

بررسی مدل سازی ریاضی، سینتیک و انرژی مصرفی خشک کردن ژل آلونته ورا در خشک کن هوای گرم با قابلیت بازگردش هوای خروجی

محمد اسماعیلی ادبی^{۱*}، سید رضا موسوی سیدی^۲، داود کلانتری^۲، بابک قوامی عدل^۱

۱- گروه فیزیک-واحد شهر قدس-دانشگاه آزاد اسلامی-تهران-ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

(تاریخ دریافت: ۹۳/۶/۹ تاریخ پذیرش: ۹۳/۸/۴)

چکیده

در این تحقیق به بررسی مدل سازی ریاضی فرآیند و سینتیک خشک شدن و انرژی مصرفی در خشک کن جریان هوای گرم با چرخه هوای بازگشتی (۰، ۵۰٪، ۷۵٪) پرداخته شده است. برای این منظور از یک خشک کن جریان هوای گرم با قابلیت بازگردش هوای خروجی استفاده شد. برای برازش مدل های استاندارد خشک شدن لایه نازک با داده های آزمایشی، از محیط برازش منحنی های نرم افزار MATLAB 2007 استفاده گردید. از ضریب تعیین (R^2)، مربع کای (χ^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به عنوان شاخص برای تعیین بهترین مدل استفاده شد. با مقایسه این شاخص ها مشخص شد که مدل میدیلی مناسبترین مدل برای توصیف داده های آزمایشگاهی است. انرژی مصرفی در سرعت ۰/۵ m/s و دمای هوای ۶۰ درجه سلسیوس برای سطوح ۰/۰، ۵۰٪ و ۷۵٪ هوای بازگشتی کمینه و در سرعت هوای ۱/۵ m/s و دمای هوای ۴۰ درجه سلسیوس برای سطوح ۰/۰، ۵۰٪ و ۷۵٪ هوای بازگشتی بیشینه می باشد. همچنین بکارگیری سامانه بازگردشی هوای گرم سبب کاهش انرژی مصرفی و افزایش زمان خشک شدن در خشک کردن گیاه آلونته ورا گردید.

کلید واژگان: خشک کردن، آلونته ورا، مدل سازی ریاضی، انرژی مصرفی

* مسئول مکاتبات: m.esmailiadabi@shahryariau.ac.ir

۱- مقدمه

الوئه ورا شامل ۱۰-۲۰٪ پلی‌ساکارید، حدود ۲۷٪ قند محلول، حدود ۹٪ پروتئین، حدود ۵٪ چربی، حدود ۲۳٪ خاکستر و تقریباً ۳/۵-۴٪ کلسیم، سدیم و پتاسیم از کل ماده خشک را شامل می‌شوند. این گیاه دارای برگهای ضخیم، براق و آبداری است که با خارهایی احاطه شده اند. گیاه آلوئه ورا حاوی ژلی می‌باشد که بصورت سستی توسط مردم به عنوان یک گیاه داروئی مورد استفاده قرار می‌گیرد که این خاصیت به علت دارا بودن ترکیبات شفا بخشی است که منجر به ایجاد خصوصیات مفید در گیاه می‌گردد. این ژل حاوی مقادیر زیادی ترکیبات موسیلاژ و یا لعاب می‌باشد که از گالاکتورونیک و گلوکورونیک اسید تشکیل شده که با قندهایی مانند گلوکز، گالاکتوز و آرابینوز متصل شده اند.

مدت زمان ذخیره مواد غذایی و گیاهان داروئی از جمله آلوئه ورا تابع دو عامل فیزیکی دما و مقدار رطوبت محصول می‌باشد. با کاهش دما، کاهش رطوبت و یا هر دو، می‌توان به میزان قابل ملاحظه‌ای زمان این دوره را افزایش داد. خشک کردن به عنوان یک عملیات بسیار مهم برای از بین بردن رطوبت و یا کاهش محتوای رطوبتی به سطح مورد نظر از طریق فرایند انتشار رطوبت و تبخیر آن از سطح ماده در حال خشک شدن، شناخته شده است. در عین حال فرآیند خشک کردن، به عنوان یکی از قدیمی ترین و رایج ترین روش نگهداری مواد غذایی شناخته می‌شود. استفاده از آن در طی چند قرن، به بخش‌های مختلف اعم از صنایع داروئی و صنایع چوب گسترش داده شده است. در این راستا توسعه مدل مناسب برای مطالعه رفتار فرآیندهای خشک شدن و پدیده های انتشار، از جمله انتشار رطوبت و تبخیر، از اهمیت بالایی برخوردار است. مدل‌های توسعه یافته در فرآیند خشک کردن برای طراحی سیستم‌های جدید خشک‌کن، انتخاب مجموعه‌ای از شرایط بهینه فرآیند خشک کردن و برای پیش بینی دقیق پدیده انتقال همزمان جرم و حرارت در طول زمان خشک کردن استفاده می‌شود [۱].

مدل‌های ریاضی می‌توانند ابزارهایی مفید برای پیش بینی سیتیک خشک کردن محصولات کشاورزی، مواد غذایی و مواد زیستی با منشاء حساس به حرارت باشند [۲]. برای تعیین مدل مناسب در فرآیند خشک کردن، منحنی‌های خشک کردن می‌توانند تحت شرایط داده شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند [۳]. اصل فرآیند مدل‌سازی بر اساس داشتن مجموعه‌ای

از معادلات ریاضی دقیق و ساده‌ای می‌باشد که می‌تواند کارکرد یا پروسه‌ای را با دقت بالا توصیف کند [۴]. مدل‌های جامع از معادلات همزمان انتقال جرم و حرارت همراه با متغیرهای خواص مواد غذایی، چروکیدگی و... که معادلات آن‌ها دارای یک سیستم غیر خطی درجه دو، همراه با معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی است، استفاده می‌کنند [۴].

برای هر دستگاه خشک‌کن، تولید، هدف و روش با توجه شرایط خشک کردن مانند درجه حرارت محفظه خشک‌کن، فشار، سرعت باد (اگر گاز حامل انرژی هوا باشد)، رطوبت نسبی و کیفیت نگهداری محصول با توجه به تغذیه محصول مشخص می‌شود [۵].

خشک کردن یک فرآیند با مصرف انرژی بالاست که حدود ۱۲٪ مصرف انرژی در جهان صرف آن می‌گردد. افزایش در قیمت سوخت منجر به افزایش هزینه‌های خشک کردن محصولات کشاورزی شده است. هوای خروجی از خشک‌کن‌ها دارای دمای بالاتر از دمای محیط است در حالیکه هنوز از رطوبت اشباع نشده است. در نتیجه مقدار زیادی انرژی از بین می‌رود. تحقیقات نشان می‌دهد که انرژی هوای خروجی از خشک‌کن‌ها بین ۷۰ تا ۱۷۴ کیلوکالری بر هرکیلوگرم آب تبخیر شده از محصول می‌باشد. به همین منظور تلاش‌هایی در جهت کاهش مصرف انرژی در خشک‌کن‌های هوای گرم صورت گرفته است. بازگرداندن بخشی از هوای خروجی از مخزن خشک‌کن به ورودی آن و استفاده از این هوا در فرآیند خشک کردن یکی از این موارد است [۶]. در صورت استفاده مجدد از هوای خروجی خشک‌کن می‌توان حدود ۷۰ تا ۹۰٪ در مصرف انرژی صرفه‌جویی نمود [۷]. اما به دلیل افزایش رطوبت هوای ورودی، گرادپان رطوبت در سطح دانه کاهش یافته، در نتیجه آن نرخ از دست دادن رطوبت کاهش یافته و زمان خشک شدن افزایش می‌یابد [۸]. با توجه به بررسی منابع، نظر به غنی بودن فلور گیاهان داروئی در کشور، به واسطه گستردگی و تنوع وضعیت جغرافیایی و وجود تجارت بالینی گذشته در این زمینه و نیز افزایش تقاضای بازارهای داخلی و خارجی در ارتباط با آن و همچنین رویکرد جدید جهانی به این زمینه تحقیقاتی و از سوی دیگر توجه وزارت بهداشت در تولید انواع داروها بر پایه مشتقات گیاهی، ضرورت تحقیق و توجه به فناوری پس از برداشت گیاهان داروئی بیش از پیش آشکار می‌شود. در کشور ما به دلیل

نمونه‌ها پس از ۴ ساعت توزین شدند. بعد از این مرحله، عمل توزین مجدد در فواصل زمانی یک ساعت انجام گردید. این عملیات تا آنجا ادامه یافت که اختلاف وزنی بین دو توزین متوالی مشاهده نشد [۱۷].

آزمایشات با خشک‌کن جریان هوای گرم در ۳ سطح دمایی (۴۰، ۵۰، ۶۰ درجه سلسیوس) و ۳ سطح بازگشت هوا (۰، ۵۰ و ۷۵ درصد و سرعت جریان هوای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه در ۳ تکرار انجام شد. برای انجام آزمایشات نمونه‌ها به صورت یک لایه محصول روی محفظه خشک‌کن قرار داده می‌شد. نمونه‌ها به صورت قطعات مکعب مستطیل به ضخامت یک سانتی متر و همچنین طول و عرض ۲ سانتی متر برش داده شد. برای انجام این کار ابتدا برگ‌های آلونته ورا توسط چاقو بریده می‌شد و فیله ژل به صورت کامل از آن استخراج و بعد از آن به صورت لایه‌های مکعبی شکل بریده می‌شد و برای انجام آزمایشات بر روی صفحه مشبکی خشک‌کن قرار داده می‌شد.

مدل سازی فرآیند خشک کردن

در فرآیند حذف رطوبت، پارامترهای مختلفی بر زمان خشک شدن تأثیری گذارند که عبارتند از: دما و سرعت هوای ورودی (از پارامترهای خشک‌کن)، نوع محصول، میزان رطوبت اولیه و شرایط آماده سازی محصول برای ورود به خشک‌کن [۱۸].
اصل مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی، غذایی و داورویی منطبق کردن معادله های ریاضی بر فرآیند خشک کردن است که می تواند به اندازه کافی خصوصیات سیستم را بیان کند.

فرآوری سنتی و پایین بودن سطح فناوری، هزینه تولید افزایش پیدا کرده و از سوی دیگر گیاه کیفیت ظاهری خود را طی فرآیند خشک کردن و دوره انبارداری، به طور قابل ملاحظه ای از دست می دهد که این مساله به طور جدی بر مصرف و صادرات آن تاثیر گذار است [۹]. علاوه بر آن در زمینه خشک کردن لایه نازک محصولات کشاورزی، مدلسازی، استخراج منحنی سینتیک خشک شدن آن‌ها تحقیقات فراوانی صورت گرفته است. مطالعاتی که در زمینه خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از بازگردش هوای گرم انجام شده عبارتند از خشک کردن ذرت [۱۰ و ۱۱]، سویا [۱۲]، غلات [۱۳]، چای [۱۴]، لوگان [۱۵]، برنج [۱۶] سبزیجات [۶] و....

با بررسی منابع مشخص شده است که تحقیقات بسیار کمی در مورد خشک کردن گیاهان دارویی با خشک کن بازگردشی انجام شده است. لذا موضوع این تحقیق به بررسی فرآیند خشک کردن گیاه دارویی آلونته ورا با استفاده از درصدهای مختلف بازگردش جریان هوای گرم پرداخته شده است.

۲- مواد و روشها

گیاه دارویی صبر زرد مورد استفاده در این تحقیق از کلکسیون گیاهان دارویی مرکز تحقیقات گیاهان دارویی جهاد دانشگاهی خریداری و در دمای ۵ درجه سلسیوس درون یخچال نگهداری شد. به منظور تعیین رطوبت اولیه، نمونه‌ها در اجاق تهویه‌دار قرار گرفت. وزن اولیه نمونه‌ها در هر ظرف ۱۵ گرم و تعداد ظرف‌ها ۵ عدد بود. این آزمایشها در ۵ تکرار انجام شد. دمای اجاق روی $105 \pm 1C^{\circ}$ درجه سلسیوس تنظیم شد و

جدول ۱ مدل‌های ریاضی مورد استفاده در این تحقیق

نام مدل	مدل ریاضی	منبع
Wang and Singh	$MR = at^2 + bt + c$	[۱۹]
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[۲۰]
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	[۱۹]
Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$	[۱۹]
Approximation of diffusion page	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	[۲۰]
Two-term model	$MR = \exp(-kt^n)$	[۲۱]
Newton	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	[۲۱]
Simplified Fick's diffusion	$MR = \exp(-kt)$	[۱۹]
Modified Page equation-II	$MR = a \exp(-c(t/L^2))$	[۲۰]
Midilli et al.	$MR = \exp(-c(t/L^2)^n)$	[۲۰]
	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[۲۲]

روش اجرایی که بدین منظور به کار می‌رود، بهینه‌سازی نامیده می‌شود. روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری است که جهت توسعه، پیشبرد و بهینه‌سازی فرایندهایی به کار می‌رود که در آن‌ها سطح مورد نظر تحت تاثیر متغیرهای بسیاری قرار داشته و هدف، بهینه کردن پاسخ مزبور است. روش سطح پاسخ کاربرد قابل توجهی در طرح‌ریزی توسعه، تعیین رابطه برای محصولات جدید و همچنین ارتقای طراحی محصولات موجود دارد. این روش‌شناسی تجربه‌ای، علاوه بر آنالیز تاثیرات متغیرهای مستقل، یک مدل ریاضی را نیز که توضیح دهنده فرایندهای شیمیایی و بیوشیمیایی است، در اختیار پژوهشگر قرار می‌دهد. روش سطح پاسخ در این پژوهش برای پیدا کردن نقطه بهینه فرآیند (زمان و انرژی) مورد استفاده قرار گرفت. برای بهینه‌یابی و تحلیل داده‌ها، به دلیل نبود محدودیت در انتخاب سطوح متغیرهای مستقل از روش CCD استفاده شد. در انتها با انتخاب وزن‌دهی‌های مناسب و دامنه تغییرات متناسب با آزمایش انجام شده، نقطه بهینه فرآیند پیدا شد و با تکرار آزمایش در نقطه پیشنهادی، مقدار آن تأیید گردید. نرم افزارهای مورد استفاده در تحلیل داده‌ها به روش سطح پاسخ، Design Expert7 بوده است.

۳- نتایج و بحث

در این تحقیق دمای هوا در سه سطح (۴۰، ۵۰ و ۶۰°C) و سرعت جریان هوا در سه سطح (۰/۵، ۱، ۱/۵ متر بر ثانیه) استفاده شد. به منظور جلوگیری از وارد آمدن صدمات به بافت محصولات کشاورزی و به خصوص گیاهان دارویی حداکثر دما جهت خشک کردن آن‌ها ۶۰°C توصیه شده است [۸]. لذا حداکثر سطح دمایی انتخاب شده در این تحقیق ۶۰°C بود. اکثر محققان از سرعت‌های کمتر از ۲ m/s در خشک‌کن‌های هوای داغ استفاده کرده‌اند. نتایج حاصل از آزمایشات (شکل ۱، ۲ و ۳) نشان می‌دهد که بیشترین زمان خشک شدن در تیمار بدون بازگردش هوای گرم در دمای ۴۰°C و سرعت جریان هوای ۰/۵ m/s به مدت ۵۱۰ دقیقه و کمترین زمان خشک‌شدن مربوط دمای ۶۰°C و سرعت جریان هوای ۱ m/s به مدت ۶۰ دقیقه بود. همچنین بیشترین زمان خشک شدن در تیمار با بازگردش هوای ۵۰ و ۷۰ درصد جریان هوای گرم در دمای ۴۰°C و سرعت جریان هوای ۰/۵ m/s به ترتیب به مدت ۶۶۰ و ۷۱۰ دقیقه و کمترین زمان خشک‌شدن

در اکثر تحقیقات مدل‌های ریاضی حاکم بر فرآیند خشک شدن محصولات کشاورزی، غذایی و دارویی را بر اساس نسبت رطوبت (MR) بدست می‌آورند. نسبت رطوبت می‌تواند داده‌های بدست آمده را یکنواخت و یک دست تر نماید و از پراکندگی داده‌ها جلوگیری می‌نماید [۱۹ و ۲۳]. با داشتن رطوبت اولیه محصول و کاهش وزن آن، روند انتقال رطوبت و جرم در حین خشک‌شدن محصول از طریق رابطه (۱)، محاسبه می‌گردد [۲۴].

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

که در آن:

MR: نسبت رطوبت، M_t رطوبت محصول در هر لحظه بر پایه خشک، M_e رطوبت تعادلی، M_0 رطوبت اولیه محصول داده‌های جمع‌آوری شده توسط نرم‌افزار (MATLAB) تجزیه و تحلیل شده و ضرایب و شاخص‌های آماری (R^2 , χ^2 و RMSE) استخراج گردید.

انرژی مصرفی

مقدار انرژی مصرفی در یک جریان هوای گرم در حالت بدون بازگشت جریان هوا عبارت است از انرژی مصرفی برای موتور دمنده بعلاوه انرژی مصرفی برای افزایش دمای هوای ورودی [۲۵ و ۲۶]

$$E_{fc} = \left(Au\rho_a C_a \Delta T + \frac{u^3}{16} \cdot 6 \right) \times t$$

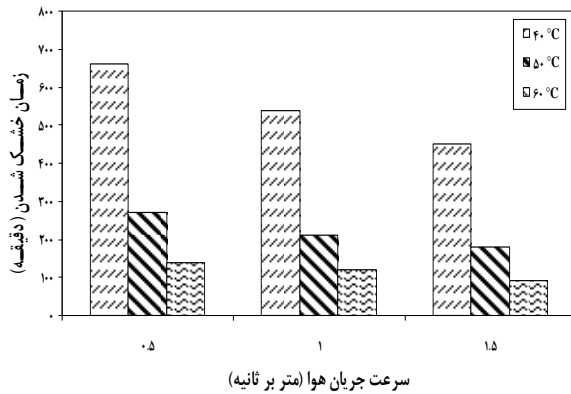
که در آن، A سطح مقطع خشک‌کن (m^2)، u سرعت هوای ورودی به محفظه خشک‌کن (m/s)، t زمان خشک شدن (h) و E_{fc} انرژی مصرفی برای افزایش دمای هوای ورودی خشک-کن (W.h) می‌باشد.

طی آزمایشات با بازگردش هوای خروجی پارمترهای مربوط به انرژی مصرفی مربوط به آزمایشات مختلف با استفاده از یک کنتور اندازه‌گیری می‌گردد. با استفاده از این کنتور مجموع میزان انرژی مصرفی توسط گرم‌کننده الکتریکی، دمنده و حسگرها اندازه‌گیری می‌گردد.

روش منحنی سطح پاسخ

بالا بردن قابلیت اجرایی و بازده سیستم‌ها در فرایندها بدون افزایش هزینه، مقوله‌ای است که بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

به رطوبت مورد نظر به دلیل افزایش رطوبت هوای داخل خشک‌کن و کاهش گرادیان رطوبتی میان سطح آلوئه ورا با هوای محیط اطراف خود، افزایش می‌یابد. این افزایش زمان خشک شدن با افزایش دما و سرعت هوای ورودی کاهش یافته است. دلیل این امر می‌توان تأثیر بالاتر گرادیان حرارتی در دماهای بالاتر نسبت به گرادیان رطوبتی دانست [۳۰].



شکل ۲ زمان خشک شدن آلوئه ورا تحت شرایط مختلف خشک شدن در حالت ۵۰٪ بازگردش جریان هوای گرم

مدل‌سازی و نتایج حاصل از برازش مدل‌ها

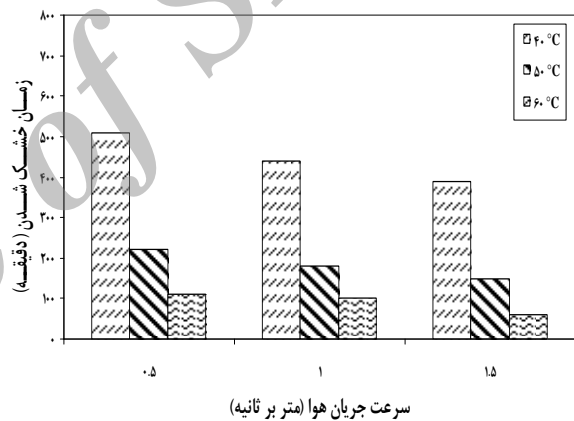
پس از بدست آوردن مقادیر نسبت رطوبت در دماها و سرعت-های مختلف خشک کردن، مدل‌های معرفی شده در جدول (۳-۱) بر متحنی‌های خشک شدن حاصل از داده‌های آزمایشی در حالت‌های مختلف بازگردش هوا برازش شدند.



شکل ۳ زمان خشک شدن آلوئه ورا تحت شرایط مختلف خشک شدن در حالت ۷۵٪ بازگردش جریان هوای گرم

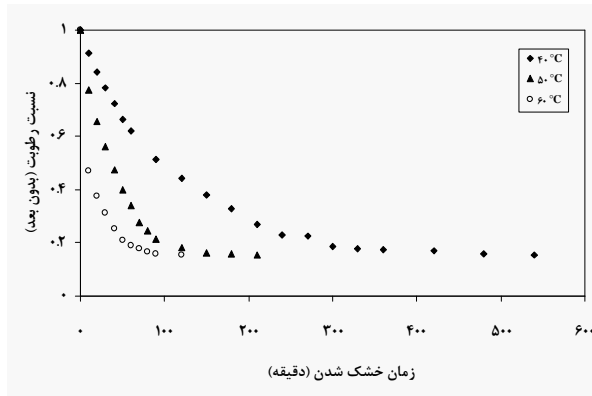
سپس مدل‌های خشک شدن لایه نازک با توجه به مقادیر R^2 و $RMSE$ ارزیابی شده و مدل بهتر بر اساس مقادیر بیشتر R^2 و مقادیر کمتر $RMSE$ انتخاب شد. نتایج حاصل از برازش

مربوط دمای 60°C و سرعت جریان هوای $1/5\text{ m/s}$ به ترتیب به مدت ۹۰ و ۱۱۰ دقیقه بود. همانطور که از اشکال ۱، ۲ و ۳ مشاهده می‌شود افزایش دما از یک طرف سبب افزایش ظرفیت جذب رطوبت هوا به دلیل افزایش اختلاف دما بین هوا و محصول شده و از طرف دیگر باعث گرم شدن سریعتر محصول و تبخیر بهتر آب از آن می‌شود و در نهایت باعث کاهش زمان خشک شدن می‌گردد. همچنین با افزایش سرعت جریان هوا (دبی هوا) به دلیل افزایش حجم هوای عبوری از روی محصول فشار بخار محیط کاهش می‌یابد و در نتیجه رطوبت محصول برای خروج از آن با مقاومت کمتری مواجه خواهد بود و با سرعت بیشتری از آن خارج می‌گردد. به عبارت دیگر ظرفیت هوا برای جذب رطوبت مواد بیشتر شده و آهنگ خشک شدن افزایش می‌یابد. محققان دیگر نتایج مشابهی را گزارش نموده اند [۲۷، ۲۸ و ۲۹].

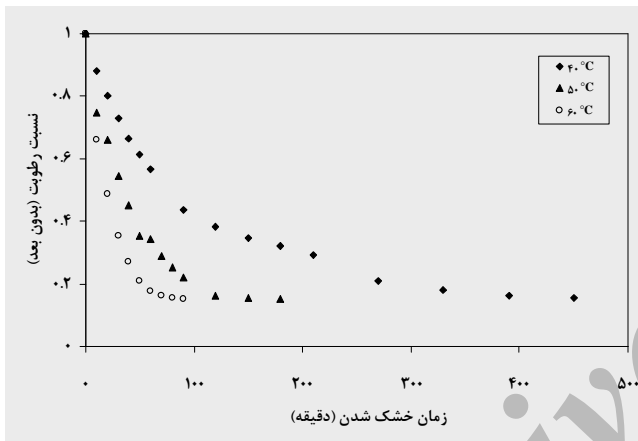


شکل ۱ زمان خشک شدن آلوئه ورا تحت شرایط مختلف خشک شدن در حالت بدون بازگردش

زمان خشک شدن آلوئه ورا با ۵۰٪ بازگشت هوای خروجی نسبت به حالت بدون بازگردش هوای خروجی افزایش یافت می‌یابد (مقایسه شکل ۱ و ۲). دلیل این امر آن است که در حالت بازگردش هوای خروجی مقداری از رطوبت محصول به همراه هوای بازگردش شده در چرخه خشک کردن باقی می‌ماند و از آنجا که دبی هوا برای خشک کردن محصول پایین است لذا میزان رطوبت هوای خروجی بالا می‌رود و فرآیند خشک شدن با شدت کمتری انجام می‌گردد و به دنبال آن زمان خشک شدن افزایش می‌یابد. همچنین با یک مقایسه ساده میان زمان خشک شدن برای ۷۵٪ و ۵۰٪ بازگردش هوا (شکل ۲ و ۳) می‌توان بیان داشت که با افزایش درصد بازگردش از ۵۰٪ به ۷۵٪ زمان لازم برای خشک شدن محصول



شکل ۵ تغییرات نسبت رطوبت بر حسب زمان در سطوح مختلف دمایی و سرعت هوای ورودی به خشک‌کن در حالت ۵۰٪ بازگردش هوای گرم

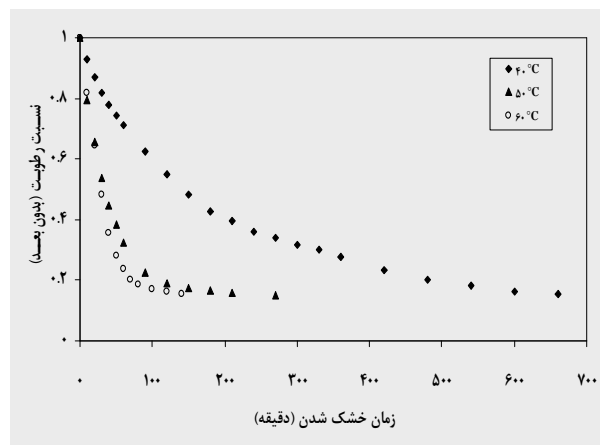


شکل ۶ تغییرات نسبت رطوبت بر حسب زمان در سطوح مختلف دمایی و سرعت هوای ورودی به خشک‌کن در حالت ۷۵٪ بازگردش هوای گرم

شکل ۷ مقایسه بین نسبت‌های رطوبت به دست آمده از آزمایش در مقابل نسبت‌های رطوبت پیش‌بینی شده با مدل میدیلی در تیمارهای مختلف آزمایش شده، برای خشک کردن آلوئه ورا به روش با و بدون بازگردش هوای گرم را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود خطی با زاویه ۴۵ درجه به داده‌ها برازش شده است که نشان‌دهنده دقت مدل میدیلی در پیش‌بینی تغییرات نسبت رطوبت آلوئه ورا می‌باشد.

داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌ها نشان داد که تقریباً همه مدل‌ها مناسبند، اما مدل میدیلی به دلیل بالاتر بودن شاخص R^2 و کمتر بودن میزان $RMSE$ با دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها، فرآیند خشک‌شدن گیاه آلوئه ورا را پیش‌بینی می‌کند. نتایج با مطالعات مشابه قبلی نیز مطابقت می‌کند [۳۱].

شکل ۴ تا ۶ سیتیک خشک شدن آلوئه ورا در بازگردش ۵۰٪ هوای خروجی نشان داده شده است (از آنجا که روند فرآیند خشک شدن برای ۰٪ و ۷۵٪ بازگردش هوای خروجی شبیه به ۵۰٪ هوای بازگردشی بود و به علت بالا بودن تعداد اشکال، فقط نمودار فرآیند خشک شدن با بازگردش ۵۰٪ نشان داده شده است). با افزایش دما و سرعت هوای عبوری از محفظه خشک‌کن، رطوبت نسبی محصول بیشتر کاهش می‌یابد. افزایش دما و سرعت هوا در محفظه خشک‌کن باعث انتقال جرم و گرمای بالاتری شده و کاهش رطوبت شدیدتر و به دنبال آن ضریب نفوذ موثر رطوبت افزایش می‌یابد. نتایج آماری حاصل از تطابق یازده مدل انتخابی برای توصیف خشک‌کردن آلوئه ورا با چرخه هوای بازگشتی و بدون بازگشتی نشان می‌داد که مدل میدیلی در مقایسه با دیگر مدل‌ها از تطابق بالاتری برخوردار می‌باشد. بنابراین این مدل به عنوان بهترین برای برازش داده‌های آزمایشی به دست آمده انتخاب شد. مقادیر ثابت‌ها و ضرایب آماری برای این مدل برای تمامی سطوح هوای بازگشتی در جدول ۲ نشان داده شده است.

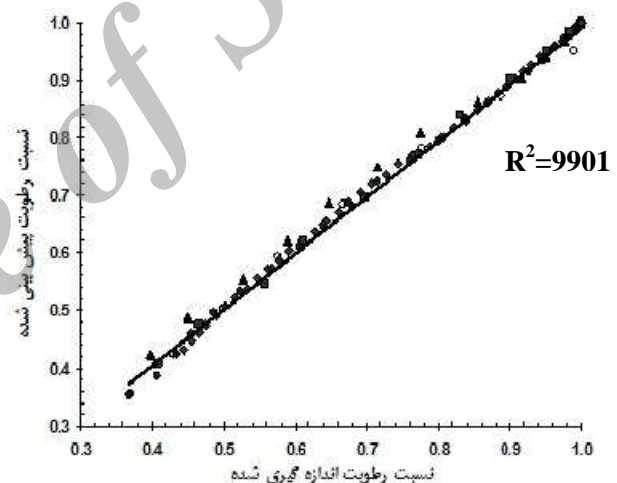


شکل ۸ تغییرات نسبت رطوبت بر حسب زمان در سطوح مختلف دمایی و سرعت هوای ورودی به خشک‌کن در حالت بدون بازگردش هوای گرم

جدول ۲ ضرایب و شاخص‌های آماری مربوط به مدل میدیلی با و بدون استفاده از بازگردش جریان هوای گرم

RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	سرعت جریان هوا (m/s)	دما (°C)
بازگردش ۷۵٪		بازگردش ۵۰٪		بدون بازگردش هوا			
۰/۰۸۲۸	۰/۹۸۱	۰/۰۳۷۹۱	۰/۹۹۴	۰/۰۰۹۶۸	۰/۹۸۰	۰/۵	۴۰
۰/۰۶۲۹	۰/۹۶۷	۰/۰۲۴۰۳	۰/۹۷۹	۰/۰۱۳۲۸	۰/۹۹۰	۱	۴۰
۰/۰۷۳۷	۰/۹۷۹	۰/۰۱۱۰۸	۰/۹۹۱	۰/۰۲۷۶۸	۰/۹۶۹	۱/۵	۴۰
۰/۰۳۶۹	۰/۹۸۸	۰/۰۰۴۸۳	۰/۹۹۸	۰/۰۱۳۴۸	۰/۹۹۲	۰/۵	۵۰
۰/۰۶۶۷	۰/۹۶۸	۰/۰۱۳۴۹	۰/۹۹۱	۰/۰۰۴۴۸	۰/۹۷۹	۱	۵۰
۰/۰۷۱۶	۰/۹۶۷	۰/۰۰۵۰۵	۰/۹۹۶	۰/۰۱۱۲۳	۰/۹۹۴	۱/۵	۵۰
۰/۰۹۸۲	۰/۹۸۸	۰/۰۰۹۴۱	۰/۹۹۸	۰/۰۰۸۶۸	۰/۹۸۷	۰/۵	۶۰
۰/۰۲۲۶۱	۰/۹۹۰	۰/۰۰۵۶۰	۰/۹۸۹	۰/۰۰۴۸۶	۰/۹۸۶	۱	۶۰
۰/۰۶۴۲	۰/۹۸۸	۰/۰۰۶۸۴	۰/۹۸۴	۰/۰۰۳۳۴	۰/۹۹۱	۱/۵	۶۰

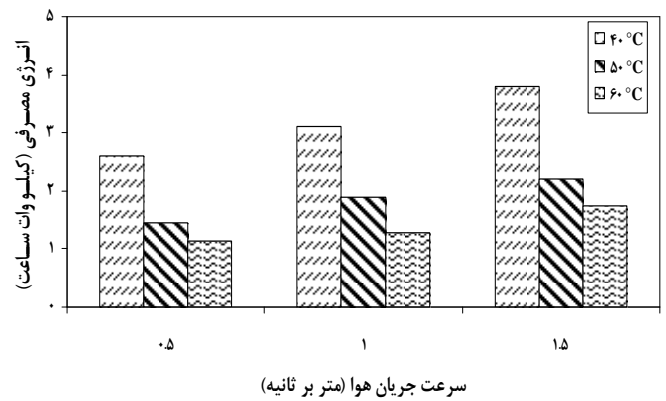
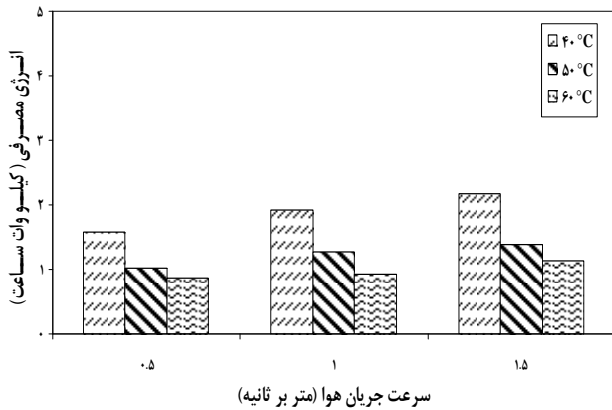
رطوبتی (غلظت رطوبت) میان سطح محصول و محیط اطراف محصول در حال خشک شدن می‌گردد. در نتیجه نرخ خشک شدن کاهش و زمان فرایند افزایش ولی انرژی مصرفی به دلیل استفاده از گرمای هوای بازگردشی کاهش می‌یابد. با افزایش دما، گرادیان حرارتی تا حدی این اثر منفی کاهش گرادیان رطوبتی را کاهش می‌دهد. این پدیده منجر به بهبود نرخ خشک شدن و کاهش زمان فرایند و انرژی مصرفی می‌گردد [۳۲]. کم‌ترین انرژی مصرفی در دمای ۶۰°C و سرعت ۰/۵ m/s برابر ۱/۱۴ kWh و بیشترین مقدار آن در ۴۰°C و سرعت ۱/۵ m/s برابر ۳/۸۱ kWh در حالت بدون بازگردش هوای خروجی می‌باشد. همچنین بیشترین انرژی مصرفی خشک شدن در تیمار با بازگردش هوای ۵۰ و ۷۰ درصد جریان هوای گرم در دمای ۴۰°C و سرعت جریان هوای ۱/۵ m/s به ترتیب به مدت ۲/۹۸ kWh و ۲/۱۸ و کمترین میزان انرژی مربوط دمای ۶۰°C و سرعت جریان هوای ۰/۵ m/s به ترتیب به مدت ۰/۹۴ kWh و ۰/۸۷ بود. نتایج تحقیق سایر پژوهشگران نشان داد که استفاده مجدد از ۵۰٪ هوای خروجی خشک‌کن هوای گرم سبب کاهش ۴۶٪ برای سیب و ۵۳٪ برای هلو در انرژی مصرفی می‌گردد [۳۳]. خشک کردن سبزیجات در خشک‌کن هوای گرم با چرخه ۳۰٪ هوای بازگشتی، ۱۷٪ تا ۲۷٪ در انرژی مصرفی صرفه‌جویی می‌نماید [۳۴]. به‌کارگیری ۵۰٪ درصد هوای خروجی در خشک‌کن انبه هرچند سبب افزایش زمان خشک شدن شده است اما در انرژی مصرفی ویژه ۱/۸۶ kWh/kgwater کاهش پیدا نموده است [۳۵].



شکل ۷ مقایسه نسبت رطوبت اندازه گیری شده و پیش بینی شده توسط مدل میدیلی برای خشک کردن آلوئه ورا در تیمارهای مختلف

انرژی مصرفی

نتایج به دست آمده از آنالیز متغیرهای دما، سرعت هوا و درصد هوای بازگشتی (شکل ۸ تا ۱۰) بر انرژی مصرفی نشان دهنده تأثیر هر یک از این متغیرها بر انرژی مصرفی می‌باشد. تغییرات انرژی مصرفی با و بدون چرخه هوای بازگشتی در شکل های ۸ تا ۱۰ نشان داده شده است. مطابق این شکل ها، انرژی مصرفی در سطوح دمایی ۴۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس روند کاهشی دارد در حالی که روند مصرف انرژی با افزایش سرعت جریان هوا صعودی می‌باشد. با افزایش درصدی هوای بازگشتی از صفر به ۵۰٪، رطوبت نسبی اطراف آلوئه ورا در حال خشک شدن افزایش یافته، که این امر سبب کاهش گرادیان



شکل ۱۰ انرژی مصرفی خشک‌کردن آلوئه ورا با چرخه ۷۵٪ بازگردش هوای گرم

شکل ۸ انرژی مصرفی خشک‌کردن آلوئه ورا با چرخه بدون بازگردش هوای گرم

بهینه‌سازی انرژی و زمان خشک‌کردن

در این پژوهش به منظور بهینه‌سازی واکنش تولید بیودیزل از روش Box-Behnken استفاده شده است. برای بهینه‌سازی انرژی مصرفی در فرآیند خشک‌کردن ژل آلوئه ورا در خشک-کن بازگردشی هوای گرم باید میزان انرژی مصرفی به کمینه مقدار خود برسد. بدین منظور مطابق جدول (۳) شرایط مرزی متغیرهای مستقل و هدف تعیین گردید. از قسمت‌های مهم بهینه‌سازی وزن دهی به متغیرهای تابع هدف می‌باشد. با توجه به اهمیت یکسان بین متغیرهای مستقل وزن برابر ۱ برای آنها در نظر گرفته شد.



شکل ۹ انرژی مصرفی خشک‌کردن آلوئه ورا با چرخه ۵۰٪ بازگردش هوای گرم

جدول ۳ شرایط مرزی متغیرهای مستقل و هدف برای بهینه‌سازی انرژی مصرفی در خشک‌کردن آلوئه ورا

متغیر	هدف	حد پایین	حد بالا	وزن کمینه	وزن بیشینه
دما (°C)	در گستره تعیین شده	۴۰	۶۰	۱	۱
سرعت جریان هوا (متر بر ثانیه)	در گستره تعیین شده	۰/۵	۱/۵	۱	۱
بازگردش هوا (%)	در گستره تعیین شده	۰	۷۵	۱	۱
زمان خشک‌شدن (دقیقه)	در گستره تعیین شده	۶۰	۷۱۰	۱	۱
میزان انرژی مصرفی (کیلووات ساعت)	کمینه شدن	۰/۸۷	۴/۸	۱	۱

۵۱/۵۱، سرعت جریان هوای ۰/۵۱ و بازگردش هوای ۷۵٪ توسط رایانه تعیین شده است.

در جدول (۴) نقطه بهینه واکنش با توجه به شرایط مرزی و وزن دهی اعمال شده، نشان داده می‌شود. نقطه بهینه در دمای

جدول ۴ نقطه بهینه واکنش با توجه به شرایط مرزی و وزن دهی اعمال شده.

شماره	دما	سرعت جریان هوا	بازگردش	زمان خشک شدن	انرژی مصرفی	مطلوبیت
۱	۵۱/۵۱	۰/۵۱	۰/۷۵	۲۸۵/۲۶	۰/۹۱۲	۱
۲	۵۹/۷۱	۱/۲۸	۰/۷۴	۱۱۳/۰۴	۰/۹۱۹	۱
۳	۵۹/۲۵	۰/۷۰	۰/۷۲	۱۴۵/۱۶	۰/۹۲۱	۱
۴	۵۹/۹۳	۱/۴۳	۰/۷۲	۱۱۲/۱۷	۰/۷۷۵	۱
۵	۵۹/۳۷	۰/۵۳	۰/۶۰	۱۵۵/۶۱	۰/۸۸۰	۱

۹۰ و با بازگردش هوای خروجی ۷۵٪ از ۷۱۰ به ۱۱۰ min کاهش یافت.

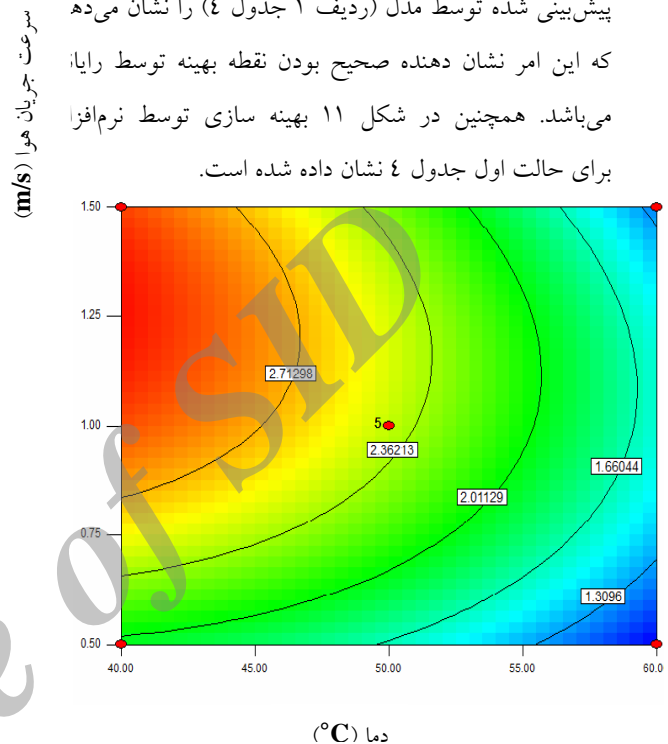
- نتایج حاصل برازش یازده مدل ریاضی برای داده‌های آزمایش نشان داد که مدل میدیلی برای حالت‌های با چرخه هوای بازگشتی و فاقد چرخه هوای بازگشتی دارای بهترین تطابق بر داده‌های به دست آمده از آزمایشات می‌باشند.

- در خشک‌کن بدون بازگردش هوا با کاهش سرعت هوای ورودی از ۱/۵ به ۰/۵ m/s در هر یک از سطوح دمایی، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ انرژی مصرفی روند کاهشی داشت و همچنین با افزایش دما در سرعت ثابت، انرژی مصرفی کاهش پیدا می‌کند.

۵- منابع

- [1] Kucuk, H., Midilli, A., Kilic, A., Dincer, I. 2014. A Review on Thin-Layer Drying-Curve Equations, *Drying Tech.* 32 (7): 757-773.
- [2] Chin, S.K., Law, C.L., Supramaniam, C.V.S., Cheng, P.G., Mujumdar, A.S. 2008. Convective drying of *Ganoderma tsugae* Murrill and effect of temperature on basidiospores. *Drying Tech.* 26(12): 1524-1533.
- [3] Dikbasan, T. 2007. Determination of effective parameters for drying of apples. M.Sc. thesis, Izmir Institute of Technology, Izmir, Turkey.
- [4] Yucel, U. 2006. Evaluation of high pressure pretreatment for enhancing the drying rate of selected fruits and vegetables. M.Sc. thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- [5] Erbay, Z., Icier, F. 2010. A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. *Critical Rev. Food Sci. Nut.* 50(5): 441-464.
- [6] Iguaz, A., López, A. and Vírveda, P. 2002. Influence of air recycling on the performance of a continuous rotary dryer for vegetable wholesale by-products. *J. Food Eng.* 54(4): 289-297.
- [7] Flink, J. M. 1977. Energy analysis in dehydration process. *Food Tech.* 31(3): 76-83.
- [8] Omid beigi R. 2006. Production and treatment of medicinal plants: *Astane Ghods Razavi Publication.*
- [9] Zargari A. 1992. *Medicinal Herb. Vol.3-Tehran Publication.*
- [10] Tabasizadeh M., Minaei S., Khoshtaghaza M.H., Zareh D. 2012. Evaluation and optimization of hot air recycling dryer with automated control. 7th National Conference on Agriculture

در انتها نقطه بهینه پیشنهادی توسط رایانه به طوری تجربی در ۳ تکرار مورد ارزیابی قرار گرفت. میانگین زمان خشک‌شدن و انرژی مصرفی بدست آمده به ترتیب برابر ۲۸۰ دقیقه و ۱/۰۱ کیلووات ساعت بوده است. مقادیر بدست آمده توسط رابطه تجربی خطای بسیار کمی (۰/۵ درصد) نسبت به میزان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل (ردیف ۱ جدول ۴) را نشان می‌دهد که این امر نشان دهنده صحیح بودن نقطه بهینه توسط رایانه می‌باشد. همچنین در شکل ۱۱ بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار برای حالت اول جدول ۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۱ بهینه‌سازی انجام شده انرژی در خشک‌کن بازگردشی جریان هوای گرم

۴- نتیجه گیری

- فرآیند خشک شدن آلوئه ورا تقریباً بصورت آهنگ نزولی است. سرعت خشک شدن آلوئه ورا در مراحل ابتدایی فرایند بالاتر از این سرعت در مراحل پایانی آن است.

- افزایش سرعت و دمای هوای ورودی به خشک‌کن باعث افزایش سرعت خشک‌شدن لایه نازک آلوئه ورا می‌شود.

- زمان لازم برای کاهش رطوبت آلوئه ورا در حالت بدون بازگردش هوای خروجی با افزایش دما (از ۴۰ به ۶۰°C) و سرعت هوا از (۰/۵ به ۱/۵ m/s) از ۵۱۰ به ۶۰ min کاهش یافت. همچنین زمان لازم برای خشک شدن آلوئه ورا در حالت با بازگردش هوای خروجی ۵۰٪ با افزایش دما (از ۴۰ به ۶۰°C) و سرعت هوا از (۰/۵ به ۱/۵ m/s) از ۶۶۰ به ۱۱۰ min

- modeling. *Energ Con Manag*, 44(10), 1689–1705.
- [24] Doymaz, I. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *J. Food Eng*, 61, 359-364.
- [25] Koyuncu, T., Tosun, I., Pinar, Y. 2007. Drying characteristics and heat energy requirement of cornelian cherry fruits (*Cornus mas L.*). *J Food Eng*, 78, 735–739.
- [26] Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M.H. 2011. Evaluation of energy consumption in different drying methods. *Energ Con Manag*, 52: 1192–1199.
- [27] Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A. and Tabil, L.G. 2007. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *J Food Eng*, 78 (1): 98-108.
- [28] Menges, H.O., Ertekin, C. 2006. Thin layer drying model for treated and untreated Stanley plums. *Energ Con Manag*, 47 (15–16): 2337-2348.
- [29] Shen, F., Peng, L., Zhang, Y., Wu, J., Zhang, X., Yang, G., Peng, H., Qi, H. Deng, S. 2011. Thin-layer drying kinetics and quality changes of sweet sorghum stalk for ethanol production as affected by drying temperature. *Ind. Crops Products*, 34 (3): 1588-1594.
- [30] Tirawanichakul, S., Prachayawarakorn, S., Varayanond, W., and Soponronnarit, S. 2009. Drying strategies for fluidized-bed drying of paddy. *Int J Food Eng*, DOI: 10.2202/1556-3758.1401.
- [31] Mohapatra, D. and Srinivasa Rao, P. 2005. A thin layer drying model of parboiled wheat. *J Food Eng*, 66 (4): 513-518.
- [32] Prachayawarakorn, S., Soponronnarit, S., Yaph, M., and Wang, M. 1995. Prototype and commercialization of fluidized bed paddy dryer, *Journal of the Engineering. Instit. Thailand*, 6(2): 2, 33002757.
- [33] Walker, H. T. 1992. Drying Cut Fruits with Recirculated Air for Energy Savings. The Master Thesis. The University of Tennessee, Knoxville, TN.
- [34] Schoenau, G.J., Sokhansanj, S. 1998. Forage drying with exhaust air recirculation. NSER, Dunlea Farms Ltd. Available: http://www.enr.usask.ca/dept/mee/research/thermal_fluid.html. Accessed 18, August, 2012.
- [35] Washington, N. J. 2010. Energy-efficient fluid bed drying system recycles exhaust air to cut heating costs and improve process efficiency. Witte Co., Inc., 07882, USA.
- Machinery Engineering and Mechanization. Shiraz. Iran.
- [11] Abbasi S. 2012. Integration of a Rotary Desiccant Wheel into an Air-Recirculating convective Dryer and its Evaluation using Corn. MSc Thesis, Tarbiat Modares University. Tehran. Iran.
- [12] Darvishi H., 2013. Development of Combined Fluidized-Bed / Microwave Dryer and Optimization of Soybean Drying Thermal Process. PhD Thesis, Tarbiat Modares University. Tehran. Iran.
- [13] Meiering, A. G., Daynard, T. B., Broewn, R., and Otten, L. 1977. Dryer performance and energy use in corn drying. *Canadian Agricultural Engineering*, 19(1).
- [14] Temple, S. J., and Boxtel, A. J. B. V. 2000. Control of fluidized bed tea dryers: controller design and tuning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26: 159-170.
- [15] Tippayawong, N., Tantakitti, C., Thavornun, S., and Peerawanitkul, V. 2009. Energy conservation in drying of peeled longan by forced convection and hot air recirculation. *Biosystems Engineering*, 104: 199-204.
- [16] Prachayawarakorn, S., Tia, W., Poopaiboon, K., and Soponronnarit, S. 2005. Comparison of performances of pulsed and conventional fluidised-bed dryers. *Journal of Stored Products Research*, 41: 479-497.
- [17] Doymaz, İ. 2007. Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 78(4): 1291-1297.
- [18] Pahlevanzadeh H. 1999. Drying, Principles, Applications and Design. Publication of Tarbiat Modares University. Tehran, Iran.
- [19] Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M.H., Kazemi, M., & Nikbakht, A.M. 2010. Drying of pomegranate arils: comparison of predictions from mathematical models and neural networks. *Int. J. Food Eng*, 6 (3), 1-19.
- [20] Zomorodian, A., & Moradi, M. (2010). Mathematical Modeling of Forced Convection Thin Layer Solar Drying for *Cuminum cyminum*. *J. Agr. Sci. Tech*, (12), 401-408.
- [21] Mortezaipoor, H., Ghobadian, B., Khoshtaghaza, M.H., Minaei, S. 2014. Drying Kinetics and Quality Characteristics of Saffron Dried with a Heat Pump Assisted Hybrid Photovoltaic-thermal Solar Dryer. *J. Agr. Sci. Tech*, 16: 33-45.
- [22] Midilli, A., Kucuk, H. 2003. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energ Con Manag*, 44(7), 1111–22.
- [23] Akpınar, E. K., Midilli, A., Bicer, Y. 2003. Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical

Mathematical modelling, kinetics and energy consumption for drying Aloe Vera gel in hot Air dryer with exhaust Air recycle

Esmaili Adabi, M. ^{1*}, Mousavi Seyedi, S. R. ², Kalantari, D. ², Ghavami Adl, B. ¹

1. Department of Physics, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2. Department of Mechanics of Biosystem Engineering, Agriculture Science & Natural Resources University, Sari, Iran.

(Received: 93/6/9 Accepted: 93/8/4)

The research aimed at mathematical modeling, kinetics and energy consumption of a hot air dryer with air recycle (0, 50%, and 75%). A hot-air dryer capable of recycling the exhaust air was used. The experimental data were fitted to standard thin-layer drying models in MATLAB 2007. The best model was selected according to the coefficient of correlation (R^2), chi-square (χ^2) and root mean squares error (RMSE). These indices showed that the Midilli et al. model has the best fit for explaining the experimental data. The required energy was minimum at 0.5 m/s and 60°C for 0%, 50% and 75% recycled air levels and was maximum at 1.5 m/s and 40°C for all recycling levels. The hot-air recirculating system also reduced energy requirements and increased the drying time for aloe vera.

Keywords: Drying, Aloe vera, mathematical modeling, energy consumption

* Corresponding Author E-Mail Address: m.esmailiadabi@shahryariau.ac.ir