

مطالعه تجربی سینتیک و مدل سازی خشک کردن برگ گیاه دارویی جعفری (*Petroselinum crispum* L.) و گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) با تاکید بر تثبیت و پایداری اسانس

An experimental study of drying kinetics and mathematical modeling in parsley (*Petroselinum crispum* L.) and coriander (*Coriandrum sativum* L.) leaves with an emphasis on the stabilization and sustainability of essential oils

محمدشاهین دانشمندی^{*۱}

۱. گروه تولیدات گیاهی، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، (نگارنده مسئول)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۶ - شناسانه برنمود رقی: 10.22092/mpt.2025.371304.1207

چکیده

دانشمندی، م. ش. . مطالعه تجربی سینتیک و مدل سازی خشک کردن برگ گیاه دارویی جعفری (*Petroselinum crispum* L.) و گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) با تاکید بر تثبیت و پایداری اسانس

نشریه علمی فناوری و گیاهان دارویی ایران، دوره ۷- شماره ۲- پیاپی ۱۳- پائیز و زمستان ۱۴۰۳ صفحه: ۴۳-۲۴

حذف رطوبت یکی از مراحل مهم پس از برداشت گیاهان دارویی می باشد که نقش کلیدی در حفظ کمیت و کیفیت مواد موثره آن دارد. در این تحقیق تاثیر روش های مختلف خشک کردن برای رسیدن به حد رطوبتی ۰/۱ وزن خشک گیاه و درصد اسانس گیاه دارویی جعفری (*Petroselinum crispum* L.) و گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) به سه روش غیر حرارتی (سایه، جریان هوای سرد، نور مستقیم خورشید و سایه آفتاب)، روشهای حرارتی (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد) و پرتوتابی (مایکروویو با توان ۹۰۰ وات) بر اساس طرح آماری کاملاً تصادفی در ۸ تیمار مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل مبین تاثیر معنی دار تیمارهای اعمال شده بر زمان خشک کردن جعفری و گشنیز بود ($P \leq 0.05$). کمترین زمان خشک کردن حرارتی در روش مایکروویو (به ترتیب ۴۰ و ۳۰ دقیقه در جعفری و گشنیز) و در روش غیر حرارتی توسط آفتاب مستقیم (۱۲۱ ساعت) حاصل شد. با این وجود بالاترین درصد اسانس در گیاه جعفری (۰/۱۴ درصد) و گشنیز (۰/۲۶ درصد) در روش سایه حاصل شد که اختلاف معنی داری با سایر تیمارها داشت. نتایج مدل سازی نشان داد در روش های خشک کردن حرارتی و غیر حرارتی به ترتیب توابع هندرسون و پاییس اصلاح شده و لگاریتمی برای گیاه دارویی جعفری و تابع هندرسون و پاییس اصلاح شده برای گشنیز بهترین برازش را داشتند. بر اساس نتایج مشخص شد خشک کردن برگ گیاه جعفری و گشنیز با استفاده از روش مایکروویو و آفتاب مستقیم از نظر حداقل زمان خشک کردن و روش سایه از نظر بازده کمی اسانس بر سایر روش ها ارجحیت دارد.

واژه های کلیدی: *Petroselinum crispum* L.، تابع هندرسون و پاییس اصلاح شده، تعادل رطوبتی،

خشک کن جریان هوای سرد، مدل سازی ریاضی

آدرس پست الکترونیکی نگارنده مسئول: daneshmandi@torbath.ac.ir

مقدمه

قرمز (Chen *et al.*, 2020)، لامپ حرارتی (Daneshmandi *et al.*, 2024) و فن آوری هانوین خشک کردن مانند خشک کن دی الکتریک (Adeyeye *et al.*, 2022)، خشک کن رادیو فرکانسی (Mao & Wang, 2023)، خشک کن فرادما (Neri *et al.*, 2021)، خشک کن اتمسفر اصلاح شده (Fang & Wakisaka, 2021) و فریز درایر (Wang *et al.*, 2025) برای حذف رطوبت محصولات کشاورزی و گیاهان دارویی و معطر معرفی شده است.

با این حال برای تشخیص و تعیین بهترین روش خشک کردن محصولات گیاهی نیاز به کمی سازی نتایج بدست آمده دارد. تاکنون آزمایشات متعددی برای مدل سازی رطوبت نسبی در گیاهان دارویی گزارش شده است (Alara *et al.*, 2018; Moradi *et al.*, 2020; Shreelavaniya *et al.*, 2021; Daneshmandi *et al.*, 2024). با شناسایی دقیق ترین مدل های توضیح دهنده سینتیک، خشک کردن که توسط داده های تجربی برازش می شوند، تجزیه و تحلیل تغییرات در رطوبت نسبی، تخمین مدت زمان خشک کردن و ارزیابی هزینه های مرتبط را امکان پذیر می کند. بدین ترتیب نتایج مدل سازی ریاضی می تواند در طراحی، فناوری و بهینه سازی ادوات و تجهیزات خشک کن های محصولات گیاهی و صنایع غذایی کمک شایانی نماید (Keneni *et al.*, 2019).

گیاه دارویی جعفری (*crispum* L) و گشنیز (*Petroselinum sativum* L) از جمله مهمترین گیاهان

بسیاری از محصولات گیاهی در مقایسه با محیط اطراف خود در زمان برداشت، رطوبت بالاتر و دمای پایین تری دارند. در نتیجه نیاز به برقراری تعادل با دمای محیط از طریق کاهش رطوبت میسر می گردد. رطوبت بیش از ۱/۰ وزن خشک می تواند تکثیر میکروارگانیزم های ساپروفیت را تسهیل کرده (Caceres *et al.*, 2002) و باعث ایجاد تغییرات بیوشیمیایی مضر در محصولات گیاهی شود (Basumatary *et al.*, 2022). در نتیجه، کاهش سریع و کنترل شده رطوبت گامی مهم در حفظ طولانی مدت مواد گیاهی است (Moratalla-López *et al.*, 2021). این فرآیند کاهش رطوبت باید به گونه ای اجرا شود که اثرات نامطلوب به ویژه بر متابولیت های ثانویه به حداقل برسد (Daneshmandi *et al.*, 2021). ترکیبات فرار مانند اسانس ها جزو حساس ترین متابولیت های ثانویه به فرایند خشک کردن و بخصوص دما میباشد (Chua *et al.*, 2019)، لذا کاهش محتوای رطوبتی باید به گونه ای انجام شود که کیفیت این ترکیبات تحت تنش های خشک کردن به حداقل خود برسد (Calixto, 2000).

امروزه روش های متنوعی از جمله روش های سنتی غیرحرارتی (Akhondi *et al.*, 2011)، خشک کن های حرارتی متداول مانند خشک کن قفسه ای، خشک کن بستر سیال، خشک کن کوره ای، خشک کن تونلی، خشک کن نواری، خشک کن دوار، خشک کن انرژی خورشیدی (Niazmand *et al.*, 2015; Daneshmandi *et al.*, 2021)، روش های پرتوتابی مانند مادون

تقسیم شده و برای خشک شدن آماده سازی گردید.

تعیین محتوای رطوبتی

محتوای رطوبتی بر اساس وزن خشک و برابر فرمول زیر محاسبه گردید. بدین منظور یک نمونه ۱۰ گرمی در دمای ۱۰۳ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت در آون خشک شد (AOAC, 2005):

$$M_e = \frac{W_1 - W_2}{W_2}$$

که در آن W_1 جرم اولیه محصول و W_2 جرم محصول پس از خشک شدن بود. برای تعیین میزان کاهش وزن تا سه رقم اعشار، از یک ترازوی دیجیتال (۰/۰۰۱ گرم) استفاده شد.

روش های خشک کردن

خشک کردن غیر حرارتی

روش های خشک کردن سایه، خشک کردن آفتابی، خشک کردن در سایه آفتاب (تشعشع غیر مستقیم) و سیستم جریان هوای سرد در نظر گرفته شد. در روش سایه، نمونه گیاهی بر روی یک سینی ضدزنگ^۶ و در مکانی به دور از آفتاب قرار داده شد و در روش آفتاب نمونه گیاهی در معرض تابش مستقیم آفتاب قرار داشت. به جهت ممانعت از تاثیر باد و گرد و غبار محیط، نمونه ها در مکانی شیشه ای که به جهت عبور جریان هوا دو طرف آن باز بود، قرار گرفت. در روش نور فیلتر شده خورشید، از مکانی مشابه با روش قبل استفاده شد که با توری سایه بان^۷ ۳۰ درصد پوشانده شده بود. در روش جریان

تیره چتریان^۱ می باشند که در پیکر رویشی آنها ترکیبات معطری مانند میریستیسین^۲، بتا-فلاندرن^۳ آلفاپینن^۴، لینالول^۵ وجود دارد (Mahleyuddin *et al.*, 2021; Bahramsoltani *et al.*, 2024). این گیاهان در صنایع غذایی، دارویی و آرایشی/بهداشتی کاربرد فراوان دارد (Wei *et al.*, 2019; Staropoli *et al.*, 2021).

تاکنون هیچ تحقیقی در خصوص روش های خشک کردن برگ گیاه دارویی جعفری و گشنیز گزارش نشده است، لذا هدف این پژوهش بررسی سینتیک خشک کردن و کمی سازی نتایج در گیاه دارویی جعفری و گشنیز و تعیین حصول بالاترین میزان اسانس است تا بر اساس آن مناسبترین روش خشک کردن بر اساس توابع ریاضی مشخص گردد.

مواد و روش ها

این آزمایش در دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تربت حیدریه اجرا شد. گیاهان فوق (حاصل از بذره های تولیدی شرکت تولید بذر عنبری) در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه کشت گردید و در نمو رویشی برداشت و به آزمایشگاه تخصصی گیاهان دارویی انتقال داده شد. از هر دو گیاه قسمت پهنک برگ تا دو سانتیمتری دم برگ آن از سایر اندام گیاهی جدا شده و به عنوان نمونه آزمایش در نظر گرفته شد. سپس محصول برداشت شده پس از توزین به صورت تصادفی به گروه های صد گرمی

۱. Apiaceae
۲. Myristicin
۳. β -phellandrene,
۴. b-pinene
۵. Linalool

۶. Stainless Steel

۷. Shade Net

با ۳۰۰ میلی لیتر آب دوبار تقطیر به عنوان حلال مخلوط شد و پس از ۳۰ دقیقه ماندگاری (جهت کاهش گرمای نهان^{۱۰} و آنتالپی تبخیر^{۱۱} بین نمونه/حلال) به کلونجر منتقل و اسانس گیری انجام شد. پس از پایان تقطیر، راندمان (بازده) اسانس نسبت به وزن گیاه خشک محاسبه گردید.

کمی سازی نتایج خشک کردن

بر اساس تجربیات قبلی (Caceres *et al.*، 2002; Daneshmandi *et al.*، 2021)، تحقیق حاضر بر اساس حد رطوبتی ۰/۱ درصد (وزن خشک) با استفاده از معادله زیر محاسبه گردید (Diamante & Munro, 1993):

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

جهت کمی سازی نتایج، ابتدا از ۱۰ تابع معرفی شده توسط Alibas و همکاران (۲۰۱۲) برای مدل سازی رطوبت نسبی در پاسخ به زمان استفاده شد. تناسب این مدل ها با خشک کردن لایه نازک گیاهان دارویی قبلا توسط Younis و همکاران (۲۰۱۸) در گیاه دارویی سیر، Karthikeyan و همکاران (۲۰۱۸) در گیاه دارویی زردچوبه و Moradi و همکاران (۲۰۲۰) در برگ نعناع مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر این اساس پس از بررسی اولیه توسط ابزار Solver، در نهایت ۵ تابع که همگرا معنی داری تری در تیمارهای حرارتی و غیرحرارتی نشان دادند انتخاب شد. جزئیات مربوط به این مدل ها در جدول ۱ ارائه شده است

هوای سرد^۸ نمونه گیاهی در معرض عبور جریان هوا با متوسط دمای ۲۵±۰/۵ تا ۲۸±۰/۵ درجه سانتی گراد قرار گرفت. میانگین جریان هوا با سرعت ۱/۴ متر بر ثانیه و حجم انتقال هوا ۱۸ متر مکعب در دقیقه بود که توسط بادنچ دیجیتال (Prova/AVM-07) به طور ثابت اندازه گیری شد (Velić *et al.*, 2004; Putra & Ajiwiguna, 2017). رطوبت نسبی محیط در روش های غیرحرارتی بین ۳۰ تا ۳۵ درصد بود. کاهش وزن در روش های غیرحرارتی هر یک ساعت یک بار توسط ترازوی ۰/۰۰۱ گرمی بررسی گردید (میانگین دما ۲۸±۲ درجه سانتی گراد).

خشک کن حرارتی

در روش های حرارتی از خشک کن حرارتی المنتی (با چهار المنت ۵۰۰ وات) در سه رنج دمایی ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد (Ratti, 2001) و روش پرتوتابی توسط مایکروویو با توان ۹۰۰ وات بررسی شد. شایان ذکر است توان های کمتر مایکروویو مورد ارزیابی اولیه قرار گرفت ولی از کارایی مناسبی برخوردار نبود و لذا از دستورکار آزمایش حذف شد. توزین نمونه ها هر ۵ دقیقه یک بار با ترازوی ۰/۰۰۱ گرمی دیجیتال تعیین گردید.

روش استخراج اسانس

پس از فرآیند خشک کردن محصول، استخراج اسانس به روش تقطیر با آب توسط کلونجر^۹، ۴ میلی لیتری به مدت ۳ ساعت و در شرایط کاملا یکسان انجام شد. بدین منظور ۵۰ گرم نمونه گیاهی خشک شده در فلاسک ۵۰۰

۱۰. Latent heat

۱۱. Enthalpy of Vaporization

۸. Cold Air Drying

۹. Clevenger

جدول ۱- توابع مورد بررسی جهت برازش داده های تجربی

No.	Model	Model name	Reference
(1)	$MR = a \exp(-kt) + c$	Logarithmic*	(Omid, 2006)
(2)	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midili	(Midilli et al . 2002)
(3)	$MR = a \exp(-kt) b \exp(-gt) c \exp(-ht)$	Modified Henderson and Pubis	(Sabouri et al , 2015)
(4)	$MR = \exp(-(kt)^n)$	Modified Page	(Wang et al., 2007)
(5)	$MR = \exp - (kt)n$	Modified page	(Overhults et al . 1973)
(6)	$MR = \exp (-kt)$	Newton	(Lewis, 1921)
(7)	$MR = \exp(-kt^n)$	Page	(Page, 1949)
(8)	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	Thompson	(Omid, 2006)
(9)	$MR = a \exp(k_0t) + b \exp(k_1t)$	Two terms	(Henderson, 1974)
(10)	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh	(Wang & Singh 1978)

MR: نسبت رطوبت، a, b, c, k, n: ضرایب مدل، t: زمان

*- به دلیل پرهیز از ذکر منابع غیر ضروری، تنها منابع مدل های کاربردی در این پژوهش فهرست شد

مربع کای به سمت صفر متمایل باشد و ضریب تبیین به سمت یک سوق پیدا کند، برازش مدل قویتر خواهد بود.

آنالیز آماری

این آزمایش در قالب طرح آماری کاملا تصادفی در هشت تیمار و سه تکرار توسط نرم افزار SAS Ver 9.2 آنالیز گردید. میانگین تیمارها با استفاده از آزمون چند دامنه دانکن در سطح ۵ درصد انجام پذیرفت. رسم شکل ها نیز توسط نرم افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

زمان خشک کردن

بر اساس نتایج مقایسه میانگین روند کاهش رطوبت گیاه دارویی جعفری تا رسیدن به محتوای رطوبتی ۰/۱ در روش های غیر حرارتی در سطح ۵ درصد معنی دار بود. بر این اساس روش های سایه، جریان هوای سرد، آفتاب غیرمستقیم و آفتاب مستقیم به ترتیب ۲۴۰، ۱۹۲، ۱۶۸ و ۱۲۱ ساعت برای خشک کردن محصول زمان نیاز داشت (شکل ۱). مدت زمان خشک کردن آفتاب مستقیم نسبت به روش سایه، جریان هوای سرد، و آفتاب غیرمستقیم

(مدل های برتر به صورت پررنگ در جدول مشخص است).

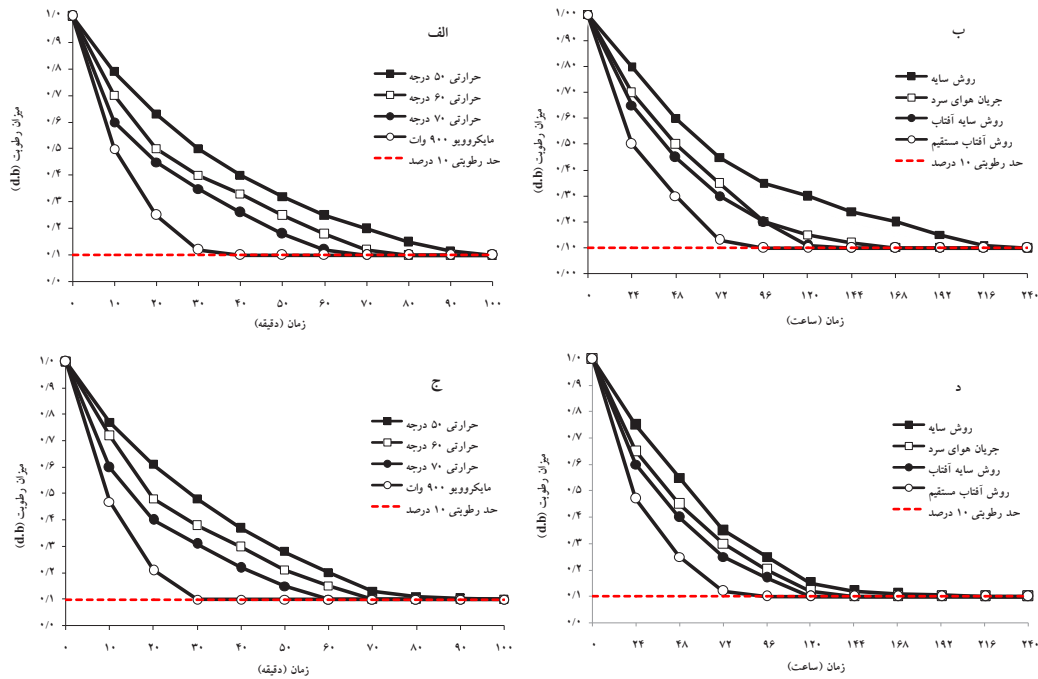
برازش توزیع های مورد نظر با استفاده از رویه PROC NLIN و نرم افزار SAS Ver 9.2 انجام شد (SAS, 2009). برای ارزیابی مدل ها و تعیین بهترین تابع در توصیف رطوبت نسبی در مقابل زمان، از ریشه میانگین مربعات انحراف (RMSE)، مربع کای (χ^2) و ضریب تبیین (R^2) مطابق معادله های زیر انجام شد (Sabouri et al, 2015):

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - m}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{exp})(MR_{pre,i} - MR_{pre})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp,i})^2 \sum (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})^2}}$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

که در این معادلات $MR_{pre,i}$ رطوبت مشاهده شده در نوبت i ام و $MR_{exp,i}$ رطوبت پیش بینی شده در نوبت i ام می باشد. N تعداد مشاهدات و m تعداد ثابت های بکار رفته در هر تابع می باشد. هر چه نتایج ریشه میانگین مربعات انحراف و



شکل ۱- روند تجمیعی کاهش رطوبت در گیاه دارویی جعفری (بالا) و گشنیز (پایین) در واکنش به روش های مختلف خشک کردن

ترتیب ۸۰، ۷۰ و ۶۰ دقیقه برای روش حرارتی ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه بود (شکل ۱). زمان حذف رطوبت در روش مایکروویو برای خشک کردن نمونه گشنیز ۳۰ دقیقه نیاز داشت که نسبت به روش های حرارتی به ترتیب ۲/۶، ۲/۳۳ و ۲ برابر کمتر بود.

لایه کوتیکولی برگ ها مانع اصلی تبادل رطوبت بین برگ و محیط است (Fernández *et al.*, 2017). نتایج نشان داد نفوذپذیری کوتیکول با افزایش دمای سطح برگ از ۱۵ درجه سانتیگراد به ۳۵ درجه سانتیگراد به طور متوسط تا ۲ برابر افزایش می یابد (Riederer, 2001 and Schreiber). این می تواند از عوامل اصلی افزایش سرعت حذف رطوبت در روش های حرارتی باشد. بر اساس نتایج تحقیق حاضر، به طور کلی گیاه دارویی گشنیز نسبت به گیاه جعفری در تمامی روش های حرارتی و غیرحرارتی زمان کمتری برای از دست دادن

به ترتیب ۱۶/۶۷ درصد، ۱۰ درصد و ۶/۶۷ درصد کمتر از سایر روش ها بود. این نتایج برای روش های خشک کردن گیاه دارویی گشنیز به ترتیب ۱۹۱، ۱۶۸، ۱۴۴ و ۱۲۰ ساعت بود (شکل ۱). روش آفتاب مستقیم نسبت به سایر روش ها به ترتیب ۱۴/۳، ۱۶ و ۲۰ درصد زمان کمتری برای حذف رطوبت نیاز داشت.

بر اساس نتایج مقایسه میانگین روند کاهش رطوبت گیاه دارویی جعفری در روش های خشک کردن حرارتی در سطح ۵ درصد معنی دار بود. خشک کن حرارتی در دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد به ترتیب ۹۰، ۸۰ و ۷۰ دقیقه و روش مایکروویو ۴۰ دقیقه نیاز داشت تا محصول به حد ۱۰ درصد رطوبت اولیه برسد (شکل ۱). مدت زمان خشک کردن توسط مایکروویو نسبت به روش های حرارتی به ترتیب ۲/۲۵، ۲ و ۱/۷۵ برابر کمتر بود. این نتایج برای روش های خشک کردن گیاه دارویی گشنیز به

۲/۱ و ۲/۸ برابر کمتر شد. درصد اسانس گشنیز نیز که توسط روش‌های حرارتی خشک شده بودند به ترتیب ۲، ۲/۳ و ۲/۸ برابر از روش سایه کمتر شد. نتایج تحقیقات سایر محققین نشان داد که مراکز تجمع اسانس از جمله غده‌ها^{۱۳} (Ebadi *et al.*, 2015; Mokhtarikhah *et al.*, 2020) و کرک‌ها^{۱۴} (Combrinck *et al.*, 2019) تحت تاثیر خشک کردن حرارتی آسیب می‌بینند ولی روش سایه به خوبی آنها را حفظ می‌کند. تجمع اسانس در گیاه دارویی جعفری تحت تاثیر عوامل مختلفی از جمله مدیریت تغذیه و زمان برداشت محصول (Mirmohammadmakki *et al.*, 2023) و حتی رقابت گیاهی (Ghorbanhashli *et al.*, 2024) قرار دارد. تاثیر عوامل اقلیمی، تغذیه و زمان برداشت بر درصد اسانس گیاه دارویی گشنیز نیز ثابت شده است (Bigonah *et al.*, 2014; Figueredo *et al.*, 2020). از سویی دیگر به طور کلی خشک کردن حرارتی بر کیفیت و کمیت اسانس گونه‌های مختلف تیره چتریان اثر منفی دارد. این مهم در گیاه دارویی زیره (Guo *et al.*, 2018) (*Cuminum cyminum*)، آنیسون (Bettaieb *et al.*, 2020) (*Pimpinella anisum*) و زنیان (Rebey *et al.*, 2020) (*Trachyspermum ammi*) (Sobatinasab *et al.*, 2024) تایید شده است که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد. از سویی دیگر روش مایکروویو علی‌رغم سرعت بالا خشک کردن، باعث کاهش قابل ملاحظه اسانس شد که از نقطه نظر آماری با سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری در پی داشت.

رطوبت نیاز داشت، به طور مثال مدت زمان خشک شدن گشنیز در روش آفتاب مستقیم و مایکروویو به ترتیب ۱/۲۵ و ۱/۳۳ برابر کمتر از گیاه جعفری بود. احتمالاً قطر کمتر برگ گشنیز نسبت به جعفری از عوامل افزایش سرعت خشک شدن می‌باشد. نتایج محققین نشان داد سطح ویژه برگ^{۱۲} (SLA) در گشنیز به طور میانگین ۲/۷ درصد کمتر از گیاه دارویی جعفری است (Dhakite *et al.*, 2024; Yang and Kim, 2020). رابطه بین وزن (قطر) برگ با زمان خشک شدن محصول توسط Huang و همکاران (۲۰۱۹) نیز تایید شده است.

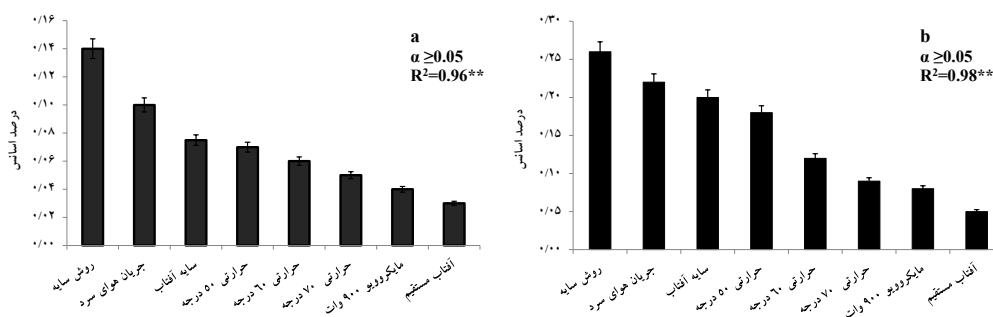
درصد اسانس

نتایج مقایسه میانگین نشان داد روش‌های مختلف خشک کردن بر درصد اسانس گیاه دارویی جعفری و گشنیز معنی‌دار است ($P \leq 0.05$). بهترین نتایج درصد اسانس هر دو گیاه در روش سایه حاصل شد (به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۲۶ درصد). در مقابل کمترین میزان اسانس استخراج شده برای گیاه جعفری و گشنیز در روش خشک کردن با آفتاب مستقیم بدست آمد (به ترتیب ۰/۰۳ و ۰/۰۵ درصد) (شکل ۲). بر اساس نتایج حاصل، روش‌های پرتوتابی و حرارتی گیاهان هدف باعث کاهش میزان اسانس شد، به عنوان مثال درصد اسانس جعفری و گشنیز در روش خشک کردن مایکروویو نسبت به روش سایه به ترتیب ۴/۶ و ۵/۲ برابر کمتر بود. همچنین درصد اسانس جعفری که به روش‌های حرارتی ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده بودند نسبت به روش سایه به ترتیب ۱/۴،

۱۳. Gland

۱۴. Trichome

۱۲. Specific Leaf Area



شکل ۲- تاثیر روش های مختلف خشک کردن بر درصد اسانس جعفری (a) و گشنیز (b)

برای جعفری و χ^2 و R^2 برای گشنیز ارزیابی دقیق تری نشان دادند.

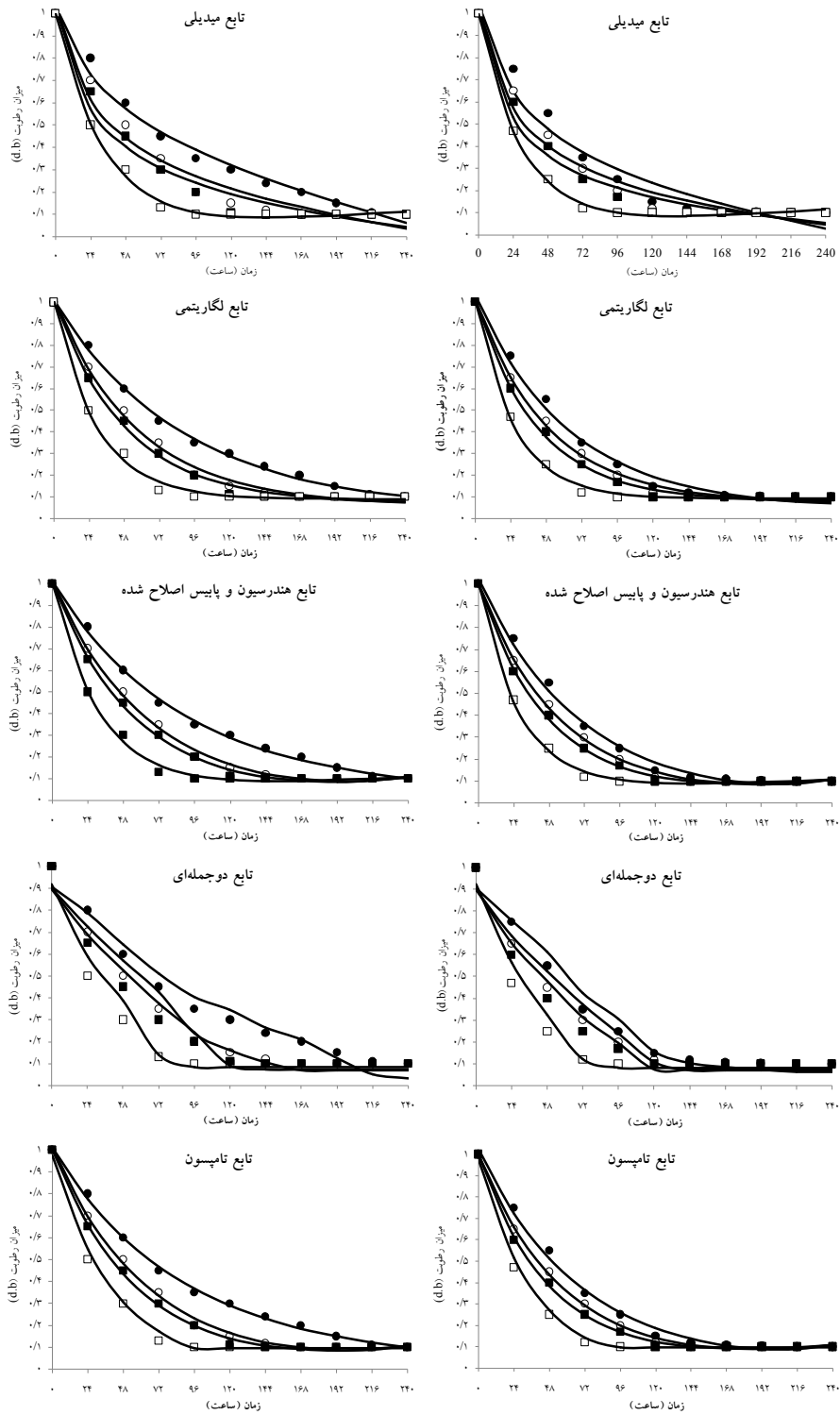
همچنین بهترین تناسب موجود برای خشک کردن حرارتی در جعفری به ترتیب توسط توابع لگاریتمی، هندرسون و پاییس اصلاح شده و میدیلی و برای گشنیز توسط هندرسون و پاییس اصلاح شده برآزش شد (جدول ۳). از میان سه شاخص ارزیابی توابع، ریشه میانگین مربعات انحراف (RMSE)، مربع کای (χ^2) و ضریب تبیین (R^2) در روش های حرارتی جعفری، RMSE و R^2 و برای گشنیز χ^2 نتایج بهتری را تعیین کرد. بر این اساس تابع هندرسون و پاییس اصلاح شده برآزش مناسبی برای اکثر تیمارهای حرارتی و غیرحرارتی نشان داد. این امر توانایی قوی این مدل برای تعیین کمیت تغییرات رطوبت نسبی گیاهان هدف در طول زمان را تایید میکند.

در طراحی خشک کن ها، خصوصیاتمانند حفظ ویژگی های ظاهری، کیفیت محصول، مدت زمان خشک کردن و مصرف انرژی اهمیت قابل توجهی دارد (Sinicio and Muir, 1996). مدل های ریاضی می توانند نقش مهمی در طراحی یا بهینه سازی سیستم های خشک کن صنعتی داشته باشند. هدف اصلی مدل سازی،

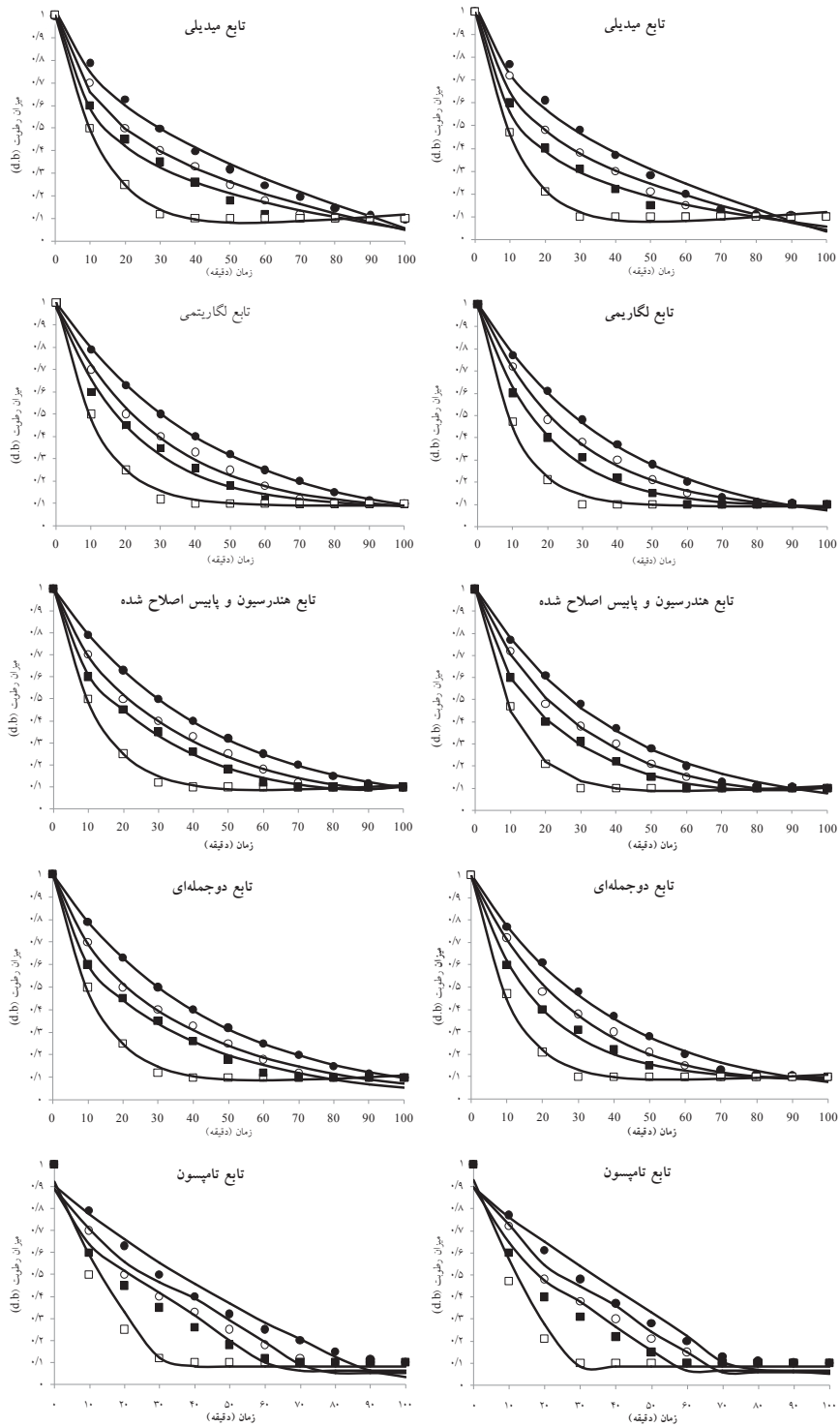
نتایج برخی محققان نشان داد این روش سرعت بالایی در فرآیند خشک کردن و حفظ رنگ اندام گیاهان معطر دارد، اما به علت کاهش شدید مواد فرار نمیتواند روش مناسب و قابل تعمیم به چنین گیاهانی باشد (Rao et al., 1998). در مقابل، برتری خشک کردن در سایه از نظر حفظ درصد اسانس در تحقیقات عظیم زاده و همکاران (Azimzadeh et al., 2015) در گل مکزیکی (*Agastache foeniculum*)، عبادی و همکاران (Ebadi et al., 2011) در مرزه (*Satureja hortensis*) و عزیزی و همکاران (Azizi et al., 2009) در گل بابونه (*Matricaria recutita*)، گزارش شده است.

کمی سازی نتایج خشک کردن

بر اساس نتایج مدل سازی ریاضی از بین ۱۰ مدل بررسی شده، ۵ مدل میدیلی، لگاریتمی، دوجمله ای، هندرسون و پاییس اصلاح شده و مدل تامپسون همگرایی معنی داری نشان دادند (شکل ۳ و ۴). بهترین تناسب موجود برای خشک کردن غیرحرارتی در جعفری به ترتیب توسط توابع هندرسون و پاییس اصلاح شده، لگاریتمی و دوجمله ای و برای گشنیز توسط هندرسون و پاییس اصلاح شده و دو جمله ای برآزش شد (جدول ۲). شاخص χ^2 و RSME



شکل ۳- برازش توابع ریاضی روشهای خشک کردن غیر حرارتی گیاه دارویی جمعرفی (سمت چپ) و گشنیز (سمت راست)
 ● روش سایه مشاهده شده، ○ روش جریان هوای سرد مشاهده شده، ■ روش آفتاب غیرمستقیم مشاهده شده،
 □ روش آفتاب مشاهده شده؛ خطوط بعد از نتایج مشاهدات مربوط به نتایج پیش بینی شده همان توابع است]



شکل ۴- برآزش توابع ریاضی روش های خشک کردن حرارتی گیاه دارویی جعفری (سمت چپ) و گشنیز (سمت راست) [● حرارتی ۵۰ درجه مشاهده شده، ○ حرارتی ۶۰ درجه مشاهده شده، ■ حرارتی ۷۰ درجه مشاهده شده، □ مایکروویو ۹۰۰ وات مشاهده شده؛ خطوط بعد از نتایج مشاهدات مربوط به نتایج پیش‌بینی شده همان توابع است]

جدول ۲- ارزیابی ریاضی توابع پرتو برای توصیف منحنی خشک شدن روش های غیر حرارتی گیاه دارویی جعفری و گشنیز بر اساس پارامترهای تعیین شده

مدل	جعفری			گشنیز		
	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2	R^2
تابع میدیلی						
روش سایه	۰/۰۶۰۴۸	۰/۰۰۵۷۴	۰/۹۹۳	۰/۳۶۰۹۹	۰/۲۰۴۷۸	۰/۹۷۹
روش جریان هوای سرد	۰/۳۸۷۰۴	۰/۲۳۵۴	۰/۹۸۳	۰/۴۵۶۶۸	۰/۳۲۷۷۳	۰/۹۸۶
روش سایه آفتاب	۰/۲۳۹۶۱	۰/۰۹۰۲۲	۰/۹۸۵	۰/۵۰۴۵۴	۰/۴۰۰۰۳	۰/۹۹۸
روش آفتاب مستقیم	۰/۱۱۲۹۸	۰/۰۲۰۰۶	۰/۹۹۸	۰/۱۷۶۲۲	۰/۰۴۸۷۹	۰/۹۹۹
تابع لگاریتمی						
روش سایه	۰/۰۰۰۰۴۹	۰/۳۰۶۸۲	۰/۹۹۸	۰/۸۳۷۶۶۲	۰/۱۰۷۱۹۵	۰/۹۹۵
روش جریان هوای سرد	۴/۱۸۲۵۹۳	۲/۴۰۵۴۴	۰/۹۹۷	۱/۲۵۸۶۹	۲/۱۷۸۴۳	۰/۹۹۸
روش سایه آفتاب	۰/۰۰۰۰۱۵	۳/۱۴۱۹۱	۰/۹۹۷	۴/۹۹۹۲۶	۳/۴۳۶۴۹	۰/۹۹۸
روش آفتاب مستقیم	۰/۰۰۰۰۲۰	۵/۴۴۸۷۶۳	۰/۹۹۷	۲/۹۲۴۶۷۲	۱/۱۷۶۱۳	۰/۹۹۸
تابع هندرسون و پاپیس اصلاح شده	۰/۰۰۹۳۸۶	۰/۰۰۰۱۲۱	۰/۹۹۸	۰/۳۸۰۰۴۸	۰/۱۹۸۶۰۱	۰/۹۹۷
روش سایه	۰/۱۷۱۰۵۱	۰/۰۴۰۲۳	۰/۹۹۸	۰/۰۵۶۵۶۹	۰/۰۰۴۴	۰/۹۹۹
روش جریانی هوای سرد	۰/۱۷۱۰۵۱	۰/۰۴۰۲۳	۰/۹۹۸	۰/۰۵۶۵۶۹	۰/۰۰۴۴	۰/۹۹۹
روش سایه آفتاب	۰/۰۷۴۴۳۷	۰/۰۰۷۶۱۸	۰/۹۹۸	۰/۰۱۴۵۵۹	۰/۰۰۰۲۹۱	۰/۹۹۹
روش آفتاب مستقیم	۰/۰۱۵۲۷۶	۰/۰۰۰۳۲۱	۰/۹۹۸	۰/۰۰۸۱۵۷	۰/۰۰۰۰۹۱	۰/۹۹۹
تابع دو جمله‌ای						
روش سایه	۰/۰۰۹۱۳۷	۰/۰۰۰۱۱۴	۰/۹۹۸	۰/۳۸۰۱۳۴	۰/۱۹۸۶۹	۰/۹۹۷
روش جریان هوای سرد	۰/۱۷۱۰۴۴	۰/۰۴۰۲۲۷	۰/۹۹۸	۰/۰۵۶۵۳۹	۰/۰۰۴۳۹۵	۰/۹۹۹
روش سایه آفتاب	۰/۰۷۴۳۹۸	۰/۰۰۷۶۱۸	۰/۹۹۸	۰/۰۱۴۵۹۱	۰/۰۰۰۲۹۲	۰/۹۹۹
روش آفتاب مستقیم	۱/۳۰۳۱۴۴	۱/۶۹۸۱۸۶	۰/۹۹۷	۰/۰۷۱۷۲۱	۰/۸۰۴۹۲۱	۰/۹۹۷
تابع تامپسون						
روش سایه	۰/۶۹۰۱۰۹	۰/۴۷۶۲۵۱	۰/۹۸۳	۰/۶۶۲۴۶۹	۰/۴۳۸۸۶۶	۰/۹۸۶
روش جریان هوای سرد	۰/۶۸۰۲۱۱	۰/۴۶۲۶۸۸	۰/۹۸۵	۰/۷۳۷۵۱۱	۰/۵۴۳۹۲۲	۰/۹۸۳
روش سایه آفتاب	۰/۷۴۴۷۵۷	۰/۵۵۴۶۶۳	۰/۹۸۳	۰/۴۷۰۷۷۹	۰/۵۴۸۷۵۴	۰/۹۸۳
روش آفتاب مستقیم	۰/۶۱۷۷۹۷	۰/۳۸۱۶۷۴	۰/۹۸۴	۰/۵۹۷۱۸۶	۰/۳۵۶۶۳۲	۰/۹۸۵

مدل‌های دمیر، میدیلی و وانگ و سانگ^{۱۶} برای روش‌های خشک کردن غیرحرارتی زعفران بهترین برازش را داشتند (Daneshmandi et al., 2024). همچنین تابع هندرسون و پاپیس اصلاح شده به عنوان معتبرترین مدل در بین ۱۳ مدل

بررسی تغییرات رطوبت نسبی در طول زمان و در نهایت پیش‌بینی زمان خشک شدن در محصول است (Chen and Lamb, 2007; Alibas, 2012; Corrêa et al., 2012). نتایج نشان داد توابع میدیلی و دمیر^{۱۵} برای خشک کردن حرارتی و

۱۶. Wang and Singh

۱۵. Demir

جدول ۳- ارزیابی ریاضی توابع برتر برای توصیف منحنی خشک شدن روش های حرارتی گیاه دارویی جعفری و گشنیز بر اساس پارامترهای تعیین شده

مدل	جعفری			گشنیز		
	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2	R^2
تابع میدیلی						
حرارتی ۵۰ درجه	۰/۰۵۵۵۴	۰/۰۰۴۸۴	۰/۹۹۶	۰/۱۰۲۰۵	۰/۰۱۶۳۶	۰/۹۹۱
حرارتی ۶۰ درجه	۰/۱۱۳۹۶	۰/۰۲۰۴	۰/۹۹۵	۰/۲۱۵۲۳	۰/۰۷۲۷۹	۰/۹۹۱
حرارتی ۷۰ درجه	۰/۱۷۱۱	۰/۰۴۶	۰/۹۹۴	۰/۲۸۸۳۳	۰/۱۳۰۶۴	۰/۹۹۳
مایکروویو با توان ۹۰۰	۰/۲۹۳۸۴	۰/۱۳۵۶۸	۰/۹۹۹	۰/۴۴۷۹۱	۰/۳۱۵۲۷	۰/۹۹۸
تابع لگاریتمی						
حرارتی ۵۰ درجه	۸/۸۷۶۳۱۳	۱/۰۸۳۳۴۷	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۴۱۶	۲/۳۸۵۹۸۲	۰/۹۹۸
حرارتی ۶۰ درجه	۰/۰۰۰۰۳۲۳	۱/۴۳۳۷۱۹	۰/۹۹۷	۰/۰۰۰۰۴۴۷	۲/۷۵۰۰۲	۰/۹۹۸
حرارتی ۷۰ درجه	۰/۰۰۰۰۴۷۳	۳/۰۷۸۷۵	۰/۹۹۵	۰/۰۰۰۰۳۴	۱/۶۵۶۲۰۳	۰/۹۹۸
مایکروویو با توان ۹۰۰	۰/۰۰۰۰۹۳۱	۱/۱۹۲۵۶۸	۰/۹۹۸	۰/۰۰۰۰۴۸	۳/۱۹۹۶۲۱	۰/۹۹۷
تابع هندرسون و پاییس اصلاح شده						
حرارتی ۵۰ درجه	۰/۱۴۳۸۸۱	۰/۰۲۸۴۶۵	۰/۹۹۹	۰/۱۷۰۶۸۱	۰/۰۴۰۰۵۶	۰/۹۹۸
حرارتی ۶۰ درجه	۰/۰۴۶۵۱۸	۰/۰۰۲۹۷۵	۰/۹۹۸	۰/۰۴۶۵۱۳	۰/۰۰۲۹۷۴/	۰/۹۹۸
حرارتی ۷۰ درجه	۰/۱۳۹۶۶۹	۰/۰۲۶۸۲۲	۰/۹۹۹	۰/۰۲۹۱۷۴۹	۰/۰۰۱۱۷	۰/۹۹۹
مایکروویو با توان ۹۰۰	۰/۰۲۰۵۲۷	۰/۰۰۰۵۷۹	۰/۹۹۸	۰/۰۲۰۲۰۴	۰/۰۰۰۵۶	۰/۹۹۸
تابع دو جمله ای						
حرارتی ۵۰ درجه	۰/۱۴۳۸۹۹	۰/۰۲۸۴۷۲	۰/۹۹۹	۰/۱۷۰۶۸۹	۰/۰۴۰۰۶	۰/۹۹۸
حرارتی ۶۰ درجه	۰/۱۶۹۹۷۷	۰/۰۳۹۷۲۷	۰/۹۹۸	۰/۰۶۴۸۲۴	۰/۰۰۵۷۷۷۹	۰/۹۹۸
حرارتی ۷۰ درجه	۰/۸۴۱۳۸۲	۰/۹۷۳۳۹۶	۰/۹۹۶	۰/۲۷۶۰۰۱	۰/۱۰۴۷۴۳	۰/۹۹۸
مایکروویو با توان ۹۰۰	۰/۰۲۰۵۵۹	۰/۰۰۰۵۸۱	۰/۹۹۸	۰/۰۲۰۴۰۴	۰/۰۰۰۵۷۲	۰/۹۹۸
تابع تامپسون						
حرارتی ۵۰ درجه	۰/۶۵۷۲۲۰۹	۰/۴۳۱۹۳۹	۰/۹۸۴	۰/۷۲۲۴۲۵	۰/۵۲۱۸۹۸	۰/۹۸۴
حرارتی ۶۰ درجه	۰/۸۲۱۷۸۹	۰/۶۷۵۳۳۷	۰/۹۸۱	۰/۸۲۷۷۳۶	۰/۶۸۵۱۴۷	۰/۹۸۲
حرارتی ۷۰ درجه	۰/۸۲۲۵۰۳	۰/۶۷۶۵۱۱	۰/۹۸	۰/۸۱۸۹۴۳	۰/۶۷۰۶۶۸	۰/۹۸۱
مایکروویو با توان ۹۰۰	۰/۵۷۲۶۲۲	۰/۳۲۷۸۹۶	۰/۹۸۶	۰/۵۴۵۶۴۸	۰/۲۹۷۷۳۲	۰/۹۸۶

از برداشت از جمله روش های خشک کردن محصول حائز اهمیت است. همچنین استنباط می شود روش های خشک کردن حرارتی بر گیاه دارویی گشنیز بیش از جعفری تاثیر منفی داشته باشد. بر این اساس چنانچه صرفاً هدف خشک کردن سریع این گیاهان مد نظر باشد میتوان استفاده از خشک کن های حرارتی و

ریاضی برای پیش بینی زمان خشک شدن گیاه دارویی سیر معرفی شد (Younis et al., 2018).

نتیجه گیری کلی

با توجه به جمیع نتایج حاصل استنباط می شود اسانس برگ هر دو گیاه دارویی مورد آزمایش نسبتاً پایینی دارند، لذا شرایط پس

پرتوتابی (مایکروویو) و حتی آفتاب مستقیم (غیرحرارتی) را قابل توجه دانست، ولی حفظ متابولیت‌های ثانویه و مواد معطر در این روش‌ها نتایج قابل قبولی را در پی نداشت. با توجه به داده‌های برآزش مدل هندرسون و پاییس اصلاح شده و مقادیر ضریب تبیین بدست آمده ($R^2 > 0.98$) می‌توان این مدل را برای شبیه‌سازی سینتیک خشک کردن جعفری و گشنیز توصیه کرد. همچنین روش خشک کردن در سایه علاوه بر حفظ محتوای کمی اسانس می‌تواند در کاهش اتلاف انرژی و هزینه‌ها فراوری نقش موثری ایفا کرده و روش کارآمد و قابل تعمیمی باشد، هرچند بررسی کیفی از جمله آنالیز خصوصیات شیمیایی و بیوشیمیایی اسانس آنها پس از خشک کردن نیز اجتناب ناپذیر است.

References

- Adeyeye, S.A.O., Ashaolu, T.J., and Babu, A.S. 2022. Food drying: A review. *Agricultural reviews*, 1(8), 1-8. <https://doi.org/10.18805/ag.R-2537>
- Akhondi, E., Kazemi, A., and Maghsoodi, V. 2011. Determination of a suitable thin layer drying curve model for saffron (*Crocus sativus* L) stigmas in an infrared dryer. *Scientia Iranica*, 18, 1397-1401. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.08.014>
- Alara, O.R., Abdurahman, N.H., Mudalip, S.K.A., and Olalere, O.A. 2018. Mathematical modeling of thin layer drying using open sun and shade of *Vernonia amygdalina* leaves. *Agriculture and Natural Resources*, 52(1), 53-58. <https://doi.org/10.1016/j.anres.2018.05.013>
- Alibas, I. 2012. Selection of a the best suitable thin-layer drying mathematical model for vacuum dried red chili pepper. *Journal of Environmental Biology*. 6, 161-170
- AOAC. 2005. Official methods of analysis (19th ed.). Gaithersburg, Mary-land, USA
- Azimzadeh, Z., Hassani, A., and Esmaili, M. 2015. Effect of different drying methods on the essential oil content and composition of Anise hyssop (*Agastache foeniculum* [Pursh] Kuntze). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 31(5): 789-800. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2015.103615> (In Persian)
- Azizi, M., Rahmati, M., Ebadi, T., and Hassanzadeh Khayyat, M. 2009. The effects of different drying methods on weight loss rate, essential oil and chamazolene contents of chamomile (*Matricaria recutita*) flowers. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 25 (2):182-192. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2009.7239> (In Persian)
- Bahramsoltani, R., Ahmadian, R., Daglia, M., and Rahimi, R. 2024. *Petroselinum crispum* (Mill.) Fuss (Parsley): an updated review of the traditional uses, phytochemistry, and pharmacology. *Journal of agricultural and food chemistry*, 72(2), 956-972. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c06429>
- Bettaieb Rebey, I., Bourgou, S., Ben Kaab, S., Aidi Wannes, W., Ksouri, R.,

- Saidani Tounsi, M., and Fauconnier, M.L. 2020. On the effect of initial drying techniques on essential oil composition, phenolic compound and antioxidant properties of anise (*Pimpinella anisum* L.) seeds. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(1), 220-228. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-002844>
- Bigonah, R., Rezvani Moghaddam, P., and Jahan, M., 2014. 'Effects of Intercropping on Biological Yield, Percentage of Nitrogen and Morphological Characteristics of Coriander and Fenugreek', *Iranian Journal of Field Crops Research*, 12(3), 369-377. <https://doi.org/10.22067/gsc.v12i3.42213>
- Caceres, A. 2000. Calidad de la material prima para la elaboracion de productos fitofarma ceuticas. Primer Congreso International FITO 2000 Por la investigacion, conservacion diffusion del conocimiento de las plantas medicinals. 27-30 Sep. 2000, Lima, Peru, 215 p.
- Calixto, J.B. 2000. Efficacy, safety, quality control, market and regulatory guidelines for herbal medicines (phytotherapeutic agents). *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 33(2): ۱۷۹-۱۸۹. <https://doi.org/10.1590/s0100-879x2000000200004>
- Chen, D., Xing, B., Yi, H., Li, Y., Zheng, B., Wang, Y., and Shao, Q. 2020. Effects of different drying methods on appearance, microstructure, bioactive compounds and aroma compounds of saffron (*Crocus sativus* L.). *LWT*, 120, 108913. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108913>
- Chen, Z., and Lamb, F.M. 2007. Analysis of the vacuum drying rate for red oak in a hot water vacuum drying system. *Drying Technology* 25, 497-500. <https://doi.org/10.1080/07373930601184064>
- Chua, L.Y., Chong, C.H., Chua, B.L., and Figiel, A. 2019. Influence of drying methods on the antibacterial, antioxidant and essential oil volatile composition of herbs: a review. *Food and Bioprocess Technology*, 12(3), 450-476. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2227-x>
- Combrinck, S., Bosman, A. A., Botha, B. M., du Plooy, W., McCrindle, R. I., and Retief, E. 2006. Effects of Post-Harvest Drying on the Essential Oil and Glandular Trichomes of *Lippia scaberrima* Sond. *Journal of Essential Oil*

Research, 18(sup1), 80–84. <https://doi.org/10.1080/10412905.2006.12067126>

- Daneshmandi, M.S., Dostegan, A.H., Mirzaeei, A., and Naseh, R. 2021. The different drying methods can alter the qualitative and quantitative characteristic of the Florence fennel (*Foeniculum vulgare* var. azoricum) essential oil. Iranian Medicinal Plants Technology, 4, 84-95. <https://doi.org/10.22092/MPT.2022.360312.1113> (In Persian)
- Daneshmandi, M.S., Sabouri, A., Kakhki, S., and Emami, S. 2024. Assessment of different drying methods with the stability of apocarotenoids and mucilage concentration in Saffron (*Crocus sativus* L.) stigmas based on mathematical modeling. Scientia Horticulturae, 338, 113684. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113684>
- Dhakite, P.A. 2024. Chemical Mutagenic Effect on the Growth, Physio ecological and Reproductive Parameter of *Coriander sativum* (Linnaeus). International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 13(12), 354-369. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2024.1312.038>
- Diamante, L.M., and Munro, P.A. 1993. Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. Sol. Energy, 51, 271-276. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90122-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90122-5)
- Ebadi, M.T., Azizi, M., Sefidkon, F., and Ahmadi, N. 2015. Influence of different drying methods on drying period, essential oil content and composition of *Lippia citriodora* Kunth. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2(4), 182-187. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2015.06.001>
- Ebadi, M.T., Rahmati, M., Azizi, M., and Hassanzadeh Khayyat, M. 2011. Effects of different drying methods (natural method, oven and microwave) on drying time, essential oil content and composition of Savory (*Satureja hortensis* L.). Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants, 26(4), 477-489. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2011.6663> (In Persian)
- Fang, Y. and Wakisaka, M. 2021. A review on the modified atmosphere preservation of fruits and vegetables with cutting-edge technologies. Agriculture, 11(10), 992. <https://doi.org/10.3390/agriculture11100992>

- Fernández, V., Bahamonde, H.A., Javier Peguero-Pina, J., Gil-Pelegri, E., Sancho-Knapik, D., Gil, L., Goldbach, H.E. and Eichert, T. 2017. Physico-chemical properties of plant cuticles and their functional and ecological significance. *Journal of Experimental Botany*, 68(19), 5293-5306. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx302>
- Figueredo, G., Özcan, M.M., Chalard, P., Özcan, M.M., Uslu, N. and Al Juhaimi, F. 2020. Chemical composition of essential oil of anise (*Pimpinella anisum*), cumin (*Cuminum cyminum*), fennel (*Foeniculum vulgare*) and parsley (*Petroselinum crispum* Mill.) seeds. *Journal of Agro Ailment Process Technol*, 26(1), 01-05.
- Ghorbanihashli, S., Diyanat, M. and Ghanbarijahromi, M. 2024. Effect of lambsquarters (*Chenopodium album*) competition on the yield and quality of parsley (*Petroselinum sativum* L.). *Journal of Plant Process and Function*, 13(60), 251-264. <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1965-fa.html>
- Guo, Y.R., An, Y.M., Jia, Y.X., and Xu, J.G. 2018. Effect of drying methods on chemical composition and biological activity of essential oil from cumin (*Cuminum cyminum* L.). *Journal of Essential Oil-Bearing Plants*, 21(5), 1295-1302. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2018.1538818>
- Henderson, S.M. 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE*. 17: 1167 1172.
- Huang, W., Ratkowsky, D.A., Hui, C., Wang, P., Su, J., and Shi, P. 2019. Leaf fresh weight versus dry weight: which is better for describing the scaling relationship between leaf biomass and leaf area for broad-leaved plants?. *Forests*, 10(3), 256. <https://doi.org/10.3390/f10030256>
- Karthikeyan, A.K., and Murugavelh, S. 2018. Thin layer drying kinetics and exergy analysis of turmeric (*Curcuma longa*) in a mixed mode forced convection solar tunnel dryer. *Renewable Energy*, 128, 305-312. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.061>
- Keneni, Y.G., Hvoslef-Eide, A.T., and Marchetti, J.M. 2019. Mathematical modelling of the drying kinetics of *Jatropha curcas* L. seeds. *Industrial Crops and Products*. 132, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.012>

- Mahleyuddin, N.N., Moshawih, S., Ming, L.C., Zulkifly, H.H., Kifli, N., Loy, M.J., Sarker, M.M.R., Al-Worafi, Y.M., Goh, B.H., Thuraisingam, S., and Goh, H.P. 2021. *Coriandrum sativum* L.: A review on ethnopharmacology, phytochemistry, and cardiovascular benefits. *Molecules*, 27(1), 209. <https://doi.org/10.3390/molecules27010209>
- Mao, Y. and Wang, S. 2023. Recent developments in radio frequency drying for food and agricultural products using a multi-stage strategy: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(16), 2654-2671. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1978925>
- Midilli, A., Kucuk, H., and Yapar, Z. 2002. A new model for single layer drying. *Drying Technology*. 20, 1503–1513. <https://doi.org/10.1081/DRT-120005864>
- Mirmohammadmakki, F., Gharachorloo, M., Ghavami, M., Abdossi, V., and Azizinezhad, R. 2023. Quantitative changes in essential oils contents of parsley (*Petroselinum crispum*) harvested in three consecutive months of spring. *Journal of Food and Bioprocess Engineering*, 6(2), 48-55. <https://doi.org/10.22059/JFABE.2023.365275.1154>
- Mokhtarikhah, G., Ebadi, M.T., and Ayyari, M. 2020. Qualitative changes of spearmint essential oil as affected by drying methods. *Industrial Crops and Products*, 153, 112492. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112492>
- Moradi, M., Fallahi, M.A., and Mousavi Khaneghah, A. 2020. Kinetics and mathematical modeling of thin layer drying of mint leaves by a hot water recirculating solar dryer. *Journal of Food Process Engineering*, 43(1), p.e13181. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13181>
- Niazmand, R., Sarasbi Jam-ab, M., Yeganeh-Zad, S., Rafe, A., and Faezian, A. 2015. *Nuts and Dried Fruit Science and Technology*. Jahad-Daneshgahi Mashhad Press. 284 p (In Persian)
- Omid, M., Yadollahinia, A.R., and Rafiee, S. 2006. December. A thin-layer drying model for paddy dryer. In *Proceedings of the International conference on Innovations in Food and Bioprocess Technologies*, 12th–14th Dec. AIT, Pathumthani, Thailand.
- Overhults, D.D., White, G.M., Hamilton, M.E., and Ross, I.J. 1973. *Drying*

- soybeans with heated air. Transactions of the ASEA 16, 195–200.
- Putra, R.N. and Ajiwiguna, T.A. 2017. Influence of air temperature and velocity for drying process. Procedia engineering, 170, 516-519. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.082>
- Rao, L.J., Singh, M., Raghavan, B., and Abraham, K.O. 1998. Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.): impact of drying on its flavor quality. Journal of Food Quality, 21(2), 107-115. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.1998.tb00508.x>
- Ratti, C., 2001. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. Journal of food engineering, 49(4), pp.311-319. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00228-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00228-4)
- Riederer, M. and Schreiber, L. 2001. Protecting against water loss: analysis of the barrier properties of plant cuticles. Journal of experimental botany, 52(363), 2023-2032. <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.363.2023>
- Sabouri, A., Sabouri, H., and Keramatlou, I. 2015. Analysis and Application of Nonlinear Regression in Agricultural Sciences, Horticulture and Natural Resources. Narenjestan Publication. 131.
- Sęczyk, Ł., Ozdemir, F.A., and Kołodziej, B. 2022. In vitro bioaccessibility and activity of basil (*Ocimum basilicum* L.) phytochemicals as affected by cultivar and postharvest preservation method—Convection drying, freezing, and freeze-drying. Food Chemistry, 382, 132363. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132363>
- Shreelavaniya, R., Kamaraj, S., Subramanian, S., Pangayarselvi, R., Murali, S., and Bharani, A. 2021. Experimental investigations on drying kinetics, modeling and quality analysis of small cardamom (*Elettaria cardamomum*) dried in solar-biomass hybrid dryer. Solar Energy, 227, 635-644. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.09.016>
- Sinicio, R., and Muir, W. 1996. Comparison of mathematical models to simulate aeration of wheat stored in Brazil. Journal of Agricultural Engineering Research. 64, 119–130. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0053>
- Sobatinasab, Z., Rahimmalek, M., Etemadi, N. and Szumny, A. 2024. Evaluation

- of different drying treatments with respect to essential oil components, phenolic and flavonoid compounds, and antioxidant capacity of ajowan (*Trachyspermum ammi* L.). *Molecules*, 29(14), 3264. <https://doi.org/10.3390/molecules29143264>
- Staropoli, A., Vassetti, A., Salvatore, M.M., Andolfi, A., Prigigallo, M.I., Bubici, G., Scagliola, M., Salerno, P. and Vinale, F. 2021. Improvement of nutraceutical value of parsley leaves (*Petroselinum crispum*) upon field applications of beneficial microorganisms. *Horticulturae*, 7(9), 281. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7090281>
- Velić, D., Planinić, M., Tomas, S., and Bilić, M. 2004. Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of food engineering*, 64(1), 97-102. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.09.016>
- Wang, P., Chen, X., Wei, X., Xiong, B., Pan, X., Bai, J., Li, Z., and Xu, X. 2025. Effects of different drying methods on physical properties and anthocyanin and volatile compound contents of black sweet corn (*Zea mays* L. Saccharata Sturt). *Frontiers in Nutrition*, 12, 1682022. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1682022>
- Wei, J.N., Liu, Z.H., Zhao, Y.P., Zhao, L.L., Xue, T.K., and Lan, Q.K. 2019. Phytochemical and bioactive profile of *Coriandrum sativum* L. *Food chemistry*, 286, 260-267. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.171>
- Yang, T., and Kim, H.J. 2020. Effects of hydraulic loading rate on spatial and temporal water quality characteristics and crop growth and yield in aquaponic systems. *Horticulturae*, 6(1), 9. <https://doi.org/10.3390/horticulturae6010009>
- Younis, M., Abdelkarim, D., and El-Abdein, A.Z. 2018. Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. *Saudi journal of biological sciences*, 25(2), 332-338. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.06.011>

An experimental study of drying kinetics and mathematical modeling in parsley (*Petroselinum crispum* L.) and coriander (*Coriandrum sativum* L.) leaves with an emphasis on the stabilization and sustainability of essential oils

Mohammad Shahin Daneshmandi^{1*}

1. Department of Plant Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Torbat Heydarieh, Torbat Heydarieh, Iran . (Corresponding author)

Received: November 2025 Accepted: November 2025 - DOI: 10.22092/mpt.2025.371304.1207

Abstract

Daneshmandi, M. S., An experimental study of drying kinetics and mathematical modeling in parsley (*Petroselinum crispum* L.) and coriander (*Coriandrum sativum* L.) leaves with an emphasis on the stabilization and sustainability of essential oils

Iranian Medicinal Plants and Technology, Vol 7, No. 2, 2025 5-6: 24-43(in Persian)

Abstract

Moisture removal after harvesting medicinal plants is a key stage that preserves the quantity and quality of their active ingredients. This study investigates the impact of various drying methods on drying duration, final moisture content, and essential oil percentage of parsley (*Petroselinum crispum* L.) and coriander (*Coriandrum sativum* L.). The methods included non-thermal approaches (shade, cold airflow, indirect sunlight, direct sunlight), thermal drying at 50, 60, and 70 °C, and an irradiation method using a microwave at 900 W. Drying continued until the moisture ratio reached 0.1 on a dry basis (MR = 0.1, d.b.). The treatments had a significant effect on drying time in both parsley and coriander. The microwave method produced the shortest thermal drying times (40 min for parsley and 30 min for coriander), and direct sunlight gave the shortest non-thermal time (121 h). In contrast, the shade method yielded the highest essential oil percentages, 0.14% in parsley and 0.26% in coriander, which differed significantly from the

Email address of the corresponding author: daneshmandi@torbath.ac.ir

other treatments. Mathematical modeling revealed that the modified Henderson and Pabis and logarithmic models provided the best fit for parsley and coriander, respectively, in both non-thermal and thermal drying scenarios. Considering all results, drying parsley and coriander leaves with a microwave and direct sunlight offered the shortest drying time, whereas shade drying yielded the highest essential oil content; thus, the choice depends on the balance between speed and quantity goals in processing these aromatic herbs.

Keywords: *Petroselinum crispum* L., Cold air flow dryer, Modified Henderson and Pabis function, Mathematical Modeling, Moisture content