

بررسی سینتیک انتقال جرم و مدل سازی خشک کردن ترخون (*Artemisia dracunculus L.*)

حامد کرمی^{۱*} و منصور راسخ^۲

۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکترا، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل؛ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، پست الکترونیک: hamedkarami@uma.ac.ir

۲- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ پذیرش: تیر ۱۳۹۷

تاریخ اصلاح نهایی: تیر ۱۳۹۷

تاریخ دریافت: دی ۱۳۹۶

چکیده

فرایند خشک کردن اهمیت زیادی در فرآوری گیاهان دارویی دارد، زیرا گیاهان دارویی اسانس دار اگر بلافاصله خشک نشوند و یا اسانس آنها استخراج نشود مواد مؤثره و ترکیب‌های فرار خود را از دست می‌دهند. در این تحقیق، سینتیک خشک کردن لایه نازک گیاه دارویی ترخون (*Artemisia dracunculus L.*) در یک خشک‌کن هیبریدی خورشیدی مدل‌سازی شد. آزمایش در چهار دمای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد و سه سرعت هوای ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه در آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار انجام شد. ۸ مدل مرسوم خشک کردن بر داده‌های آزمایشگاهی برازش و با هم مقایسه شدند. باتوجه به نتایج آنالیز واریانس عوامل دمای هوای خشک کردن و سرعت هوای خشک کردن در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شده ولی اثر متقابل دما و سرعت هوای خشک کردن معنی‌دار نشده و بیشترین میزان اسانس استحصالی مربوط به دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت جابجایی هوا ۱/۵ متر بر ثانیه با مقدار تقریب ۱/۲۷ میلی‌لیتر براساس حجمی (v/w) بدست آمد و با افزایش دما از ۴۰ درجه سانتی‌گراد به ۷۰ درجه سانتی‌گراد میزان اسانس استحصالی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. طبق نتایج بدست آمده مدل آغباشلو و همکاران منحنی سینتیک خشک شدن ترخون را نسبت به مدل‌های دیگر بهتر برآورد کرد. حداکثر مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر در سرعت هوا ۱/۵ متر بر ثانیه و دمای هوای ورودی ۷۰ درجه سانتی‌گراد برابر با $2/74 \times 10^{-10}$ (مترمربع بر ثانیه) بدست آمد. همچنین، حداقل مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر در سرعت هوا یک متر بر ثانیه و دمای هوای ورودی ۴۰ درجه سانتی‌گراد برابر با $1/34 \times 10^{-10}$ (مترمربع بر ثانیه) بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: اسانس، ترخون (*Artemisia dracunculus L.*)، گیاهان دارویی، ضریب پخش رطوبت مؤثر، مدل‌سازی.

مقدمه

اسانس را دارد و مقدار آن بین ۰/۶ تا ۲/۸ می‌باشد. مواد مؤثره ترخون، سبب کاهش فشار خون و افزایش اسید معده می‌شود. استفاده از این گیاه، به هضم غذا کمک می‌کند. مهمترین کشورهای تولیدکننده ترخون فرانسه، ایتالیا، آلمان،

گیاه ترخون با نام علمی *Artemisia dracunculus L.* از تیره کاسنی یا گل ستاره است. اندام‌های هوایی ترخون حاوی اسانس است که در مرحله گلدهی بیشترین مقدار

آمریکا و مجارستان هستند (Omidbaigi, 2009a).

خشک کردن یکی از قدیمی ترین روش های نگهداری محصولات کشاورزی است. این فرایند اهمیت زیادی در فرآوری گیاهان دارویی دارد، زیرا گیاهان دارویی اسانس دار اگر بلافاصله خشک نشوند و یا اسانس آنها استخراج نشود مواد مؤثره و ترکیب های فرار خود را از دست می دهند. تحقیقات نشان می دهد که ترکیب های معطر گیاهان تحت تأثیر روش های فرآوری قرار می گیرند. اگر گیاه بلافاصله پس از برداشت خشک شود، به حفظ رنگ و مواد معطر گیاه کمک می کند (Omidbaigi, 2009b).

در گذشته از نور خورشید به طور مستقیم برای خشک کردن انواع محصولات کشاورزی و مواد غذایی استفاده می شد، اما در استفاده از این روش مشکلات زیادی وجود دارد، که عبارتند از: تغییرات نامناسب در کیفیت غذا، عدم کنترل کافی در فرایند خشک کردن، طولانی بودن زمان خشک شدن و غیربهداشتی بودن محصول. مشکلاتی از این قبیل استفاده از تکنولوژی جدید در فرایند خشک کردن را ضروری می سازد. خشک کن های صنعتی نسبت به روش های سنتی مزایایی مانند: برداشت به موقع محصول، کاهش تلفات در مزرعه، برنامه ریزی برای برداشت در شرایط نامطلوب آب و هوایی، افزایش مدت انبارداری مواد غذایی و محصولات کشاورزی دارند (Cakmak & Yıldız, 2011).

تحقیقات متعددی درباره خشک کردن محصولات کشاورزی از جمله سبزی ها انجام شده است. نتایج آزمایش های Karami و همکاران (۲۰۱۷b) در بررسی رفتار خشک کردن لایه نازک برگ پونه در درجه حرارت های مختلف ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد و سه سرعت هوای ورودی ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه در خشک کن هیبریدی نشان داد که با افزایش دما و سرعت هوای ورودی به طور قابل توجهی باعث کاهش زمان خشک کردن برگ پونه گردید. همچنین مدل آغباشلو و همکاران مناسب ترین مدل برای برآزش داده ها تشخیص داده شد. براساس تحقیقات Akpinar و همکاران (۲۰۰۶) در بررسی

رفتار خشک کردن برگ های جعفری در خشک کن همرفتی در دماهای ۵۶، ۶۷، ۷۵ و ۹۳ درجه سانتی گراد با سرعت جابجایی هوای ۱ متر بر ثانیه و خشک کردن سنتی (در زیر سایه) مشاهده شد که در منحنی های خشک کردن دوره ای، خشک کردن با سرعت ثابت وجود ندارد و فرایند خشک کردن همواره با کاهش رطوبت در واحد زمان همراه است. Doymaz و همکاران (۲۰۰۶) در بررسی رفتار خشک کردن لایه نازک برگ شوید و جعفری در درجه حرارت های مختلف ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد در خشک کن کابینتی نشان دادند که با افزایش دما تا ۶۰ درجه سانتی گراد به طور قابل توجهی باعث کاهش زمان خشک کردن برگ شوید و جعفری گردید. همچنین مدل لگاریتمی مناسب ترین مدل برای برآزش داده ها تشخیص داده شد.

علاوه بر موارد فوق، تحقیقاتی نیز در ارتباط با خشک کردن نعناع، برگ چغندر، برخی از سبزیجات، گیاهان دارویی، چای، برگ اسفناج، آویشن و رزماری انجام شده است (Yaldiz; Alibas, 2006; Karami et al., 2017a,b); Ertekin, 2001 & Panchariya et al., 2002; Kaya & Doymaz, 2009; Aydin, 2009; Doymaz, 2011; Arslan & Ozcan, 2008; Borah et al., 2015).

با توجه به اهمیت و حساسیت مواد مؤثره گیاه ترخون نسبت به فرایند خشک کردن و نظر به اینکه گیاهان دارویی در برابر عمل خشک کردن به لحاظ حفظ رنگ و ترکیب های معطر حساسیت زیادی دارند، با توجه به اینکه تاکنون پژوهشی در این مورد مشاهده نشده، مهمترین اهداف تحقیق شامل بررسی سینتیک انتقال جرم و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در طی خشک کردن و بررسی اثر بهترین دما و سرعت جابجایی هوای خشک کردن بر میزان اسانس بدست آمده ترخون می باشد. ضرورت انجام این تحقیق به این دلیل می باشد که گیاهان دارویی حاوی اسانس، اگر بلافاصله در دمای مناسب خشک نشوند و یا اسانس آنها استخراج نشود رایحه خود را از دست می دهند.

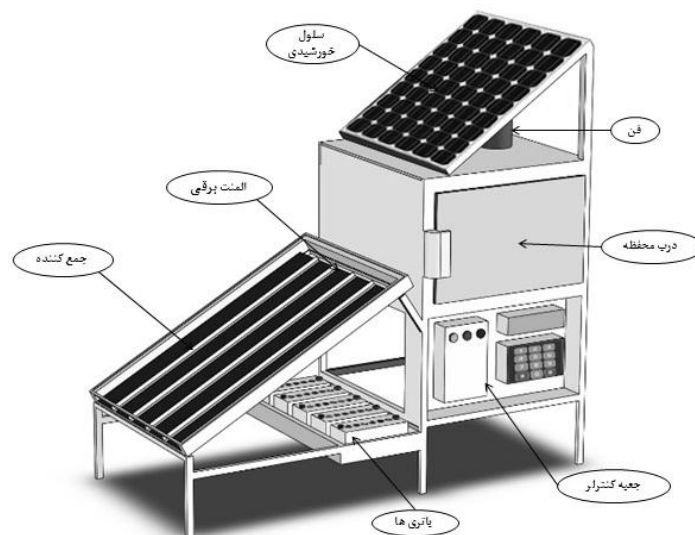
مواد و روش‌ها

انجام آزمایش‌ها

به منظور مقایسه مدل‌های مرسوم خشک کردن و بررسی تأثیر روش‌های خشک کردن گیاه ترخون (*Artemisia dracuncululus L.*)، آزمایشی به مدت ۳۶ روز انجام شد. برای انجام این تحقیق برگ و سرشاخه‌های گیاه از فاصله ۴ تا ۵ سانتی‌متری از سطح زمین و از مزارع سبزی منطقه میاندر بند کرمانشاه در خردادماه سال ۱۳۹۶ برداشت شد. آزمایش‌ها در چهار دمای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد و سه سطح سرعت جابجایی هوای ورودی ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه با سه تکرار انجام شد. نمونه‌ها با رطوبت اولیه در حدود ۸۵٪ به صورت روزانه برای خشک شدن از سطح مزرعه برداشت و بلافاصله به محل آزمایش انتقال داده شد.

ساختمان خشک‌کن شامل یک جمع‌کننده خورشیدی به طول ۱۲۰ سانتی‌متر، عرض ۱۰۰ سانتی‌متر و ارتفاع

۷ سانتی‌متر به همراه یک المنت برقی ۱۰۰۰ وات که برای گرم کردن هوای ورودی به محفظه خشک‌کن به حجم ۲۱۰ سانتی‌متر مکعب، ۵ حسگر دما (LM75) با دامنه اندازه‌گیری دما از ۵۵- تا ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد و دقت اندازه‌گیری ± 2 درجه سانتی‌گراد و همچنین ۲ حسگر رطوبت (HS1101) با دقت اندازه‌گیری ± 2 ٪ برای اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی جابجایی هوا بود (شکل ۱). فن خشک‌کن دارای قابلیت تغییر میزان هوای ورودی به محفظه خشک‌کن است. برای اندازه‌گیری سرعت جریان جابجایی هوای دمیده شده به محفظه خشک‌کن از یک سرعت‌سنج پره‌ای مدل AVM-07 با دقت اندازه‌گیری ± 1 ٪ و حساسیت ۰/۱ متر بر ثانیه استفاده شد. برای اجرای فرایند خشک کردن، میکرو کنترلر AVR مدل ATMEGA 8 مورد استفاده قرار گرفت که توسط نرم‌افزار CODEVISION برنامه‌نویسی شده بود (Karami, 2014).



شکل ۱- طرح‌واره خشک‌کن

قرار گرفت. در طی فرایند خشک کردن، تغییرات وزن محصول به وسیله ترازوی دیجیتالی (AND, GF-3000)

۳۰۰ گرم گیاه ترخون به صورت کامل همراه با ساقه و برگ بر روی سینی‌های توری خشک‌کن به صورت تک لایه

استخراج اسانس به روش تقطیر با آب

برای اسانس‌گیری از دستگاه کلونجر و با روش تقطیر با آب استفاده شد. مقدار ترخون خشک شده مورد استفاده برای این تحقیق ۳۰ گرم و مقدار آب مورد استفاده در هر آزمایش ۵۰۰ میلی‌لیتر بود. مدت زمان اسانس‌گیری برای هر تیمار پس از به‌جوش آمدن آب، ۲ ساعت بود. میزان اسانس بدست آمده از هر تیمار به‌صورت حجم اسانس برحسب میلی‌لیتر (V/W%) محاسبه گردید (Karami et al., 2017a,b).

ضریب پخش رطوبت مؤثر

قانون دوم فیک برای شرایط لایه نازک در محصولات با فرض ناچیز بودن اثرهای دما و مجموع گرادیان فشار می‌تواند انتقال رطوبت را در مرحله نزولی فرایند خشک کردن توصیف کند. ضریب پخش رطوبت مؤثر با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد (Crank, 1975).

$$MR = \frac{(M_i - M_e)}{M_j - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad \text{رابطه ۲}$$

خشک)، L: نیمی از ضخامت لایه (متر) و D_{eff} : ضریب پخش مؤثر (مترمربع بر ثانیه) است. وقتی t افزایش می‌یابد، تمام جملات به غیر از جمله اول صفر می‌شوند. در نتیجه رابطه ۳ و سپس رابطه ۴ حاصل می‌شوند.

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{M_i - M_e}{M_j - M_e}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad \text{رابطه ۳}$$

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad \text{رابطه ۴}$$

ساخت تایوان با دقت ± 0.1 گرم ثبت شد. سپس رطوبت نهایی نمونه‌ها با آون آزمایشگاهی در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت AOAC (۱۹۸۴) و با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Mirzaee et al., 2010).

$$M_d = \frac{W_w - W_d}{W_d} \quad \text{رابطه ۱}$$

که M_d : رطوبت گیاه ترخون بر پایه خشک (db)، W_w : وزن ترخون در طی خشک شدن و W_d : وزن ترخون خشک می‌باشد. برای رسیدن شرایط سیستم به حالت پایدار کلیه آزمایش‌ها ۲۵ دقیقه بعد از روشن کردن سیستم شروع شد. سپس سینی حاوی نمونه‌ها در محفظه خشک‌کن قرار داده شد. نحوه خشک کردن به این صورت است که فن هوا را از روی جمع‌کننده که به‌وسیله گرم‌کن الکتریکی و جمع‌کننده گرم شده است به داخل محفظه سینی‌ها انتقال می‌دهد. جریان هوا هنگام گذر از توده، رطوبت نمونه را جذب و باعث گرم شدن آن می‌شود. بدین ترتیب افزایش دما باعث تسریع در خروج آب از بافت نمونه و در نتیجه خشک کردن محصول می‌گردد.

که در آن MR: نسبت رطوبت، n: تعداد جملات رابطه (۱، ۲، ۳ و ...)، t: زمان خشک شدن (ثانیه)، M_i : مقدار رطوبت در یک زمان (بر پایه خشک)، M_j : مقدار رطوبت اولیه (بر پایه خشک)، M_e : مقدار رطوبت تعادل (بر پایه

که در آن MR نسبت رطوبت، M_d رطوبت توده در زمان مورد نظر بر پایه خشک (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک)، M_e رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک) و M_0 رطوبت اولیه توده محصول (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک) است. براساس تحقیقات انجام شده، در محصولاتی که دارای رطوبت زیاد هستند رابطه نسبت رطوبت در طی خشک شدن رابطه ۶ به صورت رابطه ۷ ساده می‌گردد (Mirzaee et al., 2010).

$$MR = \frac{M_d}{M_0} \quad \text{رابطه ۷}$$

نسبت رطوبت بدست آمده در طی آزمایش، با ۸ مدل از مدل‌های استاندارد خشک کردن لایه نازک محصولات کشاورزی مقایسه گردید که در جدول ۱ آمده است.

شیب خطی K با رسم $\ln(MR)$ نسبت به t به صورت زیر تعیین می‌شود (Kaveh et al., 2017):

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad \text{رابطه ۵}$$

مدل‌سازی ریاضی خشک کردن

برای مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک کردن، بستر نازک ترخون از نسبت رطوبت در طی فرایند خشک کردن استفاده شد. نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت توده در هر لحظه در طی خشک کردن از رابطه ۶ محاسبه شد (Aghbashlo et al., 2009a,b).

$$MR = \frac{M_d - M_e}{M_0 - M_e} \quad \text{رابطه ۶}$$

جدول ۱- مدل‌های رگرسیون خشک شدن توده بستر نازک

ردیف	نام مدل	مدل	مرجع
۱	آغباشلو و همکاران	$MR = \exp\left(\frac{k_1 t}{1 + k_2 t}\right)$	(Aghbashlo et al., 2009a,b)
۲	میدیلی و همکاران	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(Midilli, et al., 2002)
۳	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$	(Henderson, 1974)
۴	ورما و همکاران	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	(Verma et al., 1985)
۵	ونگ و سینگ	$MR = 1 + at + bt^2$	(Wang & Singh, 1978)
۶	دوجمله‌ای	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(Yaldiz et al., 2001)
۷	لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + c$	(Karathanos, 1999)
۸	بیج	$MR = \exp(-kt^n)$	(Guarte, 1996)

MR : نسبت رطوبت، t : زمان (دقیقه) و $a, b, c, g, k, k_0, k_1, n$: ثابت‌های مدل است.

سرعت جابجایی هوا معنی دار نشده است.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اسانس استحصالی ترخون

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات
دما	۳	$5 \times 10^{-2} **$
سرعت	۲	$1/3 \times 10^{-2} **$
دما × سرعت	۶	$4 \times 10^{-2} n.s$
خطای آزمایش	۲۴	1×10^{-2}
کل	۳۵	

** : معنی دار در سطح ۱٪؛ $Cv=V/2$ (ضریب تغییرات)

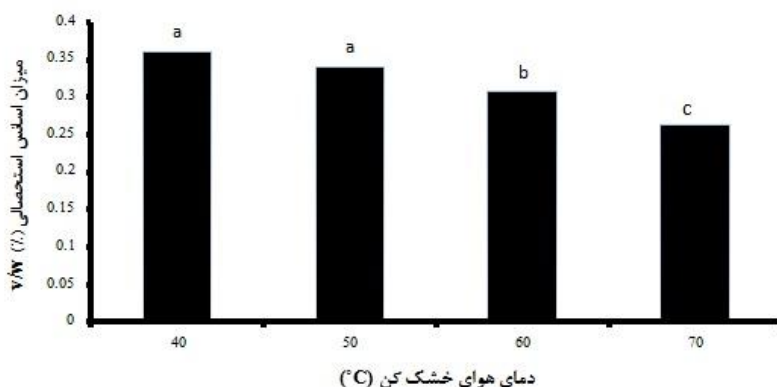
نتایج مقایسه میانگین اثر اصلی دما و اثر اصلی سرعت جابجایی هوای خشک‌کن در میزان اسانس استخراج شده از ترخون در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است. براساس شکل ۲ دمای هوای ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد با هم اختلاف معنی‌داری ندارند. همچنین در شکل ۳ مشاهده می‌شود که سرعت جابجایی هوای ورودی ۱ و ۲ متر بر ثانیه اختلاف معنی‌داری ندارند و تنها در سرعت جابجایی هوای ۱/۵ متر بر ثانیه می‌توان بیشترین مقدار اسانس گیاهی را بدست آورد. از شکل‌های ۲ و ۳ معلوم می‌شود که بیشترین میزان اسانس استخراج شده مربوط به دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد با میزان اسانس ۱/۲۷ میلی‌لیتر براساس وزن حجمی (v/w) بود. همچنین با افزایش دما از ۴۰ به ۷۰ درجه سانتی‌گراد میزان اسانس استحصالی کاهش یافت و کمترین مقدار آن برابر ۰/۸۸ میلی‌لیتر براساس وزن حجمی (v/w) در درجه حرارت ۷۰ درجه سانتی‌گراد بدست آمد.

مدل‌های رگرسیونی تغییرات نسبت رطوبت در طی خشک کردن، براساس متغیر مستقل زمان با استفاده از نرم‌افزار SPSS-17 استخراج گردید. برای تعیین بهترین مدل از سه معیار ضریب تعیین (R^2)، مربع کای (χ^2) (Chi-square) و ریشه متوسط خطای داده‌ها (RMSE) (Root Mean Square Error) استفاده شد. در مقایسه بین دو مدل، مدل با R^2 بیشتر و مقدار χ^2 و RMSE کمتر، بهتر می‌تواند تغییرات نسبت رطوبت را در طی خشک کردن پیش‌بینی کند (Aghbashlo *et al.*, 2009a,b). داده‌های حاصل از آزمایش تأثیر دما و سرعت جریان هوا در فرایند خشک کردن بر مقدار اسانس استحصالی، در قالب طرح کاملاً تصادفی و به صورت فاکتوریل با دو متغیر دمای فرایند خشک کردن ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد و ۳ سرعت جریان جابجایی هوای ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه در سه تکرار تجزیه و تحلیل شد. میانگین‌ها توسط آزمون چند دامنه دانکن مقایسه شدند.

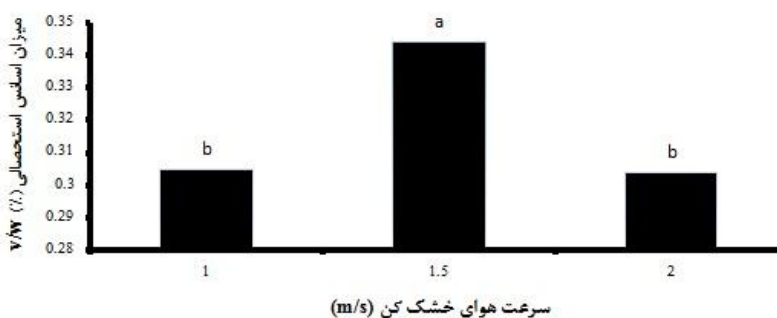
نتایج

تأثیر دما و سرعت جابجایی هوای خشک کردن بر میزان اسانس استخراج شده

نتایج تجزیه واریانس تأثیر دما و سرعت جابجایی هوا بر میزان اسانس استحصالی از نمونه‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. با مشاهده جدول ۲ معلوم می‌شود که اثر اصلی دما و اثر اصلی سرعت جابجایی هوا در سطح ۱٪ معنی دار شده ولی اثر متقابل دو جانبه دما و



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر اصلی دمای هوا بر میزان اسانس استحصالی با استفاده از آزمون چند دامنه دانکن

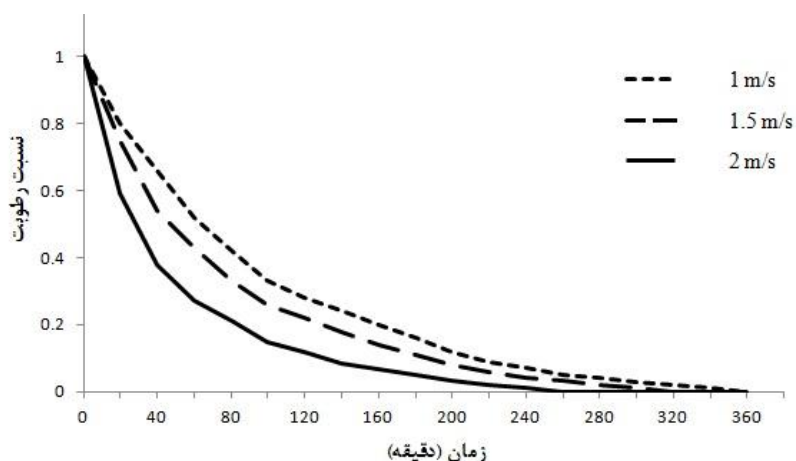


شکل ۳- مقایسه میانگین اثر اصلی سرعت هوا بر میزان اسانس استحصالی با استفاده از آزمون چند دامنه دانکن

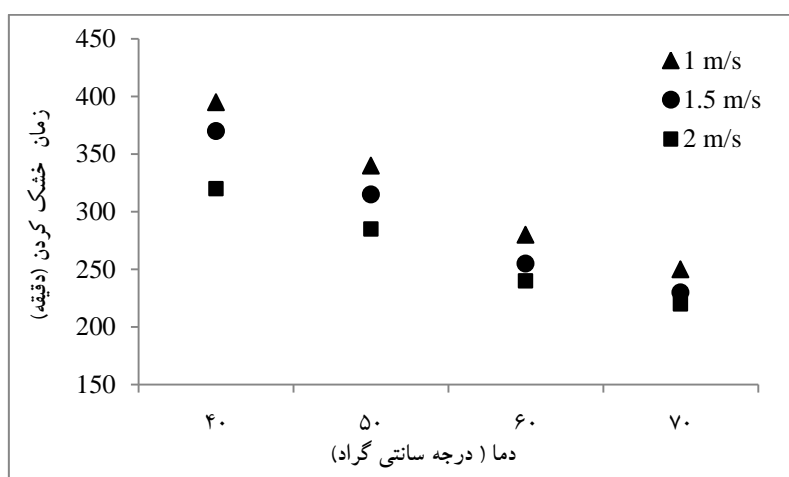
که افزایش سرعت جابجایی هوای ورودی از ۱ تا ۲ متر بر ثانیه سبب کاهش مدت زمان خشک کردن گیاه ترخون شد. همچنین با بررسی شکل ۵ مشخص می‌شود که در دماهای بالا تفاوت بین مدت زمان خشک کردن در سرعت‌های متفاوت قابل صرف‌نظر کردن است، در حالی که این تفاوت در دماهای پایین بیشتر است. به عبارت دیگر تأثیر سرعت جابجایی هوا بر مدت زمان خشک کردن در دماهای پایین بیشتر است.

مقایسه اثر سرعت جابجایی هوا بر روی مدت زمان خشک شدن در دماهای مختلف

منحنی تغییرات نسبت رطوبت در برابر مدت زمان خشک کردن در دمای هوای ثابت ۵۰ درجه سانتی‌گراد و در سرعت‌های مختلف جابجایی هوا در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین منحنی دمای خشک کردن در برابر مدت زمان خشک کردن در سرعت‌های ثابت جابجایی هوا در شکل ۵ آورده شده است. بررسی این نمودارها نشان می‌دهد



شکل ۴- تغییر رطوبت در طی خشک شدن با سرعت‌های مختلف جابجایی هوا



شکل ۵- دمای خشک کردن در برابر مدت زمان خشک کردن در سرعت‌های ثابت جابجایی هوا

بود. براساس نتایج مدل رگرسیونی آغباشلو و همکاران (۲۰۰۹) تغییرات رطوبت در طی خشک کردن ترخون را بهتر برازش کرد. نتایج برازش مدل‌ها براساس متوسط شاخص‌های آماری برای سرعت‌های ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه در جدول ۳ آورده شده است. مقادیر ضرایب این مدل برای سرعت‌های مختلف در جدول ۴ مشاهده می‌گردد.

مدل‌سازی سینتیک خشک کردن

آزمایش‌های خشک کردن ترخون در چهار سطح دمایی ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد با سه تکرار و سه سرعت جابجایی هوای ورودی ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه با سه تکرار انجام شد. با توجه به مقادیر R^2 ، χ^2 و RMSE مدل‌های رگرسیونی مختلف ارزیابی شد و معیار مدل بهتر، مقدار بیشتر R^2 و مقدار کمتر χ^2 و RMSE

جدول ۳- مقایسه دقت برازش مدل‌ها براساس متوسط شاخص‌های آماری در دماهای مختلف

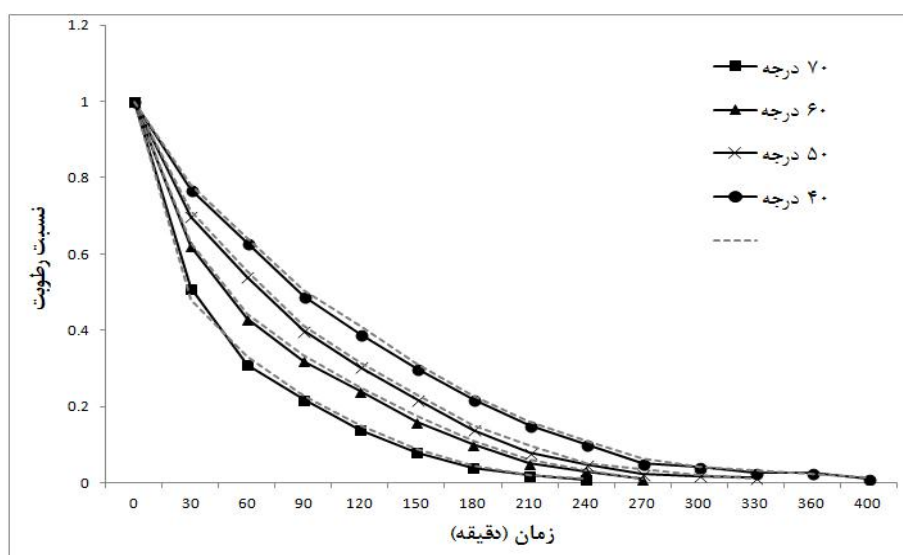
سرعت	مدل	R ²	χ^2	RMSE
۱ m/s	آغباشلو و همکاران	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۵۲	۰/۰۰۱۲۸۱
	میدیلی و همکاران	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۳۶۸	۰/۰۴۲۱۵۱
	نیوتن	۰/۹۹۷	۰/۰۰۰۱۳۸	۰/۰۰۱۳۹۵
	ونگ و سینگ	۰/۹۹۷	۰/۰۰۰۳۹۸	۰/۰۱۸۳۴۵
	ورما و همکاران	۰/۹۹۵	۰/۰۰۰۷۳۴	۰/۱۱۹۳۲۲
	دوجمله‌ای	۰/۹۸۹	۰/۰۰۰۷۸۳	۰/۳۶۸۵۴۵
	لگاریتمی	۰/۹۹۲	۰/۰۰۰۸۶۳	۰/۱۴۵۶۵۱
	بیج	۰/۹۹۵	۰/۰۰۰۸۹۱	۰/۹۵۴۶۳۴
۱/۵ m/s	آغباشلو و همکاران	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۶۹	۰/۰۰۲۶۴۸
	میدیلی و همکاران	۰/۹۹۸	۰/۰۰۳۲۵۸	۰/۰۳۲۶۸۹
	نیوتن	۰/۹۹۳	۰/۰۰۶۷۳۴	۰/۰۸۹۱۳۵
	ونگ و سینگ	۰/۹۹۱	۰/۰۰۸۲۳۴	۰/۰۲۸۹۲۵
	ورما و همکاران	۰/۹۹۳	۰/۰۰۴۶۹۵	۰/۰۲۳۸۴۶
	دوجمله‌ای	۰/۹۹۲	۰/۰۰۵۶۳۴	۰/۰۹۵۴۳۲
	لگاریتمی	۰/۹۸۹	۰/۰۰۵۸۳۲	۰/۱۸۵۶۹۴
	بیج	۰/۹۹۷	۰/۰۰۳۱۳۷	۰/۱۶۸۹۲۸
۲ m/s	آغباشلو و همکاران	۰/۹۹۸	۰/۰۰۰۱۲۳	۰/۰۰۰۵۳۱
	میدیلی و همکاران	۰/۹۹۸	۰/۰۰۶۸۷۷	۰/۰۰۹۸۸۹
	نیوتن	۰/۹۸۹	۰/۰۰۴۴۸۷	۰/۰۷۸۵۳۶
	ونگ و سینگ	۰/۹۸۸	۰/۰۰۶۵۳۱	۰/۰۲۷۶۴۵
	ورما و همکاران	۰/۹۹۵	۰/۰۰۸۷۴۶	۰/۰۹۹۸۹۶
	دوجمله‌ای	۰/۹۹۶	۰/۰۰۸۹۳۲	۰/۱۲۸۶۹۲
	لگاریتمی	۰/۹۸۹	۰/۰۰۷۵۹۲	۰/۱۳۶۸۹۸
	بیج	۰/۹۹۶	۰/۰۰۸۶۱۹	۰/۱۷۸۵۶۹

جدول ۴- مقادیر ثابت و ضرایب مدل رگرسیونی آغباشلو و همکاران به تفکیک دمای خشک کن

دما				ضرایب	سرعت
۷۰	۶۰	۵۰	۴۰		
۰/۰۰۳	-۰/۰۰۲	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۲	K_2	۱ m/s
۰/۰۲۹	۰/۰۱۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۶	K_1	
۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	R^2	
۰/۰۰۵	-۰/۰۰۲	-۰/۰۰۲	-۰/۰۰۲	K_2	۱/۵ m/s
۰/۰۳۵	۰/۰۱۲	۰/۰۱۰	۰/۰۰۷	K_1	
۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	R^2	
۰/۰۰۷	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۲	۰/۰۰۷	K_2	۲ m/s
۰/۰۴۳	۰/۰۱۸	۰/۰۱۱	۰/۰۴۳	K_1	
۰/۹۹۷	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	R^2	

بوده، به طوری که منحنی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و منحنی حاصل از داده‌های مدل به هم نزدیک هستند. با توجه به بررسی شاخص‌های ارزیابی مدل‌های رگرسیونی برتر کاملاً مشخص می‌گردد که این مدل می‌تواند داده‌های آزمایشگاهی را به خوبی پیش‌بینی کند.

منحنی خشک شدن براساس داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از بهترین مدل، برای سرعت یک متر بر ثانیه در شکل ۶ آورده شده است. با توجه به شکل مشخص است که هرچه دمای هوای عبوری بیشتر باشد عمل خشک کردن سریع‌تر انجام می‌شود. مطابق شکل ۶ داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل بسیار به هم نزدیک

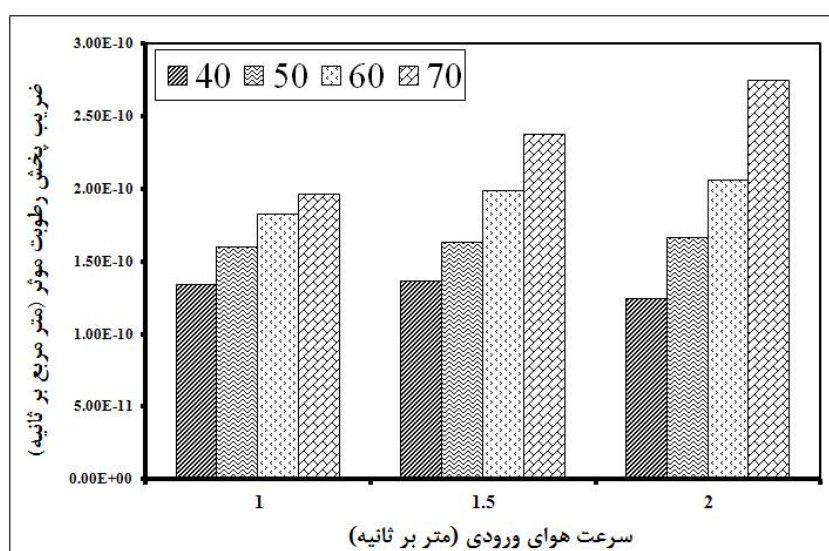


شکل ۶- تغییر رطوبت در طی خشک شدن با دماهای مختلف حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل آغباشلو و همکاران (سرعت ۱ متر بر ثانیه)

ضریب پخش رطوبت مؤثر

مقادیر ضریب پخش رطوبت مؤثر (D_{eff}) برای دماهای مختلف و سرعت هوا، از رابطه ۵ بدست آمد. این مقادیر برای تمام سطوح درجه حرارت هوا و سرعت هوا در شکل ۷ ارائه شده است. مقادیر ضریب پخش رطوبت مؤثر در آزمایش‌ها برای محصولات کشاورزی و مواد غذایی در محدوده بین 10^{-9} و 10^{-11} مترمربع بر ثانیه می‌باشد که مقادیر بدست آمده برای ترخون نیز در این محدوده قرار

داشت (Rodriguez et al., 2014). حداکثر مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر در سرعت هوا ۲ متر بر ثانیه و دمای هوای ورودی ۷۰ درجه سانتی گراد برابر با $2/74 \times 10^{-10}$ (مترمربع بر ثانیه) بدست آمد. همچنین، حداقل مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر در سرعت هوا یک متر بر ثانیه و دمای هوای ورودی ۴۰ درجه سانتی گراد برابر با $1/34 \times 10^{-10}$ (مترمربع بر ثانیه) بدست آمد.



شکل ۷- مقادیر ضریب پخش رطوبت مؤثر (D_{eff}) برای دماهای مختلف و سرعت هوا

بحث

کردن، رطوبت به وسیله انتشار از سطح برگها خارج می‌شود و از آنجایی که غده‌های حاوی اسانس در سطح برگها یا نزدیکی آن قرار دارند، در فرایند خشک کردن مقداری از اسانس گیاه از دست می‌رود، این سازوکار می‌تواند علت کاهش میزان اسانس را در طی خشک کردن توضیح دهد. نتایج مشابهی در خشک کردن آویشن، نعناع، پونه و اکلیل کوهی بدست آمد (Blanco et al., 2002; Rohloff et al., 2005; Karami et al., 2017a,b; Piga et al., 2007; Nasiri, 2011). افزایش دما و سرعت جابجایی هوا باعث افزایش سرعت خشک کردن می‌شود. همچنین تأثیر افزایش سرعت جابجایی هوا بر مدت زمان خشک کردن در دماهای

اثر دمای هوای خشک کردن و سرعت جابجایی هوای خشک کردن بر مقدار اسانس استحصالی در سطح احتمال ۱٪ معنی دار شد ولی اثر متقابل دما و سرعت جابجایی هوا معنی دار نشده است. کمترین میزان اسانس استحصالی مربوط به دمای ۷۰ درجه سانتی گراد و سرعت جابجایی هوای ۲ متر بر ثانیه و بیشترین میزان اسانس استحصالی مربوط به دمای ۴۰ درجه سانتی گراد و سرعت جابجایی هوای ۱/۵ متر بر ثانیه با مقدار تقریبی ۱/۲۷ میلی‌لیتر بدست آمد. این امر ناشی از فرار برخی از مواد مؤثره گیاه در طول خشک کردن با دمای بالا می‌باشد. همچنین در طول فرایند خشک

پایین نسبت به دماهای بالاتر بیشتر بود، به طوری که افزایش سرعت جابجایی هوای ورودی از ۱ تا ۲ متر بر ثانیه سبب کاهش مدت زمان خشک کردن گیاه ترخون شد. این نتیجه با نتایج بدست آمده بر روی زرشک، آویشن، یونه و نعناع و همچنین در مورد خشک کردن لایه نازک گیاهان دارویی مطابقت دارد (Cremasco, 2003; Rohloff *et al.*, 2005; Karami *et al.*, 2017a,b; Blanco *et al.*, 2002).

به عبارت دیگر تأثیر سرعت جابجایی هوا بر مدت زمان خشک کردن در دماهای پایین بیشتر است؛ به طوری که این نتیجه با نتایج سایر محققان مطابقت دارد (Aghbashlo *et al.*, 2009a,b; Karami *et al.*, 2017a,b). مدل Aghbashlo و همکاران (۲۰۰۹a,b) منحنی خشک شدن گیاه ترخون را در سه سرعت ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه با شاخص آماری R^2 ، به ترتیب برابر با ۰/۹۹۹، ۰/۹۹۸ و ۰/۰۰۰۰۵۲، به ترتیب برابر با ۰/۰۰۰۰۶۹، ۰/۰۰۰۰۱۲۳ و شاخص آماری RMSE به ترتیب برابر با ۰/۰۰۰۵۳۱، ۰/۰۰۰۲۶۴۸، ۰/۰۰۰۱۲۸۱، نسبت به مدل های دیگر بهتر برآورد کرد که این نتیجه با نتایج سایر محققان تطابق دارد (Aghbashlo *et al.*, 2009a,b; Karami *et al.*, 2017a,b). حداکثر مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر در سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه و دمای هوای ورودی ۷۰ درجه سانتی گراد برابر با $10^{-1} \times 2/74$ (مترمربع بر ثانیه) بدست آمد. همچنین، حداقل مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر در سرعت هوا ۱ متر بر ثانیه و دمای هوای ورودی ۴۰ درجه سانتی گراد برابر با $10^{-1} \times 1/34$ (مترمربع بر ثانیه) بدست آمد. بنابراین به نظر می رسد D_{eff} با افزایش دمای هوا و سرعت هوا (انتقال سریع آب در دماهای بالاتر) به دلیل انتقال جرم بیشتر افزایش یافته است. البته بیشترین ضریب پخش رطوبت مؤثر مربوط به بالاترین دما می باشد. دلیل وقوع این مسئله تأثیر بارز دما و سرعت هوا در ایجاد جنبش مولکولی و مکش سطحی بیشتر و افزایش ضریب مذکور می باشد. نتایج مشابه بدست آمده در سایر پژوهش های انجام شده در مورد دیگر محصولات کشاورزی هم مشاهده شد (Doymaz, 2014; Kaveh *et al.*).

منابع مورد استفاده

- Aghbashlo, M., Kianmehr, M. and Samimi-Akhijahani, H., 2009a. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of berberries (*Berberies vulgaris*). Journal of Food Process Engineering, 32(2): 278-293.
- Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., Khani, S. and Ghasemi, M., 2009b. Mathematical modelling of thin-layer drying of carrot. International Agrophysic, 23(4): 313-317.
- Akpinar, E.K., Bicer, Y. and Cetinkaya, F., 2006. Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun. Journal of Food Engineering, 3: 308-315.
- Alibas, I., 2006. Characteristics of chard leaves during microwave, convective and combined microwave-convective drying. Drying Technology, 24(11): 1425-1435.
- Amiri Chayjan, R. and Kaveh, M., 2014. Physical parameters and kinetic modeling of fix and fluid bed drying of terebinth seeds. Journal of Food Processing and Preservation, 38(3): 1307-1320.
- AOAC., 1984. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists Press, Washington, USA.
- Arslan, D. and Ozcan, M.M., 2008. Evaluation of drying methods with respect to drying kinetics, mineral content and colour characteristics of rosemary leaves. Energy Conversion Management, 49(5): 1258-1264.
- Blanco, M.C.S.G., Ming, L.C., Marques, M.O.M. and Bovi, O.A., 2002. Drying temperature effects in peppermint essential oil content and composition. Acta Horticulturae, 569: 95-98.
- Borah, A., Hazarika, K. and Khayer, S.M., 2015. Drying kinetics of whole and sliced turmeric rhizomes (*Curcuma longa* L.) in a solar conduction dryer. Information Processing In Agriculture, 2: 85-92.
- Cakmak, G. and Yildiz, C., 2011. The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar

- Midilli, A., Kucuk, H. and Yapar, Z., 2002. A new model for single layer drying. *Drying Technology*, 20(7): 1503-1513.
- Mirzaee, E., Rafiee, S. and Keyhani A., 2010. Evaluation and selection of thin-layer models for drying kinetics of apricot (cv. NASIRY). *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 12(2): 111-116.
- Nasiri, A., 2011. Effect of temperature and velocity of air drying on small amounts of essential oil extracted from thyme and peppermint. Master's Thesis, University of Tehran, Iran.
- Omidbaigi, R., 2009a. Production and Processing Of Medicinal Plants (Vol. 2). Astan Quds Razavi, 438p.
- Omidbaigi, R., 2009b. Production and Processing of Medicinal Plants (Vol. 3). Astan Quds Razavi, 400p.
- Panchariya, P.C., Popovic, D. and Sharma, A.L., 2002. Thin-layer modeling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering*, 52: 349-357.
- Piga, A., Usai, A., Marchetti, M., Foddai, M., Del Caro, A., Meier, H.P., Onorati, V. and Vinci, F., 2007. Influence of different drying parameters on the composition of volatile compounds of thyme and rosemary cultivated in Sardinia. Proceedings of the 3rd CIGR Section VI International Symposium on Food and Agricultural Products, Naples, Italy, 24-26. September.
- Rodriguez, I., Clemente, G., Sanjuan, N. and Bon, I., 2014. Modelling drying kinetics of thyme (*Thymus vulgaris* L.): theoretical and empirical models, and neural networks. *Food Science and Technology International*, 20: 13-22.
- Rohloff, J., Dragland, S., Mordal, R. and Iversev, T.H., 2005. Effect of harvest time and drying method on biomass production, essential oil yield, and quality of peppermint (*Mentha piperita* L.). *Agricultural and Food Chemistry Journal*, 53: 4143-4148.
- Verma, L.R., Bucklin, R.A., Endan, J.B. and Wraten, F.T., 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of A.S.A.E.*, 28: 296-301.
- Wang, C.Y. and Singh, R.P., 1978. A single layer drying equation for rough rice. *American Society of Agricultural Engineers*, ASAE paper No.: 78-3001.
- Yaldiz, O. and Ertekin, C., 2001. Thin layer solar drying of some different vegetables. *Drying Technology*, 19: 586-596.
- Yaldiz, O., Ertekin, C. and Uzun, H.I., 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of Sultana grapes. *Energy*, 26(5): 457-464.
- integrated collector. *Food and Bioproducts Processing*, 89: 103-108.
- Crank, J., 1975. *The Mathematics of Diffusion*. Clarendon Press, Oxford, 414p.
- Cremasco, M.A., 2003. Influence of fixed-bed drying on the saftrole content in essential oil from long pepper (*Piper hispidinervium* C. DC). Final Report, Fapespe Project, No. 00/12422-7.
- Doymaz, I., 2009. Thin-layer drying of spinach leaves in a convective dryer. *Journal of Food Process Engineering*, 32: 112-125
- Doymaz, I., 2011. Drying of thyme (*Thymus vulgaris* L.) and selection of a suitable thin-layer drying model. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35: 458-465.
- Doymaz, I., 2014. Thin-layer drying of bay laurel leaves (*Laurus nobilis* L.). *Journal of Food Processing and Preservation*, 38: 449-456.
- Doymaz, I., Tugrul, N. and Pala, M., 2006. Drying characteristics of dill and parsley leaves. *Journal of Food Engineering*, 3: 559-565.
- Guarte, R.C., 1996. Modelling the drying behaviour of copra and development of a natural convection dryer for production of high quality copra in the Philippines. Ph.D. dissertation, Hohenheim University, Stuttgart, Germany, 287.
- Henderson, S.M., 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE*, 17: 1167-1172.
- Karami, H., 2014. Design, construction and evaluation of hybrid dryer for medicinal plants. Master's Thesis, Razi University, Kermanshah, Iran.
- Karami, H., Rasekh, M. and Darvishi, Y., 2017b. Effect of temperature and air velocity on drying kinetics and organo essential oil extraction efficiency in a hybrid dryer. *Innovative Food Technologies*, 5(1): 65-75.
- Karami, H., Rasekh, M., Darvishi, Y. and Khaledi, R., 2017a. Effect of drying temperature and air velocity on the essential oil content of *Mentha aquatica* L. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 20(4): 1131-1136.
- Karathanos, V.T., 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39: 337-344.
- 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(6): 2045-2059.
- Kaya, A. and Aydin, O., 2009. An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. *Energy Conversion and Management*, 50: 118-124.

Kinetics mass transfer and modeling of tarragon drying (*Artemisia dracunculus* L.)

H. Karami^{1*} and M. Rasekh²

1*- Corresponding author, Ph.D. student, Department of Biosystems Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil Young Researchers and Elite Club, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran, E-mail: hamedkarami@uma.ac.ir

2- Department of Biosystems Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: January 2018

Revised: June 2018

Accepted: July 2018

Abstract

In this study, the thin layer drying kinetics of *Tarragon* (*Artemisia dracunculus* L.) was modeled in a hybrid dryer. Experiments were performed at four temperatures of 40, 50, 60, 70°C and three air velocities of 1, 1.5 and 2 m/s in the factorial arrangement based on a completely randomized design. According to the results of analysis of variance, the effect of drying air temperature and drying air velocity were significant at 1% probability level. However, the interaction effect of temperature and drying air velocity was not significant. The highest essential oil content was related to the temperature of 40°C and an air velocity of 1.5m/s with an approximate value of 1.27CC (v/w). With increasing temperature from 40°C to 70°C, the essential oil content decreased significantly. According to the obtained results, the Agbashlo *et al.* model could estimate the kinetic curve of tarragon drying better than other models. The effective moisture diffusivity values were achieved to be in the range of 1.34×10^{-10} - 2.74×10^{-10} m²/s.

Keywords: Essential oil, tarragon (*Artemisia dracunculus* L.), medicinal plants, effective moisture diffusivity, modeling.