

مدل‌سازی فرآیند خشک کردن: به منظور مدل‌سازی و پیش بینی روند خشک شدن برگ‌های رزماری، از هشت مدل شناخته شده مطابق جدول ۱ استفاده شد. مدل‌های رگرسیونی تغییرات نسبت رطوبت در طی خشک شدن بر اساس متغیر مستقل زمان بوسیله نرم افزار متلب (۲۰۱۶) حل شد. از پنج معیار ضریب رگرسیون^۱، ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها^۲، خطای مجموع مربعات^۳، ضریب رگرسیون تعدیل یافته^۴ و نسبت ضریب رگرسیون به ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها^۵، برای سنجش بهترین مدل استفاده شد. برای هر مدل هرچه مقدار R^2 ، R^2_{adj} و $R^2/RMSE$ بیشتر و مقادیر RMSE و SSE کمتر باشد، مدل بهتر است (۱۰).

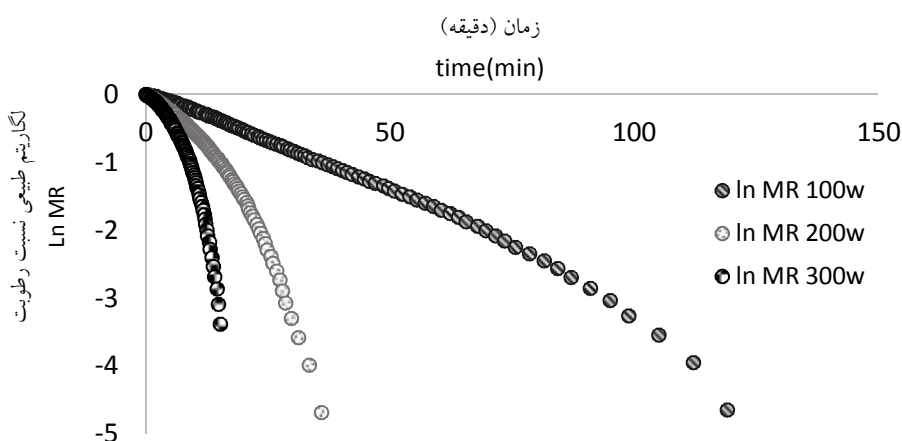
نتایج و بحث

خشک کردن رزماری: همانطور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، زمان خشک شدن رزماری از حدود ۱۴۰ دقیقه در توان ۱۰۰ وات به حدود ۲۰ دقیقه در توان ۳۰۰ وات کاهش یافته است. بالا بردن توان

1. R^2
2. RMSE
3. SSE
4. Adjusted- R^2
5. $R^2/RMSE$



شکل ۱- میزان رطوبت برگ‌های رزماری بر مبنای زمان خشک شدن
Figure 1-Moisture content of rosemary leaves based on drying time

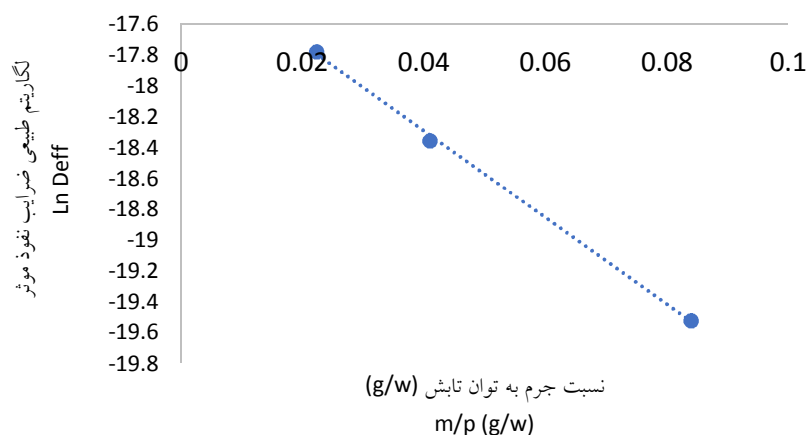


شکل ۲- نمودار نیمه لگاریتم طبیعی نسبت‌های رطوبت به زمان
Figure 2. Semi-natural logarithmic graph of moisture ratio against drying time

میدیلی برای توان‌های ۲۰۰ و ۳۰۰ وات و مدل ورما و همکاران^۱ برای توان ۱۰۰ وات، مدل‌های مناسب‌تری تشخیص داده شد (جدول ۲). ژو و همکاران (۲۰۱۰) مدل پیچ را برای خشک کردن برش‌های سیب در پرتوهای مادون قرمز پیشنهاد دادند (۱۹). طغرل (۲۰۰۶) در پژوهشی، مدل میدیلی را به‌عنوان بهترین مدل برای پیشگویی رفتار خشک شدن برش‌های هویج در روش مادون قرمز عنوان کرد (۱۳).

شکل ۳ روند تغییرات لگاریتم طبیعی ضرائب نفوذ موثر نسبت به پارامتر m/p را نشان می‌دهد. با استفاده از شیب خط حاصل، میزان انرژی فعال‌سازی فرآیند خشک کردن رزماری در روش مورد آزمون فرآیند خشک کردن برش‌های هویج را $E_a = 30/243 \text{ kW/kg}$ (۲۰۰۶) طغرل تعیین شد. $22/43$ کیلوژول بر مول عنوان کرد (۱۳).
مدل‌سازی فرآیند خشک شدن رزماری در پرتوهای مادون قرمز: با توجه به شاخص‌های ارزیابی، مدل

1. Verma et al.



شکل ۳- نمودار لگاریتم طبیعی ضرایب نفوذ موثر، به پارامتر نسبت m/p

Figure 3. Natural logarithmic graph of effective diffusion coefficients against mass ratio to radiation power

جدول ۲- مدل‌های پیشنهادی برای خشک کردن رزماری در توان‌های مورد بررسی

Table 2. Suggested models of rosemary drying for the applied radiation powers

توان تابش Power	نام مدل Model name	معادله Equation	RMSE	R ² -adj
100	Verma et al	MR= -0.0805* exp (-0.2504 t) + 1.0805 * exp (-0.03006 t)	0.006	0.999
200	Midilli	MR= 0.9683 * exp (-0.0183 t 1.458) -0.0005922 t	0.011	0.998
300	Midilli	MR= 0.9757 * exp (0.0204 t 1.725) -0.004041 t	0.009	0.999

خشک کردن رزماری $30/243 \text{ kW/kg}$ تعیین شد و در نهایت، مدل میدیلی برای توان‌های ۲۰۰ و ۳۰۰ وات و مدل ورما و همکاران، برای توان ۱۰۰ وات، به دلیل بالا بودن شاخص ضریب همبستگی و پایین بودن خطای استاندارد، جهت بررسی سیتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن، مناسبترین مدل‌ها تشخیص داده شد.

نتیجه‌گیری

مشاهدات نشان داد که افزایش توان مادون قرمز از ۱۰۰ وات به ۳۰۰ وات در خشک کردن رزماری، باعث افزایش ضریب نفوذ از $3/33 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $1/907 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ می‌شود که افزایش سرعت خشک کردن را در پی دارد. میزان انرژی فعال‌سازی برای

منابع

- Arslan, D., and Özcan, M.M. 2008. Evaluation of drying methods with respect to drying kinetics, mineral content and colour characteristics of rosemary leaves. *Energy Conversion and Management*. 49: 5.1258-1264.
- Corzo, O., Bracho, N., Pereira, A., and Vásquez, A. 2008. Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. *LWT-Food Science and Technology*. 41: 10.2023-2028.
- Doymaz, I. 2007. Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food engineering*. 78:4. 1291-1297.
- Doymaz, I. 2013. Determination of infrared drying characteristics and modelling of drying behaviour of carrot pomace. *Journal of agricultural sciences*. 19: 1. 44-53.
- Giri, S.K., and Prasad, S. 2007. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. *Journal of food engineering*. 78: 2.512-521.
- Henderson, S.M. 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE*. 17: 6. 1167-1168.
- Lenart, A. 1996. Osmo-convective drying of fruits and vegetables: technology and

- application. *Drying technology*.14: 2.391-413.
8. Midilli, A., Kucuk H., and Yapar, Z. 2002. A new model for single-layer drying. *Drying technology*.20: 7.1503-1513.
 9. Pan, Z., and Atungulu, G.G. 2010. *Infrared heating for food and agricultural processing*: CRC Press.
 10. Rayaguru K, and Routray W. 2011. Microwave drying kinetics and quality characteristics of aromatic Pandanus amaryllifolius leaves. *International Food Research Journal*. 18:3.
 11. Sharma, G., Verma, R., and Pathare, P. 2005. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of food engineering*.71: 3.282-6.
 12. Singh, B., and Gupta, A. 2007. Mass transfer kinetics and determination of effective diffusivity during convective dehydration of pre-osmosed carrot cubes. *Journal of Food Engineering*.79: 2.459-70.
 13. Toğrul, H. 2006. Suitable drying model for infrared drying of carrot. *Journal of food engineering*. 77: 3.610-9.
 14. Verma, L.R., Bucklin, R., Endan, J., and Wratten, F. 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*.28:1.296-0301.
 15. Wang, C.Y., and Singh, R.P. 1978. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. Paper- American Society of Agricultural Engineers. 11: 6.668-672.
 16. Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J., and Hu, X. 2007. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*, 40: 1.39-46.
 17. Yildiz, O., and Ertekin, C. 2001. Thin layer solar drying of some different vegetables. *Drying Technology-An International Journal*. 19: 583-96.
 18. Zhang, Q., and Litchfield, J. 1991. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology*. 9: 2.383-95.
 19. Zhu, Y., Pan, Z., McHugh, T.H., and Barrett, D.M. 2010. Processing and quality characteristics of apple slices processed under simultaneous infrared dry-blanching and dehydration with intermittent heating. *Journal of food engineering*. 97: 1.8-16.

Modeling Kinetics of Rosemary Drying (*Rosmarinus officinalis* L.) Using Infrared

Seyyed Sajad Hosseini, Mahdi Kashani-nejad*, Habibollah Mirzaei,
Yahya Maghsoudlou

Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and
Natural Resources, Golestan, Iran

Received: 2019/02/25; Accepted: 2019/08/25

Abstract

Background Rosemary, an evergreen and aromatic plant of the mint family, has many antioxidants and medicinal properties. Nowadays, drying of plants is the most common way to increase the quantity of extraction and improve the quality of essential oil. Thus, new methods for drying of plants containing essential oil have been studied. Different types of dehydration methods including hot air, microwave, microwave-vacuum, sun and freeze drying were applied for rosemary by numerous researchers. However, although IR drying has been applied for many agricultural products, there is no report for rosemary. Therefore, the aim of this study was to investigate the drying kinetics of rosemary leaves with infrared.

Materials and Methods: Fresh rosemary leaves were dried using infrared spectrum (100, 200 and 300 watts). Then, using eight known models for drying process, the modeling was performed in MATLAB 2016 software.

Results: Owing to high correlation coefficient index and low standard error, Midilli model for the power of 200 and 300 watts and Verma model for the power of 100 watts, were two suitable models for evaluation of drying kinetic and prediction of drying process.

Conclusion: The midilli and the verma were two most fitted models for kinetic prediction of rosemary drying with IR.

Keywords: Rosemary, Drying, Modeling, Infrared radiation

*Corresponding author; kashaninejad@yahoo.com

