

## بررسی خشک‌کن ترکیبی هوای گرم - مایکروویو بر میزان گلیسیریزیک اسید عصاره ریشه شیرین بیان

فرزاد مهدیه بروجنی<sup>۱</sup>، رحیم ابراهیمی<sup>۲\*</sup>، بهرام حسین‌زاده سامانی<sup>۳</sup> و عبدالرحمان محمدخانی<sup>۴</sup>

### چکیده

استفاده از گیاهان دارویی، به دلیل عوارض جانبی کم‌تر نسبت به داروهای شیمیایی و ترکیبی، این روزها مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین مراحل فرآوری پس از برداشت در حوزه گیاهان دارویی، عصاره‌گیری است. اولین گام در تهیه عصاره، عملیات خشک‌کردن است. از این‌رو انتخاب بهترین روش و اعمال مناسب‌ترین شرایط برای خشک‌کردن یک محصول حائز اهمیت است. هدف از این انجام پژوهش بهره‌مندی از شیوه نوین خشک‌کن ترکیبی هوای گرم- مایکروویو، در فرآیند خشک‌کردن ریشه شیرین‌بیان و اثر آن بر محتوای گلیسیریزیک اسید عصاره آن است. طرح آزمایشات با استفاده از روش سطح پاسخ صورت گرفت و با کمک روش کروماتوگرافی مایع با عملکرد بالا (HPLC) میزان گلیسیریزیک اسید برآورد شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش توان از ۱۸۰ به ۳۶۰ وات، میزان گلیسیریزیک‌اسید افزایش یافت و به مقدار ۱۴/۰۳ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک رسید. همچنین در دمای ۴۰ درجه سلسیوس میزان گلیسیریزیک اسید برابر با ۱۲/۸۱ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک است و در دمای ۵۰ درجه سلسیوس این مقدار برابر با ۱۴/۰۳ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک است، سپس در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به میزان ۱۴/۶۸ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک می‌رسد. به عبارتی با افزایش شدت توان مایکروویو و افزایش دما، میزان ماده موثره ریشه شیرین‌بیان، افزایش یافته‌است، اما پس از عبور از یک حد آستانه، افزایش این دو متغیر باعث کاهش میزان گلیسیریزیک اسید شده است. نتایج بررسی و مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن ریشه شیرین‌بیان نشان داد که رابطه مدل پیچ، با میزان ضریب تعیین ۰/۹۹ و مقدار شاخص ارزیابی مربع کای ۰/۰۲۵، بهترین تطابق با داده‌های تجربی مربوط به روند خشک شدن را دارد. در این پژوهش میزان گلیسیریزیک اسید در دمای خشک‌شدن ۶۰ درجه سلسیوس در آون به بیشینه مقدار خود معادل با ۱۵/۵۴ رسیده است.

**واژه‌های کلیدی:** خشک‌کن، عصاره ریشه شیرین‌بیان، گلیسیریزیک اسید، گیاهان دارویی، مایکروویو.

ارجاع: مهدیه بروجنی ف. ابراهیمی ر. حسین‌زاده سامانی ب. و محمدخانی ع. ۱۴۰۲. بررسی خشک‌کن ترکیبی هوای گرم- مایکروویو بر میزان گلیسیریزیک اسید عصاره ریشه شیرین بیان. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۶: ۱-۱۱. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2022.13762.577>

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، شهرکرد.

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، شهرکرد.

۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، شهرکرد.

۴- دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

\* نویسنده مسئول: [rahim.ebrahimi@gmail.com](mailto:rahim.ebrahimi@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۸

## مقدمه

فرآیندهای پس از برداشت به دلیل تأثیر مستقیم بر کیفیت گیاهان دارویی و معطر، از اهمیت بالایی برخوردار هستند. تقریباً ۵۰٪ از محصولات باغی و دارویی در عملیات پس از برداشت محصول، به دلیل آلودگی‌های میکروبی، فرآیندهای طبیعی رسیدگی محصول و شرایط محیطی مانند گرما، خشکسالی و مدیریت نامناسب پس از برداشت از بین می‌روند (Ali et al., 2020).

یکی از فرآیندهای پس از برداشت گیاهان دارویی، خشک‌کردن است. این فرآیند پیچیده با انتقال همزمان گرما و جرم همراه است که به واسطه انرژی گرمایی اتفاق می‌افتد (Shen et al., 2020). خشک‌کردن یکی از مراحل مهم پس از برداشت گیاهان دارویی است که نقش مهمی در کمیت و کیفیت مواد موثره آن‌ها دارد. این فرآیند شامل حذف رطوبت با استفاده از عمل تبخیر تا رسیدن به یک آستانه خاص است تا بتوان فعالیت‌های آنزیمی، میکروارگانیسم‌ها و مخمرها در آن را متوقف نمود. خشک‌کردن گیاهان در شرایط مختلفی می‌تواند صورت گیرد. بنابراین انتخاب بهترین روش و اعمال مناسب‌ترین شرایط برای خشک‌کردن یک محصول حائز اهمیت است (Dikbasan, 2007).

از ساده‌ترین روش‌های خشک‌کردن، استفاده از روش طبیعی است، به طوری که پس از جمع‌آوری محصول، با استفاده از نور آفتاب در همان محل کاشت یا در سایه و یا مکان دارای تهویه مناسب، اندام‌های گیاهی موردنظر خشک می‌شوند (Oztekin & Martinov, 2007).

خشک‌کردن مایکروویو، در دهه گذشته، به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است و نه تنها در خشک‌کردن نمونه‌های مایع بلکه در انواع مختلفی از مواد جامد از جمله مواد غذایی، سبزیجات، میوه‌ها، مواد چوبی و سنگ معدن، کاربرد داشته است (Gao et al., 2019). اخیراً مایکروویو به دلیل مزایای مرتبط با اثرات گرمایش دی‌الکتریک، علاقه محققان را به عنوان منبع حرارتی غیرمعمول و جایگزین برای فرآوری زیست توده و پسماندها نیز جلب کرده است (Miccio et al., 2020).

روش خشک‌کردن مایکروویو به عنوان یک نوع گرمایش حجمی، یک ابزار مناسب برای رطوبت‌زدایی مواد غذایی و محصولات کشاورزی است (Shen et al., 2020). ویژگی‌های مورد نیاز در خشک‌کردن مواد غذایی، زمینه را

برای طراحی بهینه خشک‌کردن مایکروویو از نظر کیفیت محصول نهایی و بهره‌وری بالا از انرژی مایکروویو فراهم می‌کند (Xu et al., 2018).

تأثیر دما بر فرآیند خشک‌شدن مایکروویو و قابلیت زنده ماندن دانه‌های گل تاج خروس توسط Morenoa et al., (2022) بررسی شد. مشاهده شده است که افزایش دمای خشک‌کردن باعث کاهش همزمان زمان خشک شدن (از ۳۷۸ به ۱۲۶ دقیقه) و مصرف انرژی (از ۹/۰۷ به ۲/۶۱ مگاژول بر کیلوگرم) شده است (Morenoa et al., 2022).

از خشک‌کن مایکروویو و مایکروویو خلاء به عنوان جایگزینی برای روش خشک‌کردن همرفتی در فرآوری مالت جو توسط Carvalho et al. (2021) استفاده شده است. خشک‌کردن به شیوه سنتی ۴۸۰-۵۴۰ دقیقه زمان نیاز دارد در حالی که مایکروویو زمان خشک‌شدن را کاهش داده است. استفاده از خلاء منجر به کاهش دمای محصول در طول خشک شدن می‌شود. (Carvalho et al., 2021)

تأثیر خشک کردن با کمک مایکروویو تحت خلأ بر میزان خواص آنتی‌اکسیدان، آنتی‌بادی، ترکیبات فنولی و ترکیبات فرار گیاه رزماری توسط Ali et al. (2020) بررسی شد. نتایج ایشان نشان داد، روش متوالی که در ابتدا شامل پیش‌خشک‌کن همرفتی و سپس در مرحله پایانی مایکروویو تحت خلاء است، در مقایسه با خشک‌کن همرفتی دوره خشک شدن، کوتاه‌تر و مصرف انرژی کمتری داشته است. علاوه بر این، ماندگاری بالاتری از اجزای فرار نسبت به خشک‌کن مایکروویو تحت خلاء داشت (Ali et al., 2020).

در طی خشک‌کردن ورقه‌های سیب با مایکروویو توان بالا، نتایج نشان داد که خشک شدن آب میان‌بافتی توسط مایکروویو تأثیر زیادی بر ساختار میکروسکوپی بافت سیب دارد (Chen et al., 2021).

ریشه شیرین‌بیان دارای ترکیبات متعددی نظیر قندهای مختلف (تا ۱۸ درصد)، فلاونوئیدها، استرول‌ها، اسیدهای آمینه، صمغ، نشاسته، اسانس‌های روغنی و ساپونین‌ها است. عمده‌ترین و مهمترین ساپونین آن گلیسیریزیک اسید با فرمول  $C_{42}H_{62}O_{16}$  است. ساختار موجود در شکل ۱، از دو واحد اسید گلوکورونیک و یک مولکول اسید گلیسیرتینیک (آگلیکون) تشکیل و شیرینی آن ۳۰ تا ۵۰ برابر و در برخی موارد تا ۱۰ برابر ساکاروز گزارش شده

است (Rui Fan *et al.*, 2016).

شیرین‌بیان از خانواده لگومینوز و به شکل خودرو رشد می‌کند و از نوع *G.glabra* است. جنس و گونه گیاه شیرین‌بیان در اواخر فصل تابستان توسط گیاه‌شناس، مورد تأیید قرار گرفت؛ سپس در فصل پاییز، پس از آن که برگ‌های گیاه شروع به زرد شدن نمود، ریشه‌ها در سه قطر مورد نظر از خاک خارج شدند. پس از آن ریشه‌های مرطوب شیرین‌بیان از گل و لای تمیز و به قطعات کوچک‌تری تقسیم شدند. باتوجه به تأثیر اندازه قطر ریشه شیرین‌بیان بر میزان گلیسیریزیک‌اسید، به منظور دسته‌بندی صحیح و مستقل نمونه‌ها، قطر ریشه‌های شیرین‌بیان با استفاده از کولیس دیجیتال با دقت ۰/۱ میلی‌متر مورد اندازه‌گیری قرار گرفت و نمونه‌ها در گروه‌هایی با ابعاد مشابه تقسیم‌بندی شدند.

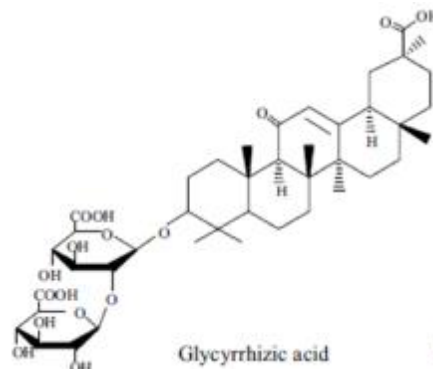
برای اندازه‌گیری محتوای رطوبت ریشه شیرین‌بیان، در ابتدا، ۱۰ گرم از نمونه‌ها پس از توزین، به مدت ۴۸ ساعت در درون آون و دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند (Karami *et al.*, 2013) و پس از خشک‌شدن، وزن خشک و نیز درصد رطوبت آن‌ها تعیین گردید. محتوای رطوبت نمونه‌ها با استفاده از معادلات (۱) و (۲) تعیین گردید (Hosseinzadeh Samani *et al.*, 2021).

$$M_{d.b} = \frac{W_w - W_d}{W_d} \quad (1)$$

$$M_{w.b} = \frac{W_w - W_d}{W_w} \quad (2)$$

مقادیر  $M_{d.b}$  محتوای رطوبت اولیه نمونه‌ها براساس وزن خشک نمونه،  $W_w$  وزن اولیه نمونه قبل از خشک‌شدن،  $W_d$  وزن نمونه خشک و  $M_{w.b}$  محتوای رطوبت اولیه نمونه‌ها براساس نمونه‌های تازه است.

به منظور اعمال امواج مایکروویو بر روی نمونه‌ها، از یک دستگاه مایکروویو خانگی Panasonic، مدل NN-GD371M استفاده شد. این دستگاه دارای سه سطح توان ۱۸۰، ۳۶۰ و ۵۴۰ وات و فرکانس بهره‌برداری ۲۴۵۰ مگاهرتز و ابعاد محفظه ۳۱۵×۱۷۸×۳۵۳ میلی‌متر است. همچنین به منظور تأمین حرارت، از ۸ المنت برقی ۱۰۰۰واتی که به صورت شعاعی مقابل فن دمنده نصب شده‌اند، استفاده گردید (شکل ۲). در شکل ۳، دستگاه خشک‌کن در محیط آزمایشگاه نشان داده شده است.



شکل ۱- ساختار اسید گلیسیریزیک (Rui Fan *et al.*, 2016)

گلیسیریزیک اسید دارای این ویژگی است که طعم آن در دهان به مدت طولانی باقی مانده و شیرینی آن به تدریج احساس می‌شود. این ویژگی موجب شده است که به عنوان شیرین‌کننده‌ای مجاز با کالری پایین و تشدیدکننده طعم، بدون مشارکت در بیماری‌ها و عوارضی چون دیابت و پوسیدگی دندان، در صنایع غذایی کاربرد یابد (Shabkhiz *et al.*, 2016). از طرفی این ترکیب دارای خواص فارماکولوژیک گسترده‌ای است که می‌توان به اثرات ضدالتهابی و ضدحساسیتی آن در آسم، ممانعت از ترشح اسید معده، بهبود زخم معده و اثنی عشر، بهبود اختلال عملکرد کبد، رفع اگزما و سایر بیماری‌ها اشاره کرد (Mousavi & Mosavi., 2019).

اکنون، با توجه به کاربرد گسترده ریشه شیرین‌بیان در صنایع غذایی و دارویی، تاکنون پژوهشی به منظور مقایسه و بهینه‌سازی روش‌های خشک‌کردن ریشه شیرین‌بیان و بررسی کیفیت و کمیت عصاره آن صورت نپذیرفته است. بنابراین به منظور کوتاه نمودن فرآیند خشک‌کردن و حفظ مواد مؤثره گیاه، استفاده از خشک‌کن ترکیبی هوای گرم-مایکروویو مورد بررسی قرار گرفته است.

### مواد و روش‌ها

به منظور انجام این پژوهش، ریشه شیرین‌بیان از مزارع اطراف شهر بروجن در استان چهارمحال و بختیاری، که دارای مختصات جغرافیایی ۵۱ درجه و ۱۷ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۵۷ دقیقه عرض شمالی و از مناطق سردسیر، با تابستان‌های معتدل است، تهیه گردید.



شکل ۳- دستگاه خشک کن



شکل ۲- شماتیک دستگاه خشک کن

مقدار گلیسیریزیک اسید با استفاده از مساحت سطح زیر اوج محاسبه گردید  
 برای بهینه سازی پارامترهای فرآیند خشک شدن ریشه شیرین بیان از روش سطح پاسخ ( Response Surface Method) و طرح باکس بنکن (Box-Behnken) در نرم افزار Design Expert 11 استفاده شد و سه متغیر مستقل توان مایکروویو، سرعت هوا و دمای هوا برای دستیابی به نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.  
 روش سطح پاسخ، مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که در بهینه‌سازی بسیاری از فرآیندهای مختلف به کار می‌رود. مزیت اصلی روش سطح پاسخ کاهش تعداد آزمایشات لازم جهت ارزیابی پارامترهای متعدد و برهم-کنش بین آن‌ها، ترسیم منحنی‌های پاسخ، تجزیه و تحلیل واریانس و تعیین نقطه بهینه است.

جدول ۱- سطوح متغیرهای مستقل انتخاب شده در روش سطح پاسخ

متغیرهای مستقل	سطوح کدبندی		
	-۱	۰	۱
توان مایکروویو (وات)	۱۸۰	۳۶۰	۵۴۰
سرعت هوا (متر بر ثانیه)	۰/۵	۱	۱/۵
دمای هوا (سلسیوس)	۴۰	۵۰	۶۰

به منظور بدست آوردن مقدار بهینه، از حل معادله (۳) استفاده خواهد شد:

$$Y_i = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ij} X_i^2 + e \quad (3)$$

که در آن  $\beta_0$ ،  $\beta_i$  و  $\beta_{ij}$  ضرایب ثابت،  $X_i$  و  $X_j$  متغیرهای مستقل در فرآیند و  $\varepsilon$  خطای تصادفی است (Hosseinzadeh Samani et al., 2015).

پس از این، مطابق شکل ۲، قطعات دستگاه موردنظر در کنار هم گرفتند. شایان ذکر است که در مجموعه تابلو برق، دستگاه تنظیم دور موتور دمنده، نمایشگر توان مصرفی، کابل برق و سنسور دما قرار دارند. همچنین به منظور اندازه‌گیری سرعت و رطوبت هوای ورودی و خروجی به محفظه خشک کن به ترتیب از دستگاه تست Testo425 و Testo625 استفاده شد.

برای عصاره‌گیری، یک گرم از پودر ریشه در ۸ میلی لیتر متانول ۷۰ درصد حل شد و سپس به مدت ۳۰ دقیقه روی لرزاننده با سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه، قرارگرفت و محلول به دست آمده از کاغذ صافی عبور داده و این عمل ۵ بار تکرار شد. تغلیظ نمونه‌ها در دستگاه تبخیرکننده چرخشی با درجه حرارت ۵۰ درجه سلسیوس تا زمانی که حجم نهایی عصاره به ۵ میلی لیتر برسد انجام گردید. سپس عصاره نهایی با ۵ میلی لیتر متانول مخلوط شد و به شیشه‌های تیره رنگ نشان‌دار انتقال یافت. انتقال یافت. همچنین از محلول استاندارد گلیسیریزین با خلوص ۷۵ درصد برای اندازه‌گیری میزان گلیسیریزین در دستگاه HPLC استفاده شد (Akhavan Tavakoli et al., 2016).  
 کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا ساخت شرکت Waters آمریکا شامل دو پمپ Water510 HPLC Pump و شیر تزریق، Water U6K، آشکارکننده UV با طول موج ۲۵۴ nm و ستون C18<sup>۳</sup> است. نوع کروماتوگرافی با توجه به نوع ترکیبات، کروماتوگرافی فاز معکوس انتخاب شد. فاز متحرک شامل مخلوط آب، استیک اسید و متانول با نسبت‌های مشخص و حجم تزریق ۱۰ میکرولیتر با دبی ۱/۵ میلی لیتر بر دقیقه بود. اوج مربوط به کروماتوگرام گلیسیریزیک اسید در زمان بازداری ۲۸/۳۸ دقیقه از ستون خارج شد که در شکل ۳ نشان داده شده است.

باتوجه به اینکه معمولاً مقدار  $M_e$  در مقایسه با  $M_0$  و  $M_t$  عدد کوچکی است، خطای ناشی از در نظر نگرفتن آن نیز بسیار جزئی است و در نتیجه می‌توان معادله (۴) را به شکل ساده‌تری نوشت:

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (۵)$$

برای ارزیابی بهترین مدل از سه معیار ضریب تعیین ( $R^2$ )، مجذور کای ( $\chi^2$ ) و میانگین مربعات خطای مربع (RMSE) استفاده شد (معادلات (۶) تا (۸)).

$$R^2 = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^m (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^m (MR_{exp,i} - MR_{ave})^2} \right) \quad (۶)$$

$$C^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2} \quad (۷)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i}) \right]^{1/2} \quad (۸)$$

در این معادلات  $MR_{exp}$ ، نسبت رطوبت حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاه و  $MR_{pre}$ ، نسبت رطوبت پیش‌بینی شده مدل است.  $N$  تعداد مشاهدات (داده‌ها) و  $n$  تعداد ثابت‌های استفاده شده در معادله است. ضرایب و ثابت‌های مدل‌های جدول ۲ در دماهای مختلف با استفاده از رگرسیون محاسبه شدند. بنابراین، مدل با مقادیر بالاتر از  $R^2$  و مقادیر پایین‌تر از  $\chi^2$  و RMSE بهترین مدل در نظر گرفته شد (Asghari et al., 2017).

## نتایج و بحث

در ابتدا نتایج مربوط به کروماتوگرافی عصاره ریشه شیرین‌بیان در شکل ۴، نمایش داده می‌شود. بر این اساس سه مقدار بیشینه اصلی برای کروماتوگرافی حاصل شده است. مقدار زمان ماند برای بیشینه اول معادل با ۲۰ دقیقه و مقدار جذب ۰/۲۷ است.

در شکل ۵، روند خشک‌شدن نمونه‌ها در طی مدت زمان انجام فرآیند نمایش داده شده است. بر این اساس در زمان ۲۰ دقیقه پس از شروع فرآیند خشک‌شدن، محتوای رطوبت به ۰/۳۹ می‌رسد. به عبارتی در ابتدای زمان خشک‌شدن تا رسیدن به زمان ۱۰۰ دقیقه، روند خشک‌شدن ریشه شیرین‌بیان سریع اتفاق می‌افتد و پس از آن به دلیل از بین رفتن رطوبت سطحی، روند از دست

در این پژوهش، مدل سینتیک خشک‌کردن براساس شاخص نسبت رطوبت (MR) گزارش می‌شود که علت آن کاهش پراکندگی و خوش فرم کردن داده‌ها است. بنابراین برای محاسبه نسبت رطوبت ریشه شیرین‌بیان در طول فرآیند خشک کردن از معادله (۴) استفاده می‌شود (Hosseinzadeh Samani et al., 2021):

جدول ۲- مدل‌های تجربی شناخته‌شده برای پیش‌بینی فرآیند خشک‌شدن لایه نازک محصولات کشاورزی (پیر نظری و همکاران، ۱۳۹۱)

نام مدل	معادله
نیوتون	$MR = \exp(-kt)$
بیج	$MR = \exp(-ktn)$
بیج اصلاح‌شده	$MR = \exp(-kt)n$
هندرسون و پاییس	$MR = a \exp(-kt)$
لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + c$
دوجمله‌ای	$MR = a \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t)$
دوجمله‌ای نمایی	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$
وانگ و سینگ	$MR = 1 + at + bt^2$
دیفوزیون	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
هندرسون و پاییس اصلاح‌شده	$MR = a \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t) + c \exp(-k_3t)$
میدیلی و همکاران	$MR = a \exp(-ktn) + bt$
ورما و همکاران	$MR = a \exp(-k_1t) + (1-a) \exp(-k_2t)$

\* مقادیر MR: نسبت رطوبت، t: مدت زمان خشک‌شدن، و  $a, c, n, k_1, k_2$  ثابت‌های تجربی در مدل‌های خشک‌شدن هستند.

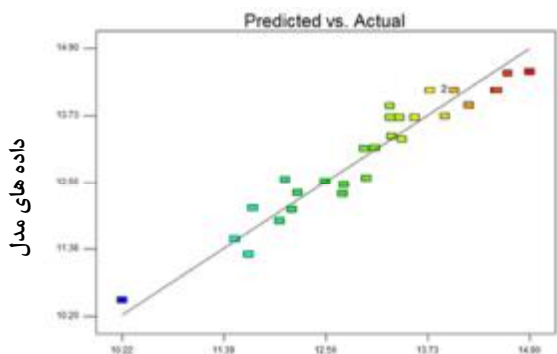
در مدل‌های موجود در جدول ۲، رطوبت نمونه حین خشک‌شدن به طور غیرمستقیم به دست می‌آید، سپس، تغییرات نسبت رطوبت در زمان خشک شدن نمونه نیز رسم شده و پس از آن مدل‌های ریاضی توسط نرم‌افزار MATLAB 2015 استخراج شد.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (۴)$$

مقادیر MR: نسبت رطوبت (بدون بعد)،  $M_t$ : محتوای رطوبت در هر لحظه از فرآیند خشک‌کردن (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)،  $M_e$ : محتوای رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)،  $M_0$ : محتوای رطوبت اولیه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد).

$$GL = 14.17 + 0.67A - 0.53B + 0.93C + 1.5 \times 10^{-3}AB - 0.77AC - 0.052BC - 0.89A^2 - 0.78B^2 - 0.41C^2 \quad (9)$$

در شکل ۶، پراکنش داده‌های واقعی در برابر داده‌های حاصل از مدل ارائه شده است که نشان‌دهنده دقت مناسب مدل برای تخمین میزان گلیسیریزیک اسید به‌ازای متغیرهای مستقل پژوهش است.

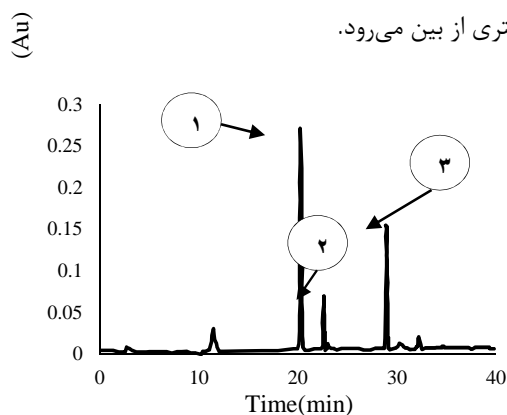


شکل ۶- برازش داده‌های واقعی در برابر داده‌های حاصل از مدل

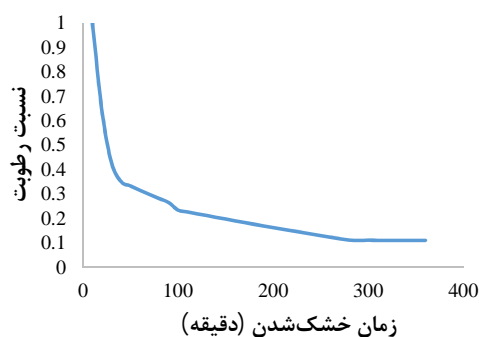
در جدول ۴، نتایج تجزیه و تحلیل واریانس مربوط به خروجی طرح آزمایشات سطح پاسخ نشان داده شده است. بر این اساس مدل درجه دوم بر داده‌های آزمایش برازش شد و با توجه به اینکه شاخص عدم برازش معنی‌دار نشد، مدل دقت مناسبی برای پیش‌بینی داشت. بر این اساس متغیرهای توان مایکروویو، سرعت هوا و دمای هوای در سطح ۱ درصد معنی‌دار شدند. ضریب حاصل‌ضرب بین دو متغیر توان مایکروویو-سرعت هوا و دمای هوا-سرعت هوا در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود و همچنین ضریب حاصل‌ضرب توان مایکروویو-دمای هوا در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد.

در شکل ۷، تأثیر توان مایکروویو و سرعت هوای گرم بر میزان گلیسیریزیک اسید نمایش داده شده است. بر این اساس در سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه، درصد گلیسیریزیک اسید برابر با ۱۳/۹۱۸۱ است، سپس با افزایش سرعت هوا، درصد گلیسیریزیک اسید افزایش می‌یابد و پس از آن در سرعت ۱ متر بر ثانیه، به ۱۴/۱۳۵۴ می‌رسد و سپس این میزان کاهش می‌یابد و کمتر از مقدار اولیه شده تا در نهایت در سرعت هوای گرم برابر با ۱/۵ متر بر ثانیه درصد گلیسیریزیک اسید برابر با ۱۲/۸۵ می‌گردد. به عبارتی

دادن رطوبت کاهش می‌یابد و رطوبت میان‌یافتی با سر کمتری از بین می‌رود.



شکل ۴- کروماتوگراف مربوط به عصاره شیرین بیان



شکل ۵- روند کاهش میزان رطوبت ریشه شیرین بیان در طی زمان خشک شدن

بررسی داده‌ها نشان داد که متغیرهای مستقل توان مایکروویو، سرعت هوا و دمای هوا دارای اثر معنی‌داری بر میزان گلیسیریزیک اسید ریشه شیرین بیان دارند. از تحلیل داده‌ها رابطه شماره ۸ استخراج شد. برای رابطه موردنظر ضریب تبیین و خطای استاندارد به ترتیب برابر با ۰/۹۳ و ۰/۴۲ حاصل شد.

$$GL = -17.99 + 0.045A + 5.75B + 0.67C + 1.69 \times 10^{-5}AC - 4.28 \times 10^{-4}AB - 0.01BC - 2.75 \times 10^{-5}A^2 - 3.13B^2 - 4.14 \times 10^{-4}C^2 \quad (8)$$

اکنون برای رتبه‌بندی تأثیر هر کدام از متغیرها، معادله نرمال شده مطابق معادله (۹) ارائه می‌شود. از این معادله استنباط می‌شود که دمای هوای گرم بیشترین تأثیر را در میزان گلیسیریزیک اسید دارد و ضریب بزرگتری را به خود اختصاص داده است. سپس متغیر توان مایکروویو و سرعت هوا به ترتیب در اولویت‌های بعدی قرار دارند.

افزایش سرعت هوا، میزان گلیسیریزیک اسید افزایش یافته‌است و در سرعت ۱ متر بر ثانیه و توان میکروویو ۳۶۰ وات به میزان ۱۳/۸۰ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک (mg/g DW) می‌رسد. با افزایش توان از ۱۸۰ وات میزان گلیسیریزیک اسید نیز افزایش یافته ولی در توان‌های بالا این روند نزولی شده است. دلیل این رفتار را می‌توان در تأثیر امواج میکروویو در تخریب سلول‌های محصول دانست که منجر به تضييع گلیسیریزیک اسید شده است.

هنگامی که سرعت هوای گرم از میزان ۱ متر بر ثانیه عبور می‌کند، میزان گلیسیریزیک اسید کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت هوا روند تغییرات میزان گلیسیریزیک اسید، در ابتدا تا سرعت ۱ متر بر ثانیه افزایش یافته و پس از این سرعت کاهش یافته است. دلیل این اتفاق را می‌توان این‌گونه بیان نمود که سرعت هوای زیاد باعث خنک‌کردن سطوح رویی ریشه شیرین‌بیان گردیده و باعث کاهش میزان گلیسیریزیک اسید شده است. بر اساس نتایج، با

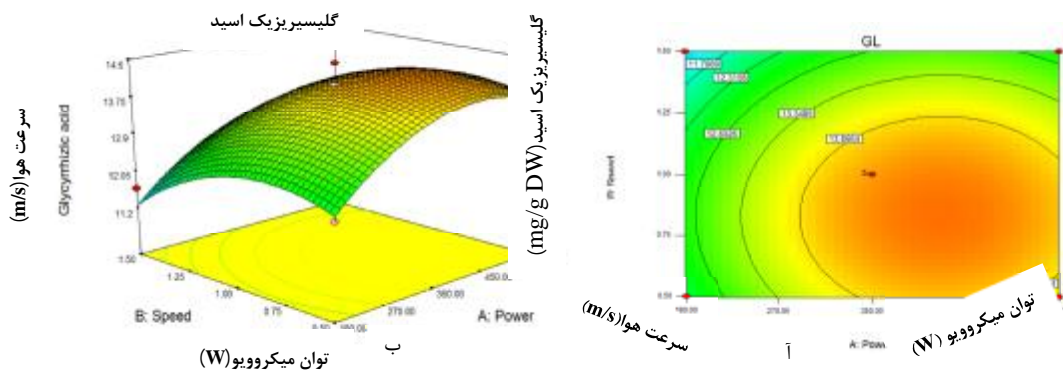
جدول ۴- تجزیه واریانس متغیرهای پژوهش

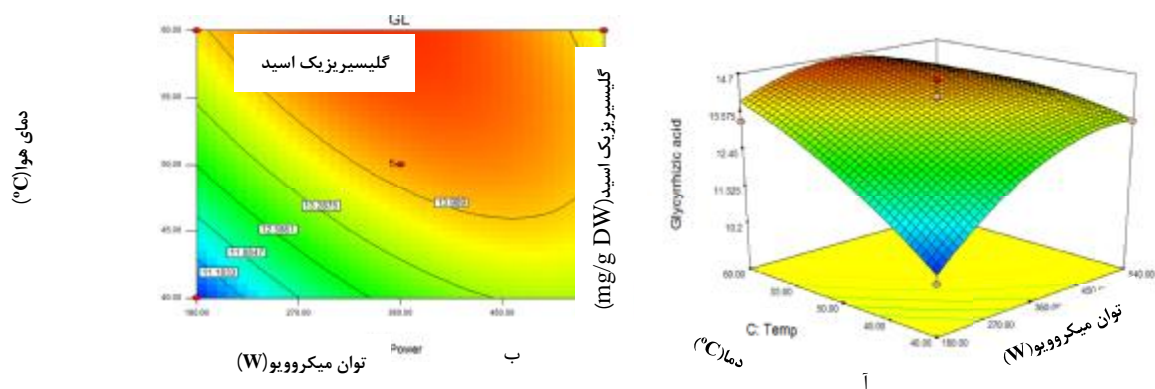
F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع
۱۲/۶۰*	۲/۱۱	۲۹/۶۰	۱۴	مدل
۳۲/۲۰*	۵/۴۰	۵/۴۰	۱	A-توان میکروویو
۲۰/۴۷*	۳/۴۳	۳/۴۳	۱	B- سرعت هوا
۶۲/۵۳*	۱۰/۴۹	۱۰/۴۹	۱	C- دمای هوا
۵/۵۴*۱۰ <sup>-۵</sup> *	۹/۳۲*۱۰ <sup>-۶</sup>	۹/۳۲*۱۰ <sup>-۶</sup>	۱	AB
۱۴/۱۹**	۲/۳۸	۲/۳۸	۱	AC
۰/۰۶۵*	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱	۱	BC
۲۷/۲۴*	۴/۵۷	۴/۵۷	۱	A <sup>2</sup>
۲۰/۵۶*	۳/۴۵	۳/۴۵	۱	B <sup>2</sup>
۵/۰۰*	۰/۸۴	۰/۸۴	۱	C <sup>2</sup>
	۰/۱۷	۲/۳۵	۱۴	Residual
۲/۵۳ <sup>ns</sup>	۰/۰۲۰	۲/۰۳	۱۵	Lack of fit
	۰/۰۸۰	۰/۳۲	۴	Pure error
		۳۱/۹۴	۲۸	Total

\*\* معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪، \* معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪، <sup>ns</sup> عدم معنی‌داری

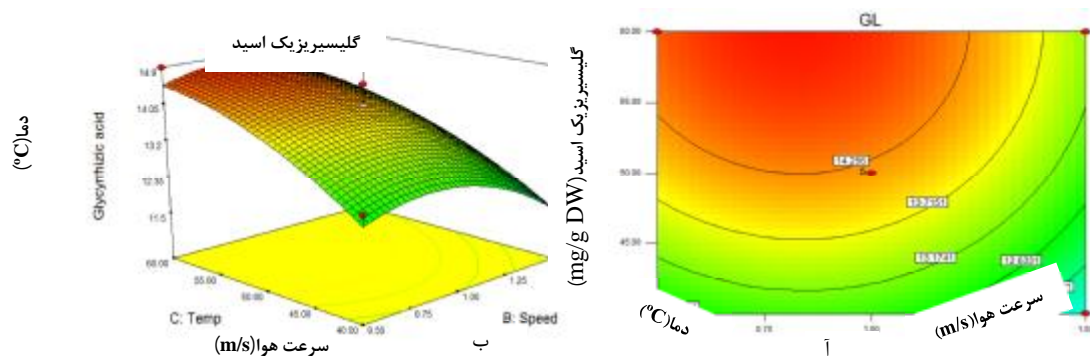
اساس محتوای اسید آلی (OA) و محتوای اسید اسکوربیک تکه‌های زالک خشک تأثیر بیشتری از دمای هوای گرم نسبت به سرعت هوای گرم و توان اولیه میکروویو داشته‌اند (Haiming et al., 2015).

در این راستا تحقیقات متعددی، اثر سرعت هوا و توان میکروویو بر خواص محصولات مختلف را گزارش کرده‌اند. پژوهشی بر روی بهینه‌سازی پارامترهای خشک‌کردن میکروویو همراه با هوای گرم بر روی برش‌های زالک با استفاده از روش سطح پاسخ صورت پذیرفته است. براین





شکل ۸- اثر دمای هوا و توان مایکروویو بر میزان گلیسیریزیک اسید. (آ) در حالت سه بعدی و (ب) ناحیه بندی شده



شکل ۹- اثر دمای هوا و سرعت هوا بر میزان گلیسیریزیک اسید. (آ) در حالت سه بعدی و (ب) ناحیه بندی شده

در مورد تأثیر دما بر میزان گلیسیریزیک اسید نیز، براساس نتایج تحلیل داده‌ها، با افزایش دما روند افزایش گلیسیریزیک اسید مشاهده شد. در دمای ۴۰ درجه سلسیوس میزان گلیسیریزیک اسید برابر با ۱۲/۸۱ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک و در دمای ۵۰ درجه سلسیوس این مقدار برابر با ۱۴/۰۳ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک است، سپس در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به میزان ۱۴/۶۸ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک می‌رسد.

در مورد مقایسه اثر دما بر میزان مواد مؤثره گیاهان دارویی، پژوهشی توسط Ali et al. (2020) بر روی گیاه رزماری مالزیایی صورت پذیرفت که نتایج نشان داد بالاترین درصد فرآور بودن، محتوای فنلی و فعالیت آنتی اکسیدانی از برگ‌های خشک‌شده به روش همرفتی در دمای ۶۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس بود، در حالی که بهترین اثرات ضد دیابتی و ضد پیری از برگ‌های خشک شده به روش انجمادی تشخیص داده شد.

در شکل ۸، تأثیر دمای هوا و توان مایکروویو بر میزان گلیسیریزیک اسید نمایش داده شده است. در این شکل با افزایش توان از ۱۸۰ تا ۳۶۰ وات میزان گلیسیریزیک اسید افزایش یافته و به مقدار ۱۴/۰۳ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک رسیده است. همچنین از طرف دیگر با افزایش دما نیز میزان گلیسیریزیک اسید افزایش یافته است. این بخش از نتایج پژوهش با نتایج (Rui Sun et al., 2013) تطابق کامل دارد. در ابتدای سطح توان ۱۸۰ وات، مقدار گلیسیریزیک اسید برابر با ۱۲/۶۰۲۳ است و هنگامی توان مایکروویو به میزان ۵۴۰ وات افزایش می‌یابد درصد گلیسیریزیک اسید ۱۳/۹۴۳۷ خواهد بود. نتایج حاکی از اثرگذاری توان مایکروویو بر میزان گلیسیریزیک اسید در طی فرآیند خشک کردن است، به نحوی که در میزان توان ۱۸۰ وات، میزان گلیسیریزیک اسید برابر با ۱۲/۶۰ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک است و در توان ۳۶۰ وات به میزان ۱۴/۰۳ می‌رسد. بر این اساس در سطح توان ۳۶۰ وات، بهترین درصد گلیسیریزیک اسید به دست آمده است.



۰/۸۱ متر بر ثانیه و دمای ۶۰ درجه سلسیوس را پیشنهاد داد تا مقدار گلیسیریزیک اسید به ۱۴/۸۴ برسد. بنابراین به منظور اطمینان از صحت مقادیر، آزمایش با مقادیر پیشنهادی تکرار شد. باتوجه به محدودیت‌های تجهیزات موجود جهت اعمال مقادیر بر متغیرهای پژوهش، در آزمایشگاه مقدار توان مایکروویو برابر با ۳۶۰ وات، سرعت هوا ۱ متربرثانیه و مقدار دمای هوا ۶۰ درجه سلسیوس تنظیم گردید. سپس مقدار گلیسیریزیک اسید برابر با ۱۴/۰۴ اندازه‌گیری شد.

همچنین در جدول ۳، نتایج مرتبط به تحلیل آماری مدل‌های تجربی مورد آزمون نمایش داده شده است. بر این اساس بیشترین میزان ضریب  $R^2$  برای مدل پیچ معادل با ۰/۹۹۵۲ محاسبه شده است.

براساس نتایج پژوهش حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۶) با افزایش توان مایکروویو، میزان اسانس گیاه مرزه بختیاری نیز کاهش یافته است.

در شکل ۹، تأثیر تغییرات سرعت هوا و دمای هوا بر میزان گلیسیریزیک‌اسید نشان داده شده است. بر این اساس با افزایش سرعت هوا، میزان گلیسیریزیک اسید ابتدا افزایش و سپس با گذر از میزان ۱ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. کمترین مقدار گلیسیریزیک اسید در سرعت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه برابر با ۱۲/۸۴ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک ماده است، همچنین با افزایش دما، میزان گلیسیریزیک اسید نیز افزایش یافته است.

به منظور انجام بهینه‌سازی، طبق شرایط مرزی که دستیابی به بیشینه مقدار برای درصد گلیسیریزیک‌اسید است، نرم‌افزار مقادیر توان ۳۵۰/۳۲ وات، سرعت هوای

جدول ۳- نتایج بررسی آماری روی مدل‌سازی محتوای رطوبتی و زمان خشک‌شدن در خشک‌کن ترکیبی هوای گرم-مایکروویو

مدل	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
نیوتون	۰/۹۸۴۵	۰/۱۰۴۵	۰/۰۳۲۵
پیچ	۰/۹۹۵۲	۰/۰۲۵۸	۰/۰۱۴۲
پیچ اصلاح‌شده	۰/۹۹۴۱	۰/۰۳۰۱	۰/۰۱۳۵
هندرسون و پاییس	۰/۹۸۱۲	۰/۰۳۲۴	۰/۰۲۸۶
لگاریتمی	۰/۸۹۲۴	۰/۰۵۴۷	۰/۰۳۹۸
دوجمله‌ای	۰/۸۹۷۴	۰/۰۵۲۱	۰/۰۳۸۲
دوجمله‌ای نمایی	۰/۹۲۴۷	۰/۰۴۹۱	۰/۰۲۱۶
وانگ و سینگ	۰/۹۸۸۹	۰/۰۳۵۴	۰/۰۲۰۴
دیفوزیون	۰/۹۹۴۱	۰/۰۲۸۹	۰/۰۱۳۸
هندرسون و پاییس اصلاح‌شده	۰/۹۷۱۳	۰/۰۳۹۹	۰/۰۲۸۹
میدیلی و همکاران	۰/۹۷۵۲	۰/۰۳۴۷	۰/۰۲۵۴
ورما و همکاران	۰/۹۷۰۲	۰/۰۳۰۸	۰/۰۲۸۹

### نتیجه‌گیری

گیاه شیرین‌بیان به واسطه دارا بودن متابولیت‌های ثانویه در ریشه خود، در دنیا حائز اهمیت بوده و مورد توجه صنایع دارویی، غذایی و حتی دخانیات قرار دارد. در این پژوهش تأثیر روش خشک‌شدن مایکروویو- هوای گرم بر مهمترین ماده موثره ریشه شیرین‌بیان، یعنی گلیسیریزیک اسید مورد بررسی قرار گرفته است. به طور کلی نتایج حاکی از آن است که روش خشک‌کردن مورد بررسی در این پژوهش بر میزان گلیسیریزیک اسید دارای اثر معنی‌دار است. براساس نتایج پژوهش افزایش بیش از اندازه توان مایکروویو باعث افزایش حرارت و کاهش زمان

خشک‌شدن اما باعث کاهش میزان گلیسیریزیک اسید شده است.

### سپاس‌گزاری

از حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه شهرکرد و مسئولین کارگاه گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم کمال تشکر و قدردانی را داریم.

### منابع

Aiqiang, C., Georges, EL A., Bin, L. & Rachid, B. (2021). Experimental study on moisture kinetics and microstructure evolution in apples during high power microwave drying

- methodology. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17(4): 837-846.
- Hosseinzadeh-Samani, B., Lorigooini, Z. & Fasihzadeh, Sh. (2017). Evaluation of the Effect of different microwave dryer power on the Qualitative and Quantitative properties of Essential oil of Bakhtiari Savory. *Journal of food science and technology*, 14: 145-155. (In Persian).
- Jaymand, K. & Rezaei. M. (2002). Measurement of Glycyrrhiza Glabra L. By High Performance Liquid Chromatography. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 14: 1-14. (In Persian).
- Karami, Z., Mirzaei, H., Emamjomeh, Z., Sadeghi Mahoonak A.R. & Khomeiri, M. (2016). Evaluation of Antimicrobial Activity of Licorice Root Extract in Orange Flavored Carbonated Soft Drink. *Journal of Iranian Food Science and Technology Reserch*, 8(2): 251-261. (In Persian).
- Karami. Z., Mirzaei. H., EmamJomeh. Z. & Sadeghi. A. (2013). Effect of harvest time on antioxidant activity of licorice root ethanolic extract. *Food Technology & Nutrition*, 10: 5-18.
- Michele M., Rocco P., Gennaro. C., Antonio. M. & Paola. B. (2020). Process Intensification of Tomato Residues Drying By Microwave Heating: Experiments and Simulation. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 156: 108082
- Morenoa. Á.H., Aguirreb. Á J., Hernández Maquedac R. G., Jiménezza. C.T & Miñoc. B. (2022). Effect of temperature on the microwave drying process and the viability of amaranth seeds. *Biosystems Engineering*, 215: 49-66
- Mousavi. Z.E. & Mosavi. M. (2019). The effect of fermentation by *Lactobacillus plantarum* on the physicochemical and functional properties of liquorice root extract. *LWT - Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.02.003>.
- Oztekin. S. & Martinov. M. (2007). Medicinal and Aromatic Crops: Harvesting, Drying, and Processing. CRC Press. ISBN 13: 9781439847343.
- Pirnazari, K., Ishaq Beigi A. & Sadeghi, M. (2011). Synthetic Investigation and Experimental Modeling of the Drying Process of Banana Blices. *The 7th National Congress of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering*. Shiraz University. Iran. (In Persian).
- Rui Fan. N. L., Honggao. X., Jun Xiang. K., Lei Wang. O. & Yanxiang. G. (2016). The mechanism of hydrothermal hydrolysis for glycyrrhizic acid into glycyrrhetic acid and process. *Journal of Food Engineering*, 292: 110362
- Akhavan Tavakoli. F., Heydarieh. N. & Khoshokhan. M. (2016). The Effect of Hydroalcoholic Extract of Glycyrriza Glabra Root on Anxiety in Gonadectomized Male Rats. *Journal Shahid Sadoughi Univ Med Sci*; 24(2): 138-46. (In Persian).
- Ali. A., Choo Choong. O., Bee Lin. C.a., Adam. F., Chien Hwa. C.g, Aneta. W., Igor Piotr T., Antoni S. & Jacek. Ł.(2020). Volatile and polyphenol composition, anti-oxidant, anti-diabetic and antiaging properties, and drying kinetics as affected by convective and hybrid vacuum microwave drying of *Rosmarinus officinalis* L. *Industrial Crops & Products*, 151: 1-13.
- Asghari, M R., Ebrahimi, R., Hosseinzadeh samani , B, & Ghanbarian. D. (2017). Modeling of quality parameters of white berry in the drying process using artificial neural network. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 4: 9-18. ( In Persian)
- Carvalho. G. R., Monteiro. R.L., Laurindo. J. B., Esteves. P. & Augusto. D. (2021). Microwave and microwave-vacuum drying as alternatives to convective drying in barley malt processing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 73: 1-11.
- Chen. A., Achkar. B., Liu. R. & Bennacer. F. (2021). Experimental study on moisture kinetics and microstructure evolution in apples during high power microwave drying process. *Journal of Food Engineering*, 292: 110362
- Dikbasan. T., (2007). Determination of effective parameters for drying of apples. the Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology. *Thesis for Master of Science in Energy Engineering*.
- Gao. X., Liu. X.P., Yan. X. & Li. H. (2019) Numerical analysis and optimization of the microwave inductive heating performance of water film, *International Journal of Heat Mass Transf*, 139: 17-30.
- Hosseinzadeh Samani. B., Khodadadi. A., Rostami. S. & Lorigooini. Z. (2021). Investigation and optimization of the effect of osmotic ultrasound drying pretreatment on qualitative properties and process energy consumption of *Cornus mas*. *Journal of Food Processinf and preservation*. 45(5): 1-17.
- Hosseinzadeh Samani. B., Khoshtaghaza. M. H., Minaee. S., & Abbasi. S. (2015). Modeling the Simultaneous Effects of Microwave and Ultrasound treatments on sour cherry juice using response surface

- glycyrrhetic acid 3-O-mono-b-D-glucuronide in subcritical water. *Food Chemistry*, 190: 912-921
- Rui Sun. M., Shoko. H., Eiji. G., Hiroki. S., Toshiya. S., Tadashi. K., Takako. O. & Kayo Yoshimatsu. B. (2013). Effects of Post-harvest Storage and Drying Temperatures on Four Medicinal Compounds in the Root of Chinese Licorice (*Glycyrrhiza uralensis*). *Environmental Control in Biology*, 51(4): 149-155,
- Shabkhiz, M, A., Ikani, M, H., Gul Mohammad, F. & Bashiri Sadri, Z. (2014). Optimizing the Extraction of Glycyrrhizic Acid From Licorice Root by Hot Water Under Pressure Method in Pilot Scale. *Journal of new technologies in the food industry*, 4: 11-21. (In Persian).
- Shabkhiz. M., Ikani. A., Gul Mohammad. F. & Bashiri Sadr. Z. (2016). Optimization of glycyrrhizic acid extraction from licorice root by hot pressurized method on a pilot scale. *Journal of New Food Technologies*, 8: 11-21. (In Persian).
- Shen. L., Zhu. Y., Liu. C., Wang. L., Liu. H., Kamruzzaman. M., Liu. C., Zhang. Y. & Zheng. X. (2020). Modelling of moving drying process and analysis of drying characteristics for germinated brown rice under continuous microwave drying. *biosystems engineering*, 195: 64-88
- Shi. O.E. & Mei. L.S. (2003). Pressurized hot water extraction of berberin, baicalein and glycyrrhizin in medicinal plants. *Analytica Chemica Acta*, 482: 81-89
- Xu. W., Song. C., Li. Z., Song. F., Hu. S. & Vijaya Raghavan. G.S. (2018). Temperature gradient control during microwave Combined with hot air drying. *Biosystems Engineering*, 169: 175e187.
- Yu Haiming. N., Zuo. C. & Xie. Q. (2015). Parameter optimization for microwave coupled with hot air drying process of hawthorn slices using response-surface methodology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8: 121-134.

