تعیین مناسب‌ترین مدل ریاضی نسبت رطوبتی برای خشک کردن نعناع با استفاده از خشک‌کن خورشیدی

لیلا بهبهانی*[۱]، جعفر حبیبی‌اصل[۲]، آذرخش عزیزی[۳]

[۱] کارشناس محقق بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.

[۲] استادیار پژوهش بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.

[۳] مربی پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.

*نویسنده مسئول: *leila_behbahani@yahoo.com*

چکیده

انرژی خورشیدی به علت دارا بودن ویژگی‌های نظیر فراوان بودن، در دسترس بودن، تمیز و ارزان بودن از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. خشک کردن محصولات کشاورزی یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های جهت نگهداری مواد غذایی می‌باشد و با اهدافی نظیر ذخیره و نگهداری، کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و تولید افزودنی‌های غذایی صورت می‌پذیرد. لذا، به‌منظور بهره‌گیری از منابع انرژی پاک، کاهش ضایعات گیاهان و افزایش سطح درآمد سبزی‌کاران، در این پژوهش، یک خشک‌کن خورشیدی با خشک کردن سبزی نعناع تحت سه تراکم ۲، ۳ و ۴ کیلوگرم بر مترمربع به روش‌های همرفت طبیعی و اجباری ارزیابی و با روش سنتی (خشک کردن در سایه و هوای آزاد) مقایسه گردید. مناسب‌ترین مدل ریاضی برای نرخ خشک‌شدن سبزی نعناع در شرایط خوزستان تعیین گردید. بر اساس نتایج به دست آمده مدل Midilli و همکاران (۲۰۰۲) جهت تعیین مشخصات لایه‌های در حال خشک شدن نعناع در تراکم‌های مختلف و در حالت‌های خشک شدن به روش‌های همرفت طبیعی و اجباری، بهترین مدل شناخته شد.

***کلمات کلیدی:* خشک‌کن خورشیدی، نسبت رطوبتی، نعناع، همرفت اجباری، همرفت طبیعی و مدل ریاضی**

مقدمه

در استان خوزستان با توجه به بالا بودن روزهای آفتابی در سال و نیز رطوبت کم و پایین بودن ارتفاع بسیاری از نقاط به نظر می‌رسد که انرژی خورشیدی می‌تواند در خشک کردن محصولات کشاورزی جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی باشد و لازم است در زمینه راه‌های استفاده از آن تحقیق و مطالعه بیشتری صورت گیرد. در استان خوزستان سالانه هزاران تن انواع سبزیجات تولید می‌گردد که اغلب به‌صورت تازه و با قیمت پایین به بازار عرضه شده و به دلیل عمر انباری کم، ضایعات بالایی دارند. روش سنتی خشک کردن سبزیجات که شامل گسترانیدن محصول در سطحی وسیع بر زمین در معرض نور مستقیم خورشید است، نیز با مشکلاتی از قبیل عدم یکنواختی خشک شدن، آلوده شدن محصول به گرد و غبار و حشرات و آسیب دیدن و حتی از بین رفتن آن در اثر بارندگی‌های ناگهانی همراه است. همچنین تابش مستقیم به کیفیت برخی از محصولات آسیب می‌رساند. باقری و همکاران در سال ۱۳۸۸ پارامترهای مؤثر بر خشک شدن سبزی‌های برگی در یک خشک‌کن خورشیدی همرفت اجباری را مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق محصول نعناع به ارتفاع ۵ سانتی‌متر روی سینی‌های محفظه خشک‌کن قرار داده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که انرژی تابشی در صفحه جمع کننده، انرژی حرارتی جذب شده در جمع کننده و انرژی لازم برای خشک شدن محصول رابطه مستقیم و خطی با دما دارند. حداکثر و حداقل بازده انرژی در آزمایش‌ها به ترتیب

۴۹ و ۱۴/۷ درصد بود. همچنین منحنی خشک شدن محصول به‌صورت مدل نمایی با رابطه Mwb=1.827e-0.4857t و R2=0.945 به دست آمد. مرادی و زمردیان در سال ۲۰۰۹ مناسب‌ترین مدل ریاضی را برای خشک کردن زیره سبز در حالت تابش غیرمستقیم در یک خشک‌کن خورشیدی فعال (همرفت اجباری) تعیین کردند. آزمایش‌ها با خشک کردن لایه نازک (۱۰ میلی‌متر) زیره سبز با رطوبت اولیه ۴۳/۵ درصد و رساندن آن‌ها تا رطوبت ۸ درصد تحت سه جریان هوای ۰/۰۰۴ ، ۰/۰۰۶ و ۰/۰۰۷ مترمکعب بر ثانیه صورت گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌ها با یازده مدل مختلف تطبیق داده شدند و از میان آن‌ها مدل Midilli و همکاران (۲۰۰۲) به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. همانطوری‌که تحقیقات مختلف نشان داده‌اند، خشک کردن با خشک‌کن‌های خورشیدی نه‌تنها کم‌هزینه و به‌صرفه می‌باشد، بلکه محصولات خشک شده با این روش دارای کیفیت بالاتر و بهداشتی‌تر است. بهره‌وری بالاتر از انرژی خورشیدی در خشک کردن یک محصول خاص، مستلزم استفاده از روش و سیستم‌های مناسب برای شرایط اقلیمی در هر منطقه می‌باشد. از طرفی دانستن نرخ خشک شدن یک محصول خاص در یک خشک‌کن، در تعیین زمان مورد نیاز برای خشک شدن آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این کار نیز مستلزم به دست آوردن مدل ریاضی مناسب خشک‌کنی محصول مورد نظر می‌باشد.لذا به‌منظور استفاده بهینه با بهره‌وری بالاتر از مزایای انرژی خورشیدی در خشک کردن نعناع که جزء سبزیجات مهم در استان خوزستان به‌حساب می‌آید.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش مقایسه دو حالت همرفت طبیعی و همرفت اجباری در خشک‌کن خورشیدی و روش سنتی خشک کردن در سایه (تیمار شاهد)، برای خشک کردن سبزی نعناع روی سینی‌های خشک‌کنی تحت سه تراکم ۲، ۳ و ۴ کیلوگرم بر مترمربع ارزیابی شد. در کلیه تیمارها، محصول خشک شونده تا زمانی که رطوبت درونی آن به رطوبت به نقطه تعادل رطوبتی در شرایط دمایی و رطوبتی خشک‌کن رسید، خشک شد. زمان خشک کردن در هر روش، از موقع قرار دادن نعناع تازه در معرض خشک شدن تا موقعی که رطوبت درونی آن تغییر نکرده و ثابت بماند، اندازه‌گیری شد. به این منظور سه عدد نمونه نعناع با جرم مشخص در سبدهای کوچک نمونه‌گیری در نقاط مختلف هر سینی قرار داده شد. سپس در طی عملیات خشک کردن، هر نیم ساعت یک بار این نمونه‌ها با ترازوی دیجیتالی و با دقت ۰/۰۱ گرم وزن می‌شدند.

برای تعیین مناسب‌ترین رابطه بین تغییرات نسبت رطوبتی محصول خشک شده به زمان خشک شدن محصول، پنج مدل ریاضی مناسب خشک کردن محصولات با لایه نازک از میان مدل‌های استاندارد ارائه شده در مقالات معتبر دنیا مطابق جدول ۱ انتخاب شدند. نسبت رطوبتی با استفاده از داده‌های به دست آمده از آزمایشات عملی مطابق رابطه زیر محاسبه گردید:

$$MR = \frac{(M - M_e)}{(M_0 - M_e)}$$

که در آن M محتوای رطوبت محصول، Me رطوبت تعادلی محصول و M0 رطوبت اولیه محصول می‌باشند. پس از محاسبه نسبت‌های رطوبتی در هر تیمار آزمایشی، هر نسبت با پارامتر زمان مربوط به خود یک جفت داده را تشکیل دادند. این جفت داده‌ها در پنج مدل (جدول ۱) قرار داده شده و با استفاده از نرم‌افزار Curve Expert ضرایب مربوطه تعیین گردید. مدل‌ها بر اساس RMSE، $\chi 2$ و R2 مقایسه شدند. مناسب‌ترین مدل، مدلی بود که $\chi 2$ و RMSE کمتر و R2 بیشتری داشت.

جدول ۱- مدل‌های ریاضی برای خشک کردن محصولات با لایه نازک

شماره مدل	نام مدل	معادله مدل
۱	Newton	$MR = \exp(-kt)$
۲	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
۳	Henderson-Pabis	$MR = a.\exp(-kt)$
۴	Wang and Singh	$MR = 1+ at + bt^2$
۵	Midilli *et al.*	$MR = a.\exp(-kt^n) + bt$

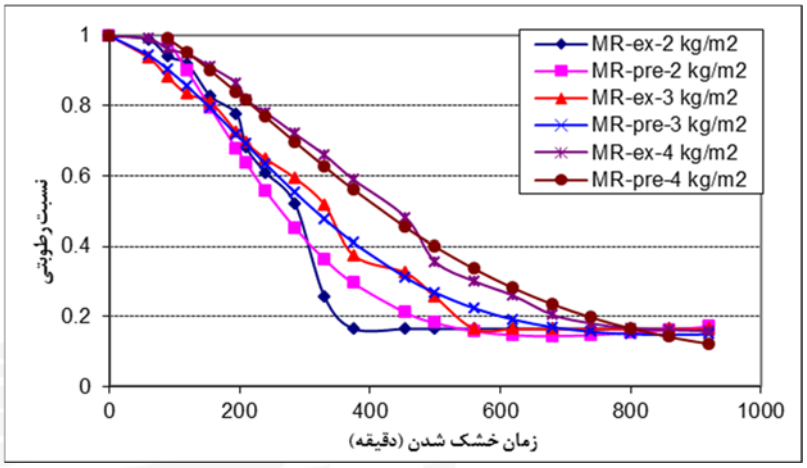
نتایج و بحث

مقایسه تیمارهای مختلف نشان داد که در نتیجه‌ی استفاده از خشک‌کن خورشیدی در مقایسه با روش خشک کردن در سایه، زمان خشک شدن محصول ۳ تا ۸ برابر کاهش یافت. زمان مورد نیاز برای خشک شدن سبزی نعناع در خشک‌کن خورشیدی در تیمارهای مختلف با توجه به تراکم محصول و روش خشک‌کنی ۳/۵ تا ۱۵/۳ ساعت به طول انجامید. این در حالی است که در روش سنتی این زمان حدود ۵ روز طول کشید. در جدول ۲ زمان مورد نیاز برای خشک شدن سبزی نعناع در تیمارهای مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، زمان مورد نیاز برای خشک شدن سبزی نعناع در خشک‌کن خورشیدی به روش همرفت طبیعی و اجباری بسته به تراکم محصول در سینی‌ها، به ترتیب ۶/۲۵ تا ۱۵/۳ و ۳/۵ تا ۱۰ ساعت به طول انجامید.

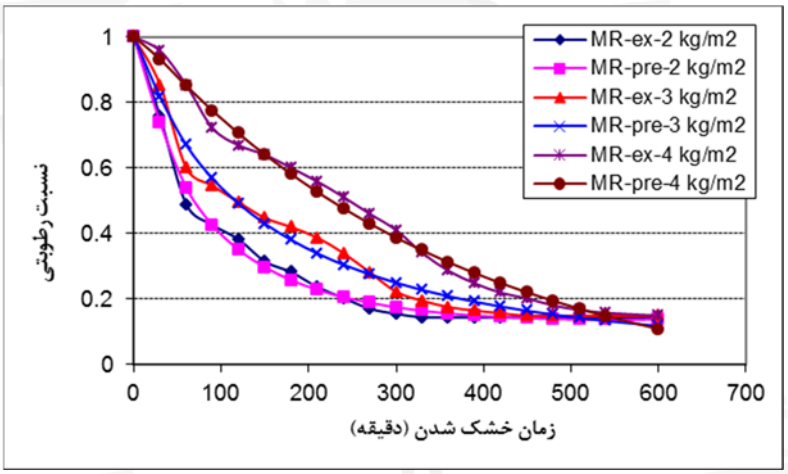
جدول ۲– میانگین زمان‌های خشک شدن نعناع (به ساعت) در تیمارهای مختلف خشک‌کن خورشیدی به هر دو روش همرفت طبیعی و اجباری

روش خشک کردن		تراکم محصول (kg/m^2)			میانگین
		۲	۳	۴	
همرفت طبیعی	سینی ۱	۶/۲۵	۶/۷	۹/۳	۷/۴۲
	سینی ۲	۷/۶	۸/۳	۱۰/۵	۸/۸
	سینی ۳	۸/۳	۹/۳	۱۵/۳	۱۰/۹۷
	میانگین	۷/۳۸	۸/۱	۱۱/۷	۹/۰۶
همرفت اجباری	سینی ۱	۳/۵	۵	۷	۵/۱۷
	سینی ۲	۴/۵	۶	۸/۳	۶/۲۷
	سینی ۳	۵/۵	۷/۵	۱۰	۷/۶۷
	میانگین	۴/۵	۶/۱۷	۸/۴۳	۶/۳۷

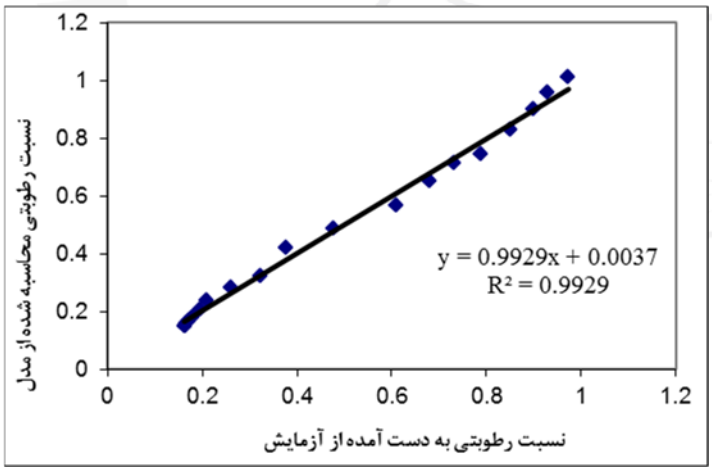
بر اساس نتایج به دست آمده از محاسبه RMSE، $\chi 2$ و R2 با استفاده از نرم‌افزار Curve Expert، مدل Midilli و همکاران (۲۰۰۲) جهت تعیین مشخصات لایه‌های در حال خشک شدن نعناع در تراکم‌های مختلف و در حالت‌های خشک شدن به روش‌های همرفت طبیعی و اجباری، بهترین مدل شناخته شد. شکل‌های ۱ و ۲ تغییرات نسبت رطوبتی به دست آمده از آزمایش و مدل Midilli و همکاران (۲۰۰۲) در برابر زمان خشک شدن در سه تراکم مختلف نعناع به ترتیب برای روش‌های همرفت طبیعی و اجباری را نشان می‌دهند. در شکل‌های ۳ و ۴ نیز تطابق در دو محور افقی و عمودی نشان داده شده است. شیب خط‌های معادلات رگرسیونی شکل‌های ۳ و ۴ برای همرفت طبیعی و اجباری به ترتیب ۴۴/۷۹ و ۴۴/۶۶ درجه می‌باشد که نشان دهنده تطابق بالای داده‌های آزمایشی و داده‌های به‌دست آمده از مدل است.



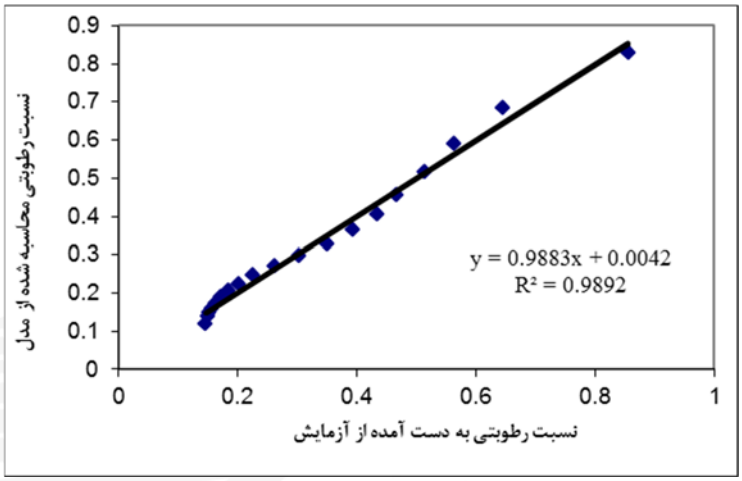
شکل ۱- تغییرات نسبت رطوبتی به دست آمده از آزمایش و مدل Midilli در برابر زمان خشک شدن در سه تراکم مختلف نعناع خشک شده به روش همرفت طبیعی



شکل ۲- تغییرات نسبت رطوبتی به دست آمده از آزمایش و مدل Midilli در برابر زمان خشک شدن در سه تراکم مختلف نعناع خشک شده به روش همرفت اجباری



شکل ۳- میزان تطابق نسبت‌های رطوبتی به دست آمده از آزمایش همرفت طبیعی و مدل کردن



شکل ۴- میزان تطابق نسبت‌های رطوبتی به دست آمده از آزمایش همرفت اجباری و مدل کردن

منابع

Bagheri N.*,Keyhani A.R.,Mohtasebi S.S.,Aimardani R.2010. Monitoring effective parameters of drying leafy vegetables in a forced-convection solar dryer. Journal of Agricultural Engineering Research , Volume 10 , Number 4; Page(s) 73 To 88.

Moradi, Mehdi and Ali Zomorodian, 2009,Select the most appropriate mathematical model for drying cumin indirect exposure mode, the fifth National Congress of Agricultural Engineering and Mechanisation, Mashhad, the Association of Agricultural Machinery Engineering and Mechanization Iran, Ferdowsi University of Mashhad, http : //www.civilica.com/Paper-NCAMEM05-NCAMEM05_008.html

Midilli A, Kucuk H, Yapar Z (2002) A new model for single layer drying. Dry Technol l20 (7):1503-1513.

Determining the Best Mathematical Model of Moisture Ratio for Mint Drying by Using Solar Dryer

Leila Behbahani[1]*, Jafar Habibiasl[2], Azarakhsh Azizi[3]
[1] Researcher of Agricultural Engineering research Department, Khuzestan Agricultural and natural resources Research and Education Centre, AREEO, Ahwaz, Iran.
[2] Assistant professor of Agricultural Engineering research Department, Khuzestan Agricultural and natural resources Research and Education Centre, AREEO, Ahwaz, Iran.
[3] Research Instructor of Agricultural Engineering research Department, Khuzestan Agricultural and natural resources Research and Education Centre, AREEO, Ahwaz, Iran.
Corresponding author: leila_behbahani@yahoo.com

Abstract

Solar energy due to its properties such as plentiful, available, cheap and clean has especial place. Drying is a common technique for preservation of food and other products; including fruits and vegetables. The major advantage of drying food products is the reduction of moisture content to a safe level that allows extending the shelf life of dried products, reduce transportation cost and production of food additives. Therefore, to utilize renewable energy sources, reduce vegetable losses and increase farmers income, in current project a cabinet solar dryer has been evaluated by drying mint leaves in three levels of mass density of 2, 3, and 4 kg/m^2 at two drying manner of natural and forced convection and compared with traditional method. According to obtained results, Midilli model was selected as the best model to represent the thin layers, natural and forced convection solar drying behavior of mint leaves.

***Keywords*: Solar dryers, Drying rate, Mint, Forced convection, Natural convection, Mathematical models.**