Research Article

Agricultural Engineering., 49(1) (2026) 19- 44

DOI: 10.22055/agen.2026.51625.1797

ISSN (P): 2588-526X

ISSN (E): 2588-5944

Use of electronic nose and image processing in drying type detecting of some herbal medicine

H.R Janjan [1], R. Amiri Chayjan[2*] and H. Bagherpour[3]

1. MSc Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
2. Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
3. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Received: 21 January 2026… Accepted: 17 May 2026 *Corresponding Author: amirireza@basu.ac.ir

Abstract

Introduction Basil, Thymus and Rosemarinus are members of the mint family, which have antibacterial, anti-inflammatory, antifungal, and antioxidant properties. Agricultural products are dried to prevent physical and chemical changes. Drying agricultural products and medicinal plants changes their aroma and color. The aim of this study was to determine the drying type of basil, thyme, and rosemary plants in three drying methods: infrared controlled atmosphere, infrared conventional atmosphere, and shade drying using electronic nose and image processing systems.

Materials and Methods After purchasing, all samples were stored in a refrigerator (4°C) until the experiments were performed. Three methods of controlled atmosphere infrared, normal atmosphere infrared and shade mathodes were used to dry the samples. Dehumidification time, moisture content, dehumidification rate, and effective diffusion coefficient were evaluated in three drying methods. An electronic nose system consisting of 15 sensors was used to detect odors of fresh and dried samples, and two PCA and SVM methods were used to analyze the data. A machine vision system equipped with a mobile phone camera and light source was used to capture images of fresh and dried plant leaves. The images were recorded in RGB color space format, which was converted to LAB color space using equations.

Results and Discussion According to the results obtained, the longest moisture removal time for Basil, Thymus and Rosemarinus samples in the shade drying method was 2700, 900, and 5520 minutes, respectively, and the shortest time in the infrared atmosphere control method was 550, 385, and 1300 minutes, respectively.The reason for this is that in the shade drying method, due to high relative humidity and ambient temperature, the rate of moisture removal from the samples is slow, while in the infrared controlled atmosphere dryer, the dehumidification process was accelerated due to the presence of a vacuum in the chamber and the use of infrared lamps due to the depth of penetration into the sample. The results showed that the highest dehumidification rates were for Basil and Rosemarinus samples in the infrared controlled atmosphere dryer and for

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Thymus samples in the infrared normal atmosphere dryer. The results showed that the first (PC-1) and second (PC-2) principal components were able to cover 53% and 25% of the variance of the input data variable, respectively, and distinguish all three samples well. The MQ2, TGS822, and TGS2610 sensors had the greatest impact on this component. In the discussion of differentiating the type of dryers according to the second main component as well as the loading diagram, the differentiating the type of dryers was done well and the sensors MQ4, MQ2, TGS813, TGS822 and TGS2610 had the highest performance respectively. Based on the results, in the support vector machine method, the training accuracy and classification accuracy for distinguishing samples were 100 and 75 percent, respectively, and based on the type of dryers, they were 41.67 percent and zero, respectively; Therefore, this method was used separately to classify the different drying methods of all three samples, and the training accuracy and classification accuracy were 100% and zero, respectively. The amount of color index G in the dry shade method is closer to fresh Basil and Thymus plants, which could be due to the ambient temperature. The amount of color index B in the normal atmospheric drying method is closer to fresh Basil and rosemarinus, which can be due to the use of infrared lamps, the duration of dehumidification and the pressure inside the chamber. On the other hand, the amount of index B in the dry shade method is closer to the fresh Thymus plant, which is probably due to the ambient temperature. The amount of R index in the normal atmospheric drying method is closer to fresh Rosemarinus plant, which can be due to the use of infrared lamp, the pressure inside the chamber and the time of dehumidification. In the controlled atmosphere dryer, the color index L* is closer to fresh Basil and Thymus plants, which may be due to the use of nitrogen gas, the duration of dehumidification, and infrared lamps. The amount of color index b* in the normal atmospheric drying method is closer to the fresh Basil plant than the dry shade method, which can be due to the use of an infrared lamp, the pressure inside the chamber and the duration of dehumidification. The a* color index in the normal atmosphere drying method is closer to that of fresh Rosemarinus than in the shade drying method.

Conclusion Compared to the other two methods, the use of infrared atmosphere control dryer has the shortest dehumidification time, the highest coefficient of explanation for Thymus and Rosemarinus samples, and the lowest for Basil samples, and also the highest effective diffusion coefficient. The accuracy of the PCA method for differentiating plants and dryers was 78%, while the training accuracy and classification accuracy of the SVM method for differentiating plants were 100% and 75%, respectively, and 100% and zero for the type of dryers of each plant, respectively. The indices of the two color spaces RGB and Lab depend on the drying conditions in dryers, such as temperature, dehumidification time, air pressure, and heat source. In the RGB color space, the color index R for Rosemarinus plants in the normal atmosphere drying method has less changes than the fresh plant. Also, the color index G for Basil and Thymus plants dried in the shade drying method has less changes than the fresh plant. On the other hand, the color index B for Basil and Rosemarinus plants dried in the normal atmosphere drying method has less changes than the fresh plant. In the Lab color space, the L* color index for Basil and Thymus plants in the controlled atmosphere drying method has less changes than the fresh plant, and the a* and b* color indices for Basil and Rosemarinus plants in the normal atmosphere drying method, respectively, have less changes than the fresh plant.

Acknowledgment The authors would like to thank the Bu-Ali Sina University for finantioal support of this research work.

Keywords: Electronic nose, Machine vision, Image Processing, Herbal medicinal, Drying

مقاله پژوهشی

استفاده از بینی الکترونیکی و پردازش تصویر در تشخیص نوع خشک‌کردن برخی گیاهان دارویی

حمیدرضا جانجان[۱]، رضا امیری چایجان[۲]*و حسین باقرپور[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۳- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۱

پذیرش نهایی: ۱۴۰۵/۰۲/۲۷

کلمات کلیدی:

بینی الکترونیکی،

ماشین بینایی،

پردازش تصویر،

گیاهان دارویی

خشک‌کردن

* عهده‌دار مکاتبات

Email: amirireza@basu.ac.ir

چکیده

گیاهان دارویی نقش بسزایی در جوامع امروزی دارند. مصرف روزافزون گیاهان دارویی به دلیل اهمیت بالای آن‌ها نیازمند خشک کردن است. به همین منظور باید از خشک‌کن و دمای مناسبی استفاده شود که بر کیفیت فیزیکی و شیمیایی مانند رنگ و رایحه‌ی آن کمترین تأثیر را بگذارد. هدف از این پژوهش، استفاده از بینی الکترونیکی و پردازش تصویر در تشخیص نوع خشک‌کردن گیاهان دارویی نظیر ریحان، آویشن و رزماری در سه روش مختلف خشک‌کردن: سایه خشک، کنترل اتمسفر مادون‌قرمز و نرمال اتمسفر مادون‌قرمز در دمای ۴۰ درجه‌ی سلسیوس و تغییرات رنگ و رایحه آن‌ها است. رایحه‌ی گیاهان خشک شده با استفاده از بینی الکترونیکی اندازه‌گیری شد. داده‌های به‌دست‌آمده از بینی الکترونیکی با استفاده از تکنیک‌های آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) تجزیه و تحلیل شدند. با توجه به نتایج به دست آمده، آنالیز مؤلفه‌های اصلی با دو مؤلفه‌ی PC-1 و PC-2 توانست ۷۸ درصد از واریانس داده‌ها را پوشش دهد. در مجموعه حسگرها، حسگرهای MQ2، TGS822 و TGS2610 به ترتیب بالاترین مقادیر ضریب لودینگ و حسگرهای TGS813 و MQ4 به ترتیب کمترین مقادیر این ضریب را به خود اختصاص دادند. بر اساس نمودار راداری رایحه‌ی ریحان و رزماری در دو روش خشک کردن سایه خشک و کنترل اتمسفر مادون‌قرمز نسبت به گیاه تازه دچار کمترین تغییرات شده ولی درباره‌ی گیاه تازه آویشن این موضوع فقط در روش سایه خشک صدق می‌کند. از سوی دیگر روش ماشین بردار پشتیبان توانست با دقت آموزش و طبقه‌بندی به ترتیب ۱۰۰ و ۷۵ درصد افتراق گیاهان و به ترتیب ۱۰۰ درصد و صفر، نوع خشک‌کن‌های هر گیاه را طبقه‌بندی کند. تصاویر

گیاهان تازه و خشک شده توسط ماشین بینایی ثبت گردید، سپس توسط نرم‌افزار Matlab 2017 با استفاده از تکنیک پردازش تصویر در دو فضای رنگی RGB و LAB مورد ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به نتایج به دست آمده دو روش سایه خشک و نرمال اتمسفر در فضای رنگی RGB و دو روش کنترل اتمسفر و نرمال اتمسفر در فضای رنگی LAB دچار کمترین تغییرات ظاهری نسبت به گیاه تازه شده‌اند. خشک کردن نمونه‌ها وابسته به شرایط خشک‌کن‌ها مانند دما، مدت زمان رطوبت‌زدایی، فشار هوا و منبع حرارتی بستگی دارد. درنهایت هر دو فضای رنگی توانستند نوع خشک‌کن‌های هر گیاه را نسبت به گیاه تازه تشخیص داده و آن‌ها را طبقه‌بندی کنند.

مقدمه

باوجود پیشرفت‌های فراوان در صنایع مختلف و همچنین صنعت داروسازی گیاهان دارویی به‌عنوان پرکاربردترین محصولات در این صنایع هستند (Dowlati et al., 2012). طبق آمار سازمان بهداشت جهانی حدود ۸۰ درصد از جمعیت کشورهای پیشرفته جهان برای مراقبت از سلامتی خود از گیاهان دارویی استفاده می‌کنند (Biabi et al., 2019).

گیاه ریحان بانام علمی باسیل (Basil) در جهان و ریحان در ایران شناخته می‌شود که از خانواده نعناعیان (Mentha) است (Simon, 2014). این گیاه در مناطق گرمسیری جنوبی و نیمه گرمسیری جنوب شرقی آسیا کشت می‌شود (Tanrıkulu et al., 2017). از ترکیبات ارزشمند موجود در این گیاه می‌توان به کارواکرول، متیل‌کاویکول، نفتا، فلاون، ویتامین‌ها، پلی‌ساکاریدها، آهن و پتاسیم و اشاره کرد (Zurpikar et al., 2023). این گیاه دارای خواص ضدالتهابی، ضدقارچی، ضدباکتریایی و آنتی‌اکسیدانی است (Therdthai and Zhou, 2009). در طب سنتی از این گیاه برای درمان بیمارهایی از قبیل تشنج، اسهال، صرع، نقرص، گلودرد و دندان‌درد استفاده می‌شود (Ahmed et al., 2019).

گیاه آویشن بانام علمی (Thymus) در جهان و آویشن در ایران شناخته می‌شود و از خانواده نعناعیان است. سه گونه‌ی شناخته‌شده این گیاه به نام‌های دنایی، شیرازی و باغی هستند (Motevali et al., 2017). این گیاه در قاره‌های آسیا، اروپا و آفریقا یافت می‌شود (Huang et al., 2016). از ترکیبات ارزشمند موجود در این گیاه می‌توان به دو ترکیب مهم تیمول و کارواکرول و همچنین لینالول، پیسیمین، آلفاپینن، گاماترپینن و بورنئول اشاره کرد (Kasali et al., 2019; Shad et al., 2015). این گیاه دارای خواص ضدقارچی، ضدباکتریایی، ضدسرطانی و آنتی‌اکسیدانی است (Safari Amiri et al., 2017; Giungato et al., 2018). در طب سنتی از این گیاه برای درمان بیماری‌های عفونی، مشکلات دستگاه تنفسی، سیاه سرفه، کاهش فشار خون و کاهش درد استفاده می‌شود (Dar et al., 2017; Matar et al., 2023).

گیاه رزماری بانام علمی رزماریوس (Rosmarinus) در جهان و رزماری در ایران شناخته می‌شود و از خانواده نعناعیان است (Hosseinzadeh et al., 2015). این گیاه بومی مناطق مدیترانه و جنوب اروپا است (Siedliska et al., 2014). ترکیبات فنولی ارزشمندی در این گیاه وجود دارد که می‌توان به رزمانول، کارنوسیک اسید و کافئیک اسید اشاره کرد (Gholamhossinzade et al., 2017). این گیاه دارای خواص ضدویروسی، ضدسرطانی،

ضدالتهابی و آنتی‌اکسیدانی است (Russo et al., 2014; Onwude et al., 2016; Lima-Corrêa., 2017; Homayounfar et al., 2020).

با توجه به نیاز جامعه بشری و نبود امکانات ناشی از حمل و نقل نامناسب، عدم تقاضای کافی و طبیعت فاسدشدنی محصولات براثر تنفس بالا هرساله ۴۰ تا ۶۰ درصد کل محصولات تولیدی دور ریخته می‌شوند (Dai et al., 2023; Mbegbu et al., 2021). برای جلوگیری از این تغییرات فیزیکی و شیمیایی، محصولات زراعی را فرآوری می‌کنند (Sledz and Witrowa-Rajchert., 2012). یکی از روش‌های فرآوری گیاهان دارویی و محصولات کشاورزی خشک کردن یا رطوبت‌زدایی است (Karami et al., 2020).

خشک کردن باعث می‌شود حجم و وزن محصول کاهش‌یافته و ویژگی‌هایی مانند بافت، رنگ، ویتامین‌ها، اسانس‌ها و رایحه محصول تا حدودی حفظ شوند (Makarichian et al., 2021). از روش‌های مختلف خشک کردن می‌توان روش سایه خشک و خشک‌کن خلائی مادون‌قرمز را نام برد (Hosseini et al., 2020; Halahlah et al., 2021). از مزایا و معایب روش سایه خشک می‌توان به ترتیب به بازده پایین انرژی و طولانی شدن فرآیند خشک‌کردن اشاره کرد (Kiani et al., 2018). پژوهشگران به بررسی ترکیبات موجود در برگ‌های ریحان تازه و خشک‌شده در روش طبیعی سایه خشک توسط کروماتوگرافی گازی پرداختند (Halahlah et al., 2021). آن‌ها بیان کردند که بین ترکیبات فرار گیاه ریحان خشک شده و تازه تفاوت معنی‌داری وجود دارد. در پژوهشی، بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن برگ‌های گیاه اسطوخدوس با خشک‌کن‌های خلائی مادون‌قرمز، پیوسته نیمه‌صنعتی چندمرحله‌ای، انجمادی و شرایط طبیعی انجام شد (Homayounfar et al., 2020). آن‌ها از سه سطح دمایی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه‌ی سلسیوس و سه سطح فشار خلائی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلو پاسکال استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که دمای ۶۰ درجه‌ی سلسیوس و فشار خلائی ۲۰ کیلو پاسکال در حفظ ترکیبات فنولی و آنتی‌اکسیدانی این گیاه مؤثرتر است.

خشک کردن گیاهان دارویی باعث تغییرات رایحه و رنگ در آن‌ها می‌شود (Makarichian et al., 2021). از بینی الکترونیکی که شبیه به سیستم بویایی انسان ساخته شده است برای سنجش تغییرات رایحه‌های پیچیده استفاده می‌شود. بینی الکترونیکی شامل آرایه‌ای از حسگرهای الکتروشیمیایی و یک سیستم تشخیص الگوی مناسب است (Sadati Ardestani., 2022). رایحه‌هایی که توسط حسگرها دریافت می‌شوند باید توسط روش‌های آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند (Pisner and Schnyer, 2020). تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)[1] یکی از روش‌های خطی چند متغیره آماری است که برای کاهش ابعاد داده‌ها، تفکیک داده‌ها و میزان تأثیرگذاری هر حسگر استفاده می‌شود. یکی از روش‌های پرکاربرد در تجزیه و تحلیل داده‌های بینی الکترونیکی به شمار می‌رود (Kasali et al., 2019). اسکور و لودینگ دو نمودار مهم در روش PCA هستند (Ghasempour et al., 2019). ماشین بردار پشتیبان (SVM)[2] یک روش آماری دیگری است که جزء دسته یادگیری با نظارت است و برای طبقه‌بندی داده‌های خطی و غیرخطی استفاده می‌شود (Yang et al., 2016). برای طبقه‌بندی داده‌ها از دو روش C-SVM و Nu-SVM استفاده می‌شود تفاوت این دو در چگونگی بیان مسئله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی و همچنین انتخاب پارامترهای C و Nu برای به حداقل رساندن تابع خطا است. روش SVM دارای دو فاز آموزش و تست است. در مرحله آموزش آن از توابع کرنل خطی، کودراتیک و کوبیک و انواع گوسین برای دقت هر طبقه‌بندی استفاده می‌شود. مرحله تست یا دقت طبقه‌بندی در اعتبارسنجی یک روش ارزیابی مدل است که تعیین می‌کند نتایج یک تحلیل آماری بر روی یک مجموعه داده تا چه اندازه قابل تعمیم و مستقل از داده-

1- Principal Component Analysis
2-Support Vector Machine

های آموزشی است. در این روش تمام داده‌ها دقیقاً یک‌بار برای آموزش و یک‌بار برای دقت طبقه‌بندی در اعتبارسنجی به کار می‌روند (Jafarizadegan et al., 2020). در SVM نمونه‌هایی که مرز کلاس‌ها را تشکیل می‌دهند، بردار پشتیبان نامیده می‌شوند. این بردارها در نهایت در فضای n بعدی یک ابر صفحه را ایجاد خواهند کرد. در این روش کلاس‌ها توسط یک مرز خطی از هم جداشده و نمونه‌هایی که به این مرز نزدیک‌تر هستند بردار پشتیبان نام دارند، به هراندازه که فاصله بین دو ابر صفحه بیشینه باشد خطای طبقه‌بندی هم کمینه خواهد شد (Rahmani and Alwi, 2012).

از مزایای بینی الکترونیکی سرعت بالای تشخیص، آماده‌سازی آسان نمونه‌ها و حساسیت بالا بوده که برای طبقه بندی رایحه نمونه‌ها و پایش لحظه‌ای رایحه آنها استفاده شد (Kiani et al., 2018; Rasekh et al., 2023).

ماشین بینایی شبیه به سیستم چشایی انسان است، این روش غیرمخرب، سریع و ارزان برای اندازه‌گیری ویژگی‌های کیفی محصولات کشاورزی و مواد غذایی است (Salam et al., 2021). ماشین بینایی یکی از شاخه‌های هوش مصنوعی با ترکیب روش‌های پردازش تصویر و یادگیری ماشین است (Dowlati et al., 2012). پردازش تصویر دانش جدیدی است که نخستین بار توسط تایلت[1] در صنایع غذایی معرفی گردید. به مجموعه عملیات و پردازش‌هایی که برای آنالیز تصاویر انجام شود پردازش تصویر می‌گویند (Abdullah et al., 2004; Mohammadi and Karizaki, 2016). پردازش تصویر شامل پنج مرحله‌ی ثبت تصاویر توسط دوربین، عملیات پیش‌پردازش جهت بهبود کیفیت تصاویر، ناحیه‌بندی‌کردن تصاویر برای انتخاب بهترین مؤلفه‌های رنگی، عملیات استخراج ویژگی برای به دست آوردن مشخصات فیزیک و شیمیایی مانند رنگ، ابعاد، شکل و بافت و در آخر با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان تصاویر دسته‌بندی می‌شوند (Rahmani and Alwi, 2012; Hosseini et al., 2020). یکی از عوامل مهم فیزیکی در تعیین کیفیت مواد غذایی و محصولات کشاورزی رنگ است که تأثیری مستقیم بر بازارپسندی محصولات دارد. رنگ‌های غیرطبیعی مواد غذایی و محصولات کشاورزی می‌تواند به دلیل رشد میکروب‌ها و مدت زمان انبارمانی باشد و همین امر باعث می‌شود که محصول دچار افت کیفی شود (Khorramdel et al., 2013; Kasali et al., 2019). برای سنجش رنگ محصولات غذایی و کشاورزی از فضاهای رنگی Lab، RGB و غیره استفاده می‌شود (Jha, 2010). محققین با استفاده از ماشین بینایی به بررسی خشک کردن ویژگی‌های رنگی گلبرگ‌های گیاه زعفران پرداختند (Kasali et al., 2019). آن‌ها گلبرگ‌های این گیاه را در خشک‌کن هوای داغ لایه‌نازک در پنج سطح دمایی ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درجه‌ی سلسیوس و سه سرعت هوای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه و تأثیر آن را بر فضای رنگی RGB مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بیشترین مقادیر RGB و کمترین میزان تغییر رنگ در محدوده دمایی ۸۰ تا ۱۰۰ درجه‌ی سلسیوس قرار دارد. در تحقیقی دیگر، پژوهشگران به طراحی سامانه ماشین بینایی به‌منظور پیش‌بینی محتوای کلروفیل و کارتنوئید برگ گیاهان پرداختند (Biabi et al., 2019). آن‌ها برگ‌های شش گیاه مختلف را با هدف پیش‌بینی کلروفیل و کارتنوئید در فضاهای رنگی RGB، Lab و HSV مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بین روش پردازش تصویر و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه طیف‌سنج همبستگی بالای ۰/۹۲ برای کلروفیل و ۰/۸۵ برای کارتنوئید وجود دارد. پژوهشگران با استفاده از تکنیک پردازش تصویر و روش ANN به بررسی و طبقه‌بندی رنگ گیاه پونه در اثر جذب فلزات سنگین پرداختند (Tirandaz et al., 2021). تصاویر با استفاده از دو روش دوربین در جعبه و تلفن همراه ثبت و در محیط نرم‌افزار متلب پردازش شدند. آن‌ها از فضاهای رنگی RGB، HSB، YCbCr و Lab در طول آزمایش‌ها استفاده کردند و در آخر به این نتیجه رسیدند که تصاویر گرفته شده با تلفن همراه ۹۴/۷ درصد میزان آلوده بودن برگ‌های گیاه پونه را به فلزات سنگین تشخیص می‌دهد.

1- Tillett

ازآنجایی‌که تاکنون تحقیقی در مورد تغییرات رایحه و رنگ گیاهان دارویی نظیر ریحان، آویشن و رزماری توسط سامانه بینی الکترونیکی و پردازش تصویر در روش‌های مختلف خشک کردن صورت نگرفته است به همین دلیل این پژوهش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از این پژوهش تشخیص نوع خشک کردن، تغییرات رایحه و رنگ گیاهان ریحان، آویشن و رزماری توسط سامانه بینی الکترونیکی و پردازش تصویر بود.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی محصول

هر سه گیاه ریحان، آویشن و رزماری از باغ گیاهان دارویی واقع در شهر همدان طی سه دوره تهیه شد. بعد از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه برگ‌های گیاهان از ساقه‌ها جدا و در کیسه‌های پلی‌اتیلن زیپ‌دار بسته‌بندی شدند. کلیه نمونه‌ها تا زمان انجام آزمایش‌ها در یخچال (دمای ۴ درجه سلسیوس) نگهداری و قبل از انجام هر آزمایش به دلیل هم‌دما شدن نمونه‌ها با هوای محیط به مدت ۱۲۰ دقیقه در خارج از یخچال نگهداری شدند (Alibas et al., 2021).

تعیین رطوبت اولیه

مقدار ۳۰ گرم از هر گیاه با سه تکرار داخل آون در دمای ۱۰۵ درجه‌ی سلسیوس و بازه زمانی ۲۴ ساعت قرار داده شد (Mbegbu et al., 2021). بعد از رسیدن نمونه‌ها به جرم ثابت با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ گرم وزن شدند. در آخر مقدار رطوبت اولیه هر گیاه از رابطه‌ی (۱) بر پایه وزن خشک محاسبه گردید که مقدار آن برای گیاهان ریحان، آویشن و رزماری به ترتیب ۶/۹۹۶۴، ۲/۰۷۱ و ۱/۸۹۶۱ گرم آب بر گرم ماده خشک به دست آمد.

$$Md=\frac{M_{initial}-M_{final}}{M_{final}} \quad (۱)$$

که در آن Md رطوبت اولیه محصول بر پایه جرم خشک، $M_{intinial}$ جرم اولیه و M_{final} جرم نهایی نمونه برحسب گرم است.

نسبت رطوبت (MR)

برای تعیین نسبت رطوبت در طول فرآیند خشک‌کردن نمونه‌ها از رابطه‌ی (۲) استفاده شد.

$$MR=\frac{M-Me}{M0-Me} \quad (۲)$$

که در آن MR نسبت رطوبت، M مقدار رطوبت در هر زمان، M_e رطوبت تعادلی بر مبنای وزن خشک و M_0 رطوبت اولیه نمونه بر اساس وزن خشک (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک) است.

نرخ خشک کردن هر سه نمونه از رابطه (۳) محاسبه شد (Boustani and Asefi, 2021).

$$DR=\frac{Mt-Mt+\Delta t}{\Delta t} \quad (۳)$$

در این رابطه DR نرخ خشک کردن، M_t محتوای رطوبت در زمان t، $Mt+\Delta t$ میزان رطوبت نمونه‌ها در لحظه‌ی $t+\Delta t$ و t مدت زمان خشک شدن است.

خشک‌کردن نمونه‌ها تا رسیدن به رطوبت زیر ۱۰ درصد بر پایه خشک به طول انجامید.

ضریب نفوذ مؤثر

اصول کار خشک‌کردن مواد غذایی بر اساس فرآیند نفوذ است که انتقال سریع گرما و پخش رطوبت در محصول به‌طور هم‌زمان انجام می‌شود. با توجه به این‌که برگ‌های نمونه‌ها دارای هندسه مسطح هستند، ضریب نفوذ مؤثر از رابطه‌ی (۴) محاسبه شد (Arabhosseini et al., 2009).

$$Ln(MR)=Ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right)-\left(\frac{\pi^2}{4L^2}Deff\right) \quad (۴)$$

L ضخامت نمونه برحسب متر و Deff ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برحسب مترمربع بر ثانیه است.

مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از طریق رسم نمودار داده‌های تجربی Ln(MR) در مقابل زمان به دست آمد. به‌نحوی‌که شیب خط برازش شده (K_1) برابر با رابطه (۵) شد.

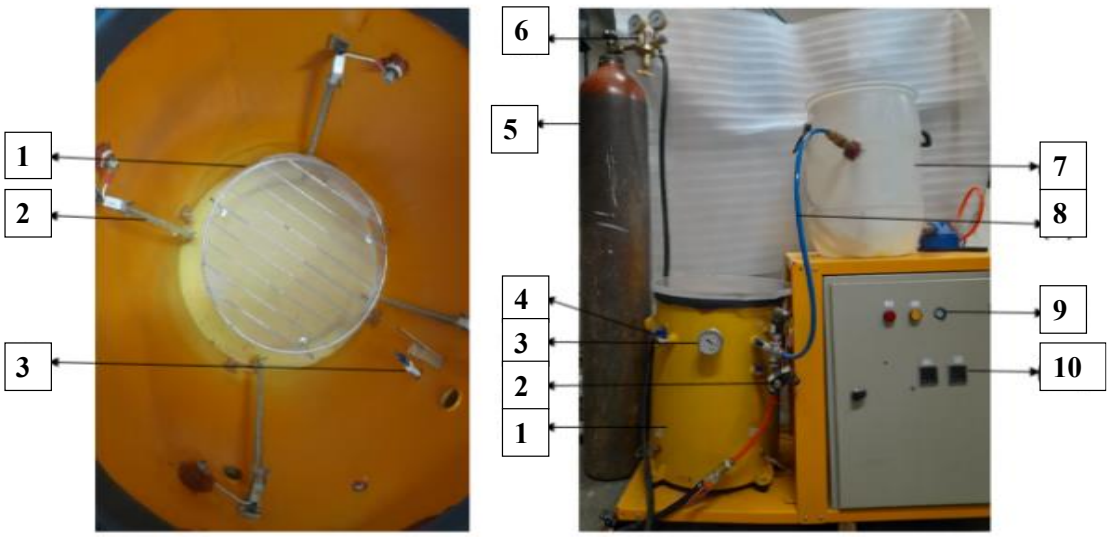
$$K_1=\frac{\pi^2}{4L^2}Deff \quad (۵)$$

خشک‌کن خلائی مادون‌قرمز

به‌منظور خشک‌کردن نمونه‌ها از خشک خلائی مادون‌قرمز استفاده شد. این خشک‌کن از یک محفظه، چهار لامپ مادون‌قرمز، پمپ خلأ، دیمر، شیر برقی، کپسول نیتروژن، مانومتر گاز، ظرف خنک‌کننده حاوی آب و یخ چراغ سیگنال و شلنگ خلأ تشکیل شده که در شکل (۱) قابل مشاهده است. برای ایجاد خلأ درون محفظه از یک پمپ دیافراگمی استفاده شد. در بیرون محفظه از شیر برقی برای تزریق گاز نیتروژن، شیر دستی برای خارج کردن فشار درون محفظه و در داخل محفظه از لامپ مادون‌قرمز مدادی با توان ۱۰۰۰ وات برای ایجاد حرارت، حسگر دما برای اندازه‌گیری دمای محفظه استفاده شد.

مراحل کار خشک‌کن خلأ مادون‌قرمز

در این پژوهش در هر سه تکرار ۱۵۰ گرم گیاه تازه بر روی توری نگه‌دارنده نمونه قرار داده شد. شدت تابش لامپ‌های مادون‌قرمز روی ۱۰۰ وات و حرارت لازم برای خشک کردن نمونه‌ها روی ۴۰ درجه سلسیوس تنظیم شد (Arabhosseini et al., 2009). آزمایش‌های خشک‌کن خلأ مادون‌قرمز تحت دو روش کنترل اتمسفر و نرمال اتمسفر صورت گرفت. در روش کنترل اتمسفر، فشار درون محفظه را به ۲۰ کیلو پاسکال رسانده و سپس تا ۴۰ کیلو پاسکال گاز نیتروژن به درون محفظه تزریق شد. در روش نرمال اتمسفر، فشار درون محفظه به ۹۵ کیلو پاسکال با استفاده از هوای محیط رسانده شد (Homayounfar et al., 2020).



B A

Figure (1) A. Exterior view of infrared vacuum dryer: 1- Vacuum chamber, 2- Electric valve, 3- Barometer, 4- Hand valve, 5- Nitrogen cylinder, 6- Manometer, 7- Cooling chamber containing water and ice, 8- Hose connected to the pump and vacuum chamber, 9- Signal light, 10- Dimmer.

Figure (1) B. Interior view of infrared vacuum dryer: 1- Sample chamber, 2- Infrared lamp, 3- Temperature sensor

سایه خشک

در روش سایه خشک، ۱۵۰ گرم از نمونه‌های تازه با سه تکرار در دمای محیط (۳ ± ۳۷ درجه‌ی سلسیوس) و رطوبت نسبی ۵ ± ۵۰٪ بر روی توری قرار داده شد.

سامانه بینی الکترونیکی

در این پژوهش از سامانه بینی الکترونیکی دارای ۱۵ حسگر نیمه‌هادی اکسید فلزی (MOS)[1] استفاده شد. این سیستم شامل محفظه حسگرها، محفظه نمونه، فیلترهای کربن برای تصفیه هوای ورودی، پمپ میکرومکش، خروجی محفظه نمونه به سمت محفظه حسگرها، ورودی محفظه نمونه از سمت فیلترهای کربن، فضای هد و صفحه نمایشگر بود که در شکل (۲) قابل مشاهده است. این حسگرها به دلیل حساسیت و طول عمر بالا، پایداری شیمیایی، قیمت ارزان و حساسیت کم به رطوبت بیشتر در بینی‌های الکترونیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۵۰). مشخصات آرایه حسگرها مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است.

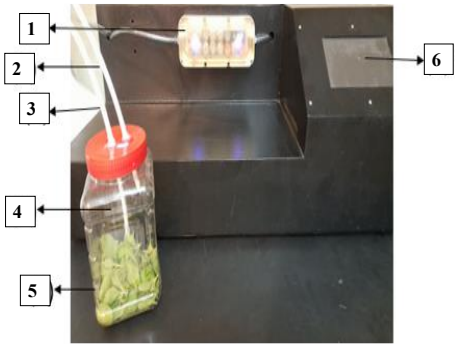


Figure (2) Electronic nose system used: 1- Sensors and sensors chamber, 2- Sample chamber outlet hose to sensor chamber, 3- The inlet hose of the sample chamber from the side of the carbon filters, 4- Head space, 5- Sample chamber 6- Display

Table (1) Specifications of sensors

Standard conditions	Detection range(PPM)	Diagnostic gases	Name of the sensor
65% ± 5 ، 20±2°C	10-1000	Ozone	**MQ131**
65% ± 5 ، 20±2°C	10-300	Benzene, Alcohol, Smoke	**MQ135**
65% ± 5 ، 20±2°C	10-100	Hydrogen sulfide	**MQ136**
65% ± 5 ، 20±2°C	5-500	Benzene, Hydrogen, Toluene, Alcohol	**MQ138**
65% ± 5 ، 20±2°C	200-1000	Methane, Butane, Smoke	**MQ2**
65% ± 5 ، 20±2°C	500-5000	Ethanol, Carbon monoxide	**TGS822**
65% ± 5 ، 20±2°C	500-10000	Carbon monoxide, Flammable gases	**MQ9**
65% ± 5 ، 20±2°C	25-500	Alcohol, Ethanol	**MQ3**
65% ± 5 ، 20±2°C	180-300	Propane, Butane	**TGS2610**
65% ± 5 ، 20±2°C	500-10000	Methane, Propane, Butane	**TGS813**
65% ± 5 ، 20±2°C	20-2000	Carbon monoxide	**MQ7**
65% ± 5 ، 20±2°C	200-10000	Isobutane, Propane	**MQ6**
65% ± 5 ، 20±2°C	500-1000	Hydrogen, Carbonmonoxide	**MQ8**
65% ± 5 ، 20±2°C	200-10000	Isobutane	**MQ5**
65% ± 5 ، 20±2°C	200-10000	Methane, Propane, Butane	**MQ4**

1- Metal Oxide Semiconductors

مراحل کار سامانه بینی الکترونیکی

در این پژوهش سامانه بینی الکترونیکی ۴۸ ساعت قبل از انجام آزمایش‌ها روشن شد تا حسگرها به محدوده دمایی تشخیص برسند. مدت زمان سه مرحله تصحیح خط مبنا، تزریق رایحه و پاک‌سازی حسگرها به ترتیب ۷۰، ۸۰ و ۲۱۰ ثانیه انتخاب شد. به‌منظور اشباع‌شدن محفظه‌ی نمونه بینی الکترونیکی در هر تکرار، ۱۲ گرم از نمونه‌های تازه و خشک شده گیاهان در روش‌های مختلف خشک‌کردن به مدت ۱۵ دقیقه داخل آن قرار گرفت. بر اساس آزمایش‌های اولیه، حسگرها بهترین پاسخ را در این زمان‌ها و مقدار نمونه داشتند. از بین ۱۵ حسگر موجود، پنج حسگر MQ2، TGS822، TGS2610، TGS813 و MQ4 بهترین پاسخ‌ها را داشتند. مرحله‌ی بعدی در تجزیه و تحلیل داده‌های دریافتی از بینی الکترونیکی، پیش‌پردازش سیگنال‌های خروجی از حسگرها است که به نوع حسگرها بستگی دارد. هدف از پیش‌پردازش، بهینه‌کردن پاسخ آرایه حسگرها، حذف نویزها، حذف داده‌های پرت، نرمال‌سازی و تصحیح خط مبنا است. برای تصحیح خط مبنا از روش کسری مطابق رابطه (۶) استفاده شد (Safari Amiri et al., 2017;Kiani et al., 2018).

$$y_s(t)=\frac{X_s(t)-X_s(0)}{X_s(0)} \quad (۶)$$

که در آن $y_s(t)$ پاسخ نرمال شده برحسب ولت، $x_s(t)$ پاسخ حسگر در زمان اندازه‌گیری و $x_s(0)$ پاسخ سطح‌مبنا حسگر است.

سامانه ماشین بینایی

سامانه ماشین بینایی در این پژوهش شامل دوربین، منبع نور و یک محفظه مکعبی با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۳۴×۳۹×۴۲ سانتی‌متر بود (شکل ۳). برای اخذ تصاویر نمونه‌های تازه و خشک‌شده از یک گوشی هوشمند (Samsung Galaxy A12) مجهز به چهار دوربین با رزولوشن‌های ۴۸، ۵، ۲ و ۲ مگا پیکسل، پردازنده هشت هسته‌ای Cortex-A55 و پردازنده گرافیکی Mali-G52 استفاده شد. منبع نور داخل محفظه از چهار لامپ LED که از بالا و روی دریچه آن نصب بود محفظه را روشن می‌کرد (۱۳ و ۷۰)(Biabi et al., 2019; Tirandaz et al., 2021).

مراحل کار سامانه ماشین بینایی

ابتدا برگ‌های تازه نمونه‌های ریحان، آویشن و رزماری از هر تکرار قبل از فرآیند رطوبت‌زدایی به‌طور تصادفی انتخاب و داخل محفظه ماشین بینایی بر روی مقوا قرار داده شد. از دریچه قسمت بالایی محفظه که دارای ابعاد ۴×۳ سانتی‌متر بود تصاویر توسط دوربین گوشی در راستای عمود بر نمونه‌ها گرفته شد. ارتفاع عدسی دوربین از نمونه‌های ریحان ۱۳ سانتی‌متر و از نمونه‌های آویشن و رزماری هرکدام ۶ سانتی‌متر و به‌گونه‌ای انتخاب شد که تصاویر کمترین میزان نویز را داشته باشند. پس از اعمال فرآیند رطوبت‌زدایی نمونه‌های خشک شده داخل محفظه ماشین بینایی قرارگرفته و تصاویر آن‌ها ثبت گردید. درمجموع از هر تکرار سه تصویر در قالب فرمت RGB گرفته شد. پس از انتقال تصاویر به رایانه عملیات پیش‌پردازش توسط نرم‌افزار (Matlab 2017 b) انجام شد. در این بخش برای حذف نویزها و سایه‌های به وجود آمده تصاویر پس‌زمینه حذف شدند (شکل ۴) و سپس تصاویر باینری‌شده به شاخص‌های رنگی L*a*b* طبق معادلات (۷ تا ۱۴) تبدیل شدند.



Figure (3) View from the machine vision compartment: 1- Camera lens location, 2- LED lamps and 3- Sample chamber

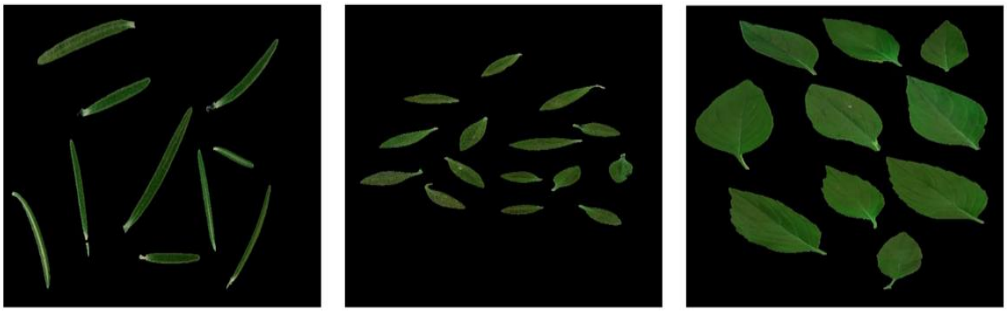


Figure (4) View of image preprocessing and noise removal in basil, thymus and rosmarinus plants

برای تبدیل فضای رنگی RGB به فضای رنگی L*a*b* دو مرحله لازم است. در مرحله‌ی اول مؤلفه‌های RGB را در مقادیر نرمال شده (۰، ۱ و ۰) به تابع X، Y و Z طبق روابط (۷ تا ۱۴) تبدیل شدند. برای تبدیل فضای رنگی RGB به L*a*b* از M به‌عنوان تبدیل طبق رابطه‌ی (۷) استفاده شد.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = (M) \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (۷)$$

$$M = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3575 & 0.1804 \\ 0.2126 & 0.7151 & 0.0721 \\ 0.0193 & 0.1191 & 0.9504 \end{bmatrix} \quad (۸)$$

$$\begin{cases} X = 0.4124R + 0.3575G + 0.1804B \\ Y = 0.2126R + 0.7151G + 0.0721B \\ Z = 0.0193R + 0.1191G + 0.9504B \end{cases} \quad (۹)$$

در مرحله‌ی دوم مؤلفه‌های X، Y و Z به دست آمده از رابطه‌ی (۹)، در روابط (۱۰ تا ۱۳) جایگذاری شدند.

$$L^* = 116 \times f\left(\frac{Y}{Yn}\right) - 1 \quad (۱۰)$$

$$a^* = 500 \times \left[f\left(\frac{X}{Xn}\right) - f\left(\frac{Y}{Yn}\right)\right] \quad (۱۱)$$

$$b^* = 200 \times \left[f\left(\frac{Y}{Yn}\right) - f\left(\frac{Z}{Zn}\right)\right] \quad (۱۲)$$

$$f(x) = \begin{cases} x^{\frac{1}{3}} & x > (\frac{6}{29})^3 \\ \frac{1}{3}(\frac{29}{6})^2 x + \frac{4}{29} & x \le (\frac{6}{29})^3 \end{cases} \quad (۱۳)$$

در رابطه‌ی (۱۳) Xn، Yn و Zn مراجع روشنایی هستند که توسط رابطه‌ی (۱۴) محاسبه شدند.

$$\begin{cases} Xn = \frac{xn}{yn} Yn \\ Zn = \frac{zn}{yn} Yn \end{cases} \quad (۱۴)$$

مقدار Xn برابر با رنگ سفید، $yn = 0.3127$، $Zn = 1 - xn - yn$ و $Yn = 100$ است (Goñi and Salvadori, 2017).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

به‌منظور تحلیل و طبقه‌بندی داده‌های دریافتی از حسگرهای بینی الکترونیکی از نرم‌افزار Unscrambler X10.4، برای تجزیه و تحلیل واریانس داده‌های دریافتی از فضاهای رنگی از آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و برای مقایسه‌ی میانگین‌ها از آزمون دانکن در نرم‌افزار (SPSS Statistics 27) استفاده شد. کلیه نمودارها با نرم‌افزار Excel 2016 رسم شدند.

نتایج و بحث

نتایج مدت زمان رطوبت‌زدایی

نتایج مدت زمان رطوبت‌زدایی در جدول (۲) آورده شده است. مطابق جدول، بیشترین مدت زمان رطوبت‌زدایی در روش سایه خشک برای نمونه‌های ریحان، آویشن و رزماری به ترتیب ۲۷۰۰، ۹۰۰ و ۵۵۲۰ دقیقه و کمترین زمان طی‌شده در خشک‌کن کنترل اتمسفر مادون‌قرمز برای نمونه‌ها به ترتیب ۵۵۰، ۳۸۵ و ۱۳۰۰ دقیقه بود. در روش سایه خشک به دلیل رطوبت نسبی بالا و دمای محیط، سرعت خروج رطوبت از نمونه‌ها کم بوده درحالی‌که در خشک‌کن کنترل اتمسفر مادون‌قرمز به دلیل خلأ موجود درون محفظه و استفاده از منبع حرارتی لامپ‌های مادون‌قرمز به دلیل عمق نفوذ به نمونه‌ها باعث تسریع فرآیند رطوبت‌زدایی شد. نتایج به دست آمده مشابه پژوهشی دیگر در مورد خشک‌کردن گیاه گزنه با خشک‌کن خلائی بود که کمترین مدت زمان رطوبت‌زدایی در این روش به دست آمد (Alibas et al., 2021). در مطالعه‌ای دیگر به بررسی خشک‌کردن برگ‌های گیاه اسطوخدوس با سه خشک‌کن انجمادی، چندمرحله‌ای نیمه‌صنعتی پیوسته و خلائی مادون‌قرمز پرداختند آن‌ها نیز به این نتیجه رسیدند فرآیند رطوبت‌زدایی در خشک‌کن خلائی مادون‌قرمز نسبت به دو روش دیگر سریع‌تر است (Homayounfar et al., 2020).

نتایج سینتیک خشک شدن

طبق شکل (۵) در طی فرآیند رطوبت‌زدایی، محتوای رطوبتی نمونه‌ها در اوایل شروع فرآیند سریع بوده که در اثر گذر زمان از شدت آن کاسته می‌شود. دلیل این تغییرات، کاهش رطوبت سطحی اولیه نمونه و خارج شدن رطوبت از عمق بافت نمونه‌ها می‌باشد. نتایج به دست آمده مشابه خشک کردن برگ‌های گیاه اسطوخدوس (Homayounfar et al., 2020) و خشک کردن گیاه رزماری (Ali et al., 2020) می‌باشد.

Table (2) Time duration (minutes) of dehumidification of samples

Dryers			Samples
Dry shade	Normal infrared atmosphere	Infrared atmosphere control	
2700	1030	550	**Basil**
900	400	385	**Thymus**
5520	1390	1300	**Rosmarinus**

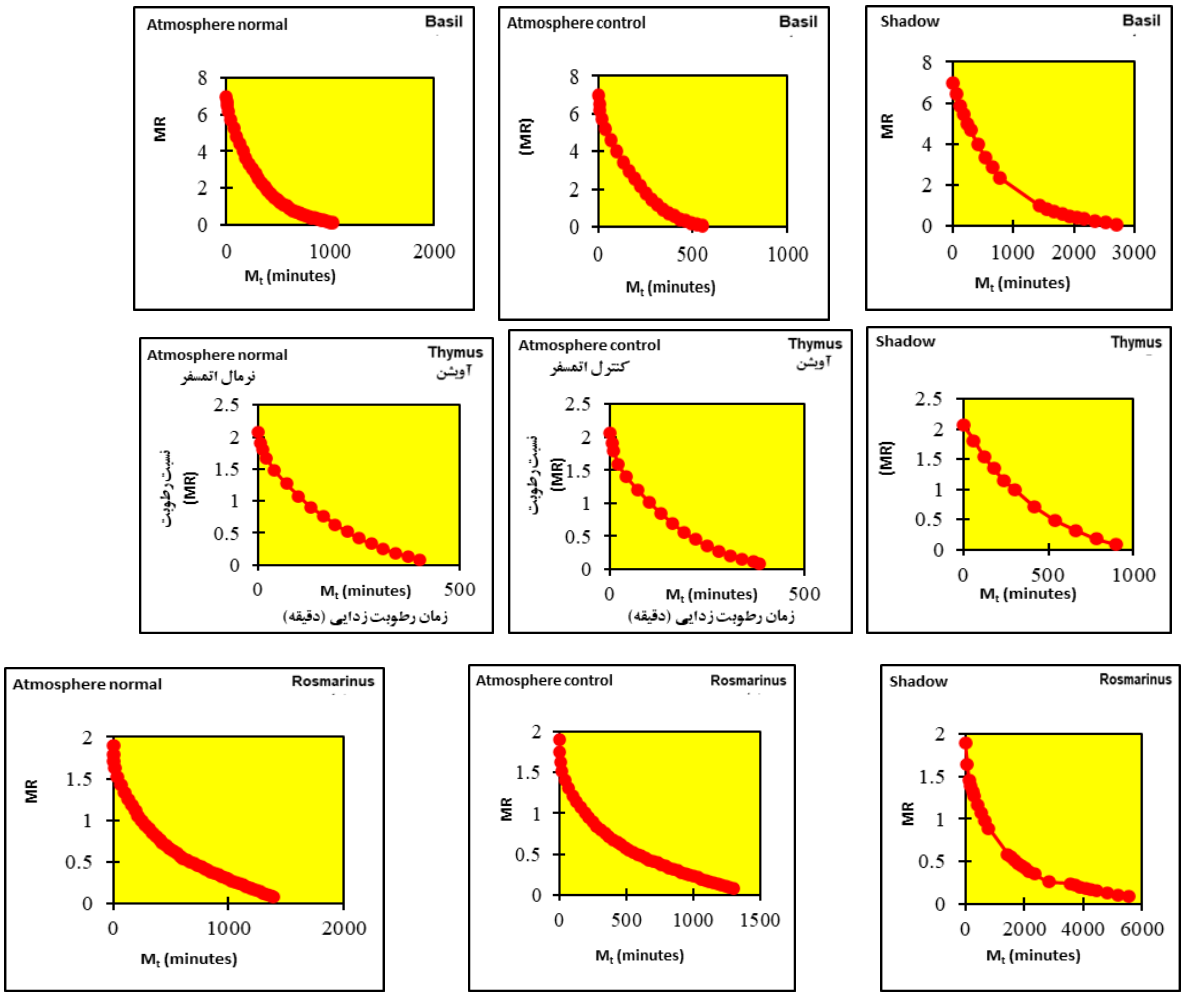


Figure (5) Changes in the moisture content of Basil, Thymus and Rosmarinus plants according to time during the dehumidification process in dryers

آهنگ رطوبت‌زدایی

یک فرآیند رطوبت‌زدایی شامل سه مرحله‌ی خشک‌نمودن اولیه، خشک نمودن با آهنگ ثابت و خشک‌نمودن با آهنگ کاهشی می‌باشد. مطابق شکل (۶) برای نمونه‌ها مشخص گردید که آهنگ رطوبت‌زدایی هر سه نمونه در سطوح بالای محتوای رطوبتی دارای یک جهش هستند که بعد از مدتی کاهش می‌یابد. عدم وجود مرحله‌ی خشک‌شدن با آهنگ ثابت در فرآیند رطوبت‌زدایی میوه‌ها و سبزی‌ها متداول است. مهم‌ترین فاکتور در مرحله خشک‌شدن با نرخ ثابت، وجود رطوبت سطحی است که به دلیل کاهش آن مرحله خشک کردن با نرخ ثابت بسیار کوتاه خواهد بود. از طرفی به دلیل اینکه فواصل زمانی اندازه‌گیری فرآیند رطوبت‌زدایی در مراحل اولیه کوتاه بود تا حدودی نرخ ثابت خشک‌نمودن نمونه‌ها مشخص است ولی در ادامه فرآیند رطوبت‌زدایی هر ۳۰ دقیقه یک‌بار تکرار شده که مشاهده‌ی این مرحله امکان‌پذیر نبود. علاوه بر آن می‌توان به نحوه چیدمان نمونه‌ها به‌صورت لایه‌نازک اشاره کرد که باعث تبخیر رطوبت سطحی می‌شود و مشاهده‌ی این مرحله را غیرممکن می‌کند. این پدیده مشابه پژوهش‌های دیگر در مورد خشک کردن سیر (Makarichian et al., 2021)، خشک کردن گیاه رزماری (Ali et al., 2020) و خشک کردن گیاه ریحان (Mbegbu et al., 2021) بود. بر اساس شکل‌های (۶) نتایج رطوبت‌زدایی برای نمونه‌های ریحان و رزماری در خشک‌کن کنترل اتمسفر مادون‌قرمز و همچنین نمونه‌های آویشن در خشک‌کن نرمال اتمسفر مادون‌قرمز نشان داد که بیشترین آهنگ رطوبت‌زدایی برای این نمونه‌ها به ترتیب ۸/۹۳، ۲/۹۳، ۳/۳۹ گرم آب به گرم ماده‌ی خشک بر دقیقه بود.

نتایج ضریب مؤثر انتشار

شکل (۷) نمودارهای لگاریتمی نسبت رطوبت برحسب زمان را به همراه معادله‌ی خط برای نمونه‌های ریحان، آویشن و رزماری در روش‌های مختلف خشک کردن نشان می‌دهد. بیشترین شیب برای هر سه نمونه در روش سایه خشک به ترتیب ۰/۰۰۱۵-، ۰/۰۰۳۴- و ۰/۰۰۰۵ و کمترین آن در روش خشک کردن کنترل اتمسفر مادون‌قرمز به ترتیب نمونه‌ها ۰/۰۰۷۳-، ۰/۰۰۷۶- و ۰/۰۰۲- به دست آمد. نتایج به دست آمده مشابه بهینه‌سازی روش‌های مختلف خشک کردن برگ‌های گیاه اسطوخدوس بود (Makarichian et al., 2021).

مطابق شکل (۷) بیشترین ضریب تبیین برای گیاه ریحان ۰/۹۹۱۷ در روش سایه خشک و کمترین آن ۰/۹۵۴۱ در روش خشک کردن کنترل اتمسفر مادون‌قرمز به دست آمد همچنین در گیاه آویشن و رزماری بیشترین ضریب تبیین به ترتیب ۰/۹۸۹۸۴ و ۰/۹۸۶۵ در روش خشک کردن کنترل اتمسفر مادون‌قرمز و کمترین آن به ترتیب نمونه‌ها ۰/۹۷۱۶ و ۰/۹۷۹۷ در روش سایه خشک به دست آمد.

نتایج ضریب مؤثر انتشار در جدول (۳) آورده شده است. طبق نتایج جدول، بیشترین ضریب مؤثر انتشار برای نمونه‌های ریحان، آویشن و رزماری به ترتیب m^2/s ۹/۲۹×۱۰$^{-۹}$، m^2/s ۹/۶۸×۱۰$^{-۹}$ و m^2/s ۲/۵۴×۱۰$^{-۸}$ در روش خشک کردن کنترل اتمسفر مادون‌قرمز و کمترین آن به ترتیب نمونه‌ها m^2/s ۱/۹۱×۱۰$^{-۹}$، m^2/s ۴/۳۳×۱۰$^{-۹}$ و m^2/s ۶/۳۶×۱۰$^{-۱۰}$ در روش سایه خشک به دست آمد.

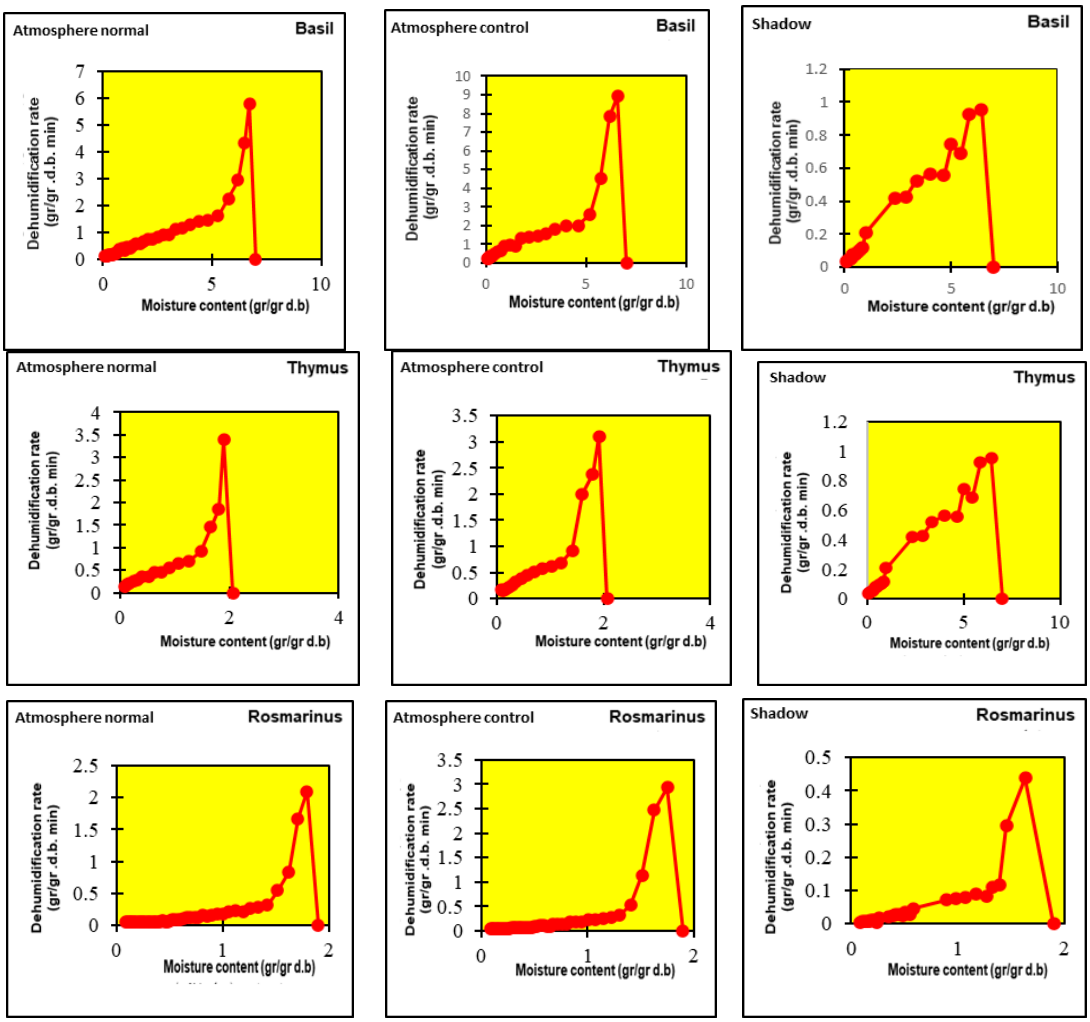


Figure (6) Changes in the dehumidification rate of basil, thymus and rosmarinus plants in dryers

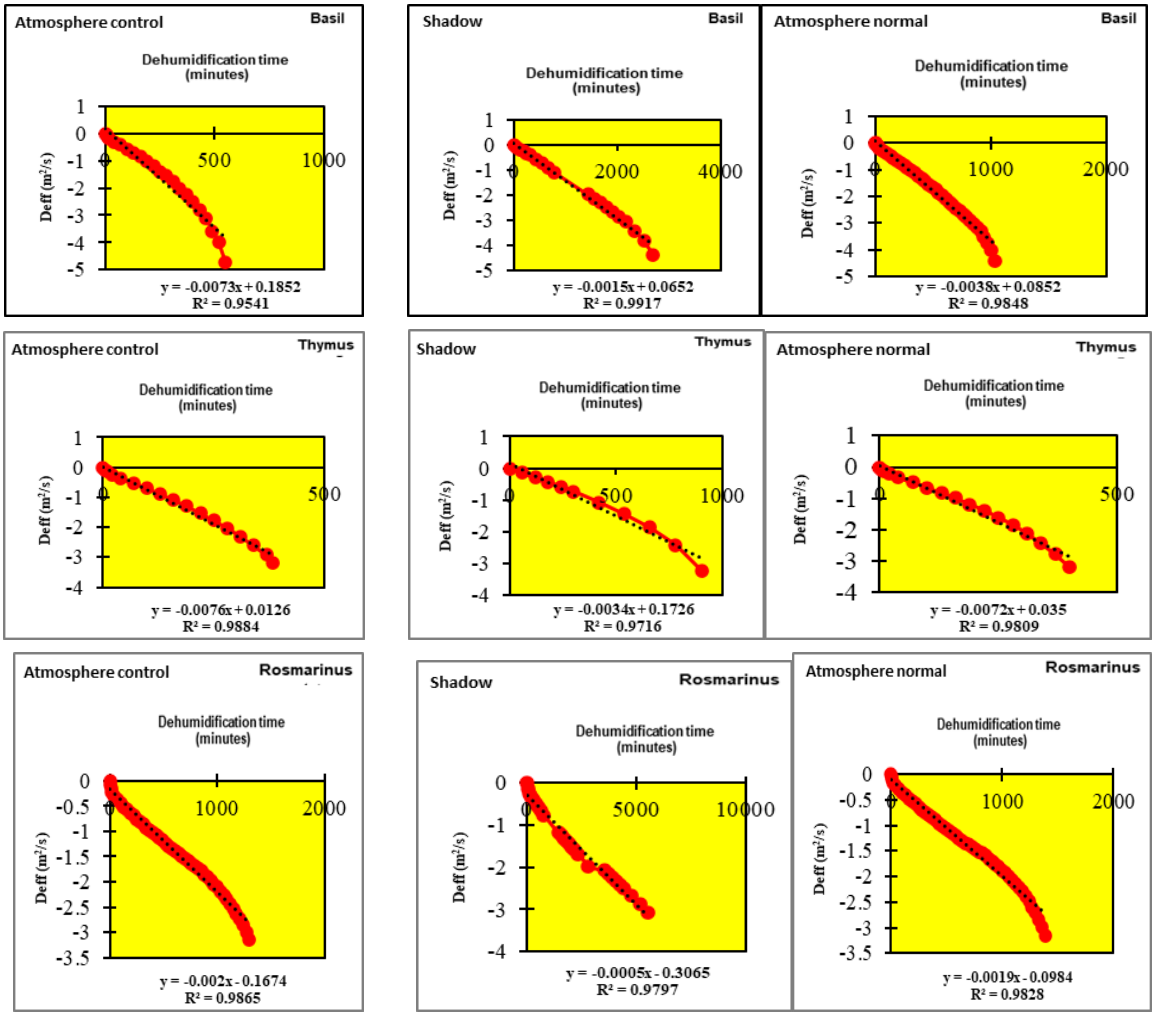


Figure (7) Logarithmic diagram of moisture ratio over time for Basil, Thymus and Rosmarinus plants in dryers

Table (3) Effective moisture diffusion coefficient Basil Thymus and Rosmarinus leaves in dryers

Effective moisture diffusion coefficient			
Infrared atmosphere normal	**Infrared atmosphere control**	**Dry shadow**	**Plant**
4.84×10^{-9}	9.29×10^{-9}	1.91×10^{-9}	**Basil**
9.17×10^{-9}	9.68×10^{-9}	4.33×10^{-9}	**Thymus**
2.42×10^{-9}	2.54×10^{-8}	6.36×10^{-10}	**Rosmarinus**

نتایج نمودار راداری پاسخ آرایه حسگرهای بینی الکترونیکی در ارتباط با گیاهان تازه و خشک شده

شکل (۸) نمودار راداری پاسخ پنج حسگر دریافتی از بینی الکترونیکی را برای نمونه‌های تازه و خشک شده نشان می‌دهند. با توجه به نمودار راداری در گیاه ریحان بیشترین پاسخ حسگرها مربوط به دو حسگر MQ4 و TGS813 در روش خشک کردن نرمال اتمسفر مادون‌قرمز و کمترین پاسخ حسگرها مربوط به سه حسگر MQ2، TGS822 و TGS813 در گیاه تازه بود. با توجه به نمودار در گیاه آویشن بیشترین پاسخ حسگرها مربوط به سه حسگر MQ4،

MQ2 و TGS813 در روش خشک کردن کنترل اتمسفر مادون‌قرمز و کمترین پاسخ حسگرها مربوط به سه حسگر TGS822، TGS2610 و TGS813 در روش سایه خشک بود.

مطابق نمودار راداری در گیاه رزماری بیشترین و کمترین پاسخ حسگرها به ترتیب برای حسگرهای TGS813 و TGS822 در روش خشک کردن نرمال اتمسفر مادون‌قرمز بود. بر اساس نمودار راداری ریحان و رزماری در دو روش خشک کردن سایه خشک و کنترل اتمسفر مادون‌قرمز دچار کمترین تغییرات رایحه نسبت به گیاه تازه شده‌اند ولی درباره‌ی گیاه تازه آویشن این موضوع فقط در روش سایه خشک صدق می‌کند. تفاوت این پاسخ حسگرها به دلیل ترکیبات فرار موجود در گیاهان و روش‌های مختلف خشک کردن می‌باشد (Banizaman et al., 2020). محققین بیان کردند که کمترین تغییرات رایحه‌ها سبب ایجاد پاسخ‌های متفاوت از آرایه حسگرها می‌شود (Yang et al., 2016). نتایج به دست آمده از این نمودارها مشابه نتایج پژوهشی است که در آن به بررسی پایش لحظه‌ای رایحه برگ‌های گیاه نعناع در طول فرآیند خشک کردن با استفاده از بینی الکترونیکی پرداخته شد(Kiani et al., 2018). بیشترین پاسخ حسگرها مربوط به سه حسگر MQ9، TGS2442 و TGS2620 بود. از بینی الکترونیکی مبتنی بر الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای تشخیص درجه خلوص اسانس نعناع فلفلی نیز استفاده شد. در این پژوهش حسگرهای TGS822، TGS813، MQ9، MQ5، MQ8 و MQ3 بیشترین پاسخ حسگرها را داشتند (Samadi et al., 2022).

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

مطابق شکل (۹) نمودار اسکور از روش PCA، دو مؤلفه‌ی اصلی اول (PC-1) و دوم (PC-2) توانستند به ترتیب ۵۳ و ۲۵ درصد واریانس متغیر داده‌های ورودی را پوشش دهند. با توجه به نمودار تفکیک هر سه نمونه گیاه و خشک‌کن‌ها به‌خوبی انجام گرفت. بین خشک‌کن کنترل اتمسفر مادون‌قرمز در گیاه رزماری با گیاه تازه رزماری همپوشانی قابل ملاحظه‌ای وجود داشت که می‌تواند به دلیل رایحه‌های فرار این گیاه و پاسخ حسگرهای بینی الکترونیکی باشد.

تعیین نقش هر یک از حسگرها در ایجاد تمایز بین نمونه‌ها و خشک‌کن‌ها به‌وسیله نمودار لودینگ امکان‌پذیر است. بدین منظور پاسخ حسگرها با مقادیر ویژه در نمودار لودینگ شکل (۱۰) قرار گرفت. بزرگ‌تر بودن مقدار لودینگ حسگر روی یک مؤلفه اصلی (نزدیکی بیشتر به دایره بیرونی) به معنای نقش بیشتر آن حسگر در تشخیص و تفکیک بین نمونه‌ها و خشک‌کن‌ها است (Tohidi et al., 2016). مطابق نمودار لودینگ در راستای مؤلفه‌ی اصلی اول به ترتیب حسگرهای MQ2، TGS822 و TGS2610 بیشترین مقادیر ضریب لودینگ برای تفکیک سه نمونه گیاه ریحان، آویشن و رزماری داشتند. در بحث تفکیک نوع خشک‌کن‌ها در راستای مؤلفه‌ی اصلی دوم در نمودار لودینگ حسگرهای MQ2، TGS822، TGS2610، MQ4 و TGS813 به ترتیب بیشترین عملکرد را داشتند. نتایج به دست آمده مشابه پژوهش قبلی (Rasekh et al., 2023) بود که از روش PCA برای تأثیر روش‌های مؤثر خشک کردن بر رایحه گیاه نعناع استفاده شد. این روش توانست ۹۲ درصد واریانس بین داده‌های مربوط به رایحه‌ی گیاه نعناع را در خشک‌کن‌های مختلف پوشش دهد. همچنین از روش PCA برای شناسایی رایحه‌ی گیاه نعناع در طول فرآیند خشک کردن استفاده شد (Kiani et al., 2018). این روش توانست واریانس بین داده‌ها را ۱۰۰ درصد پوشش دهد. همچنین از روش PCA برای طبقه‌بندی پنج نوع گیاه دارویی از خانواده نعناسانان استفاده شد. این روش توانست ۹۵ درصد واریانس داده‌های ورودی را پوشش دهد (Banizaman et al., 2020).

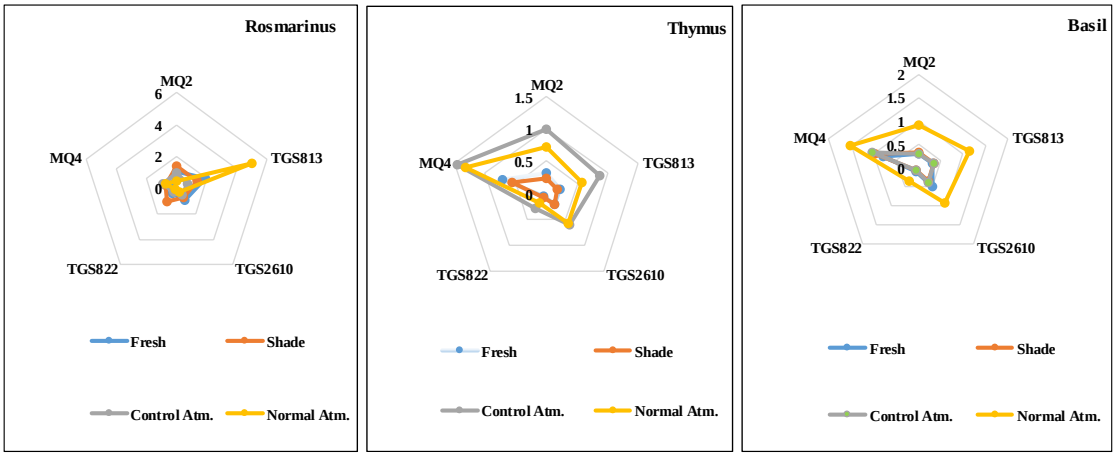


Figure (8) Radar plot response of sensors for fresh Basil, Thymus and Rosmarinus leaves and different drying methods

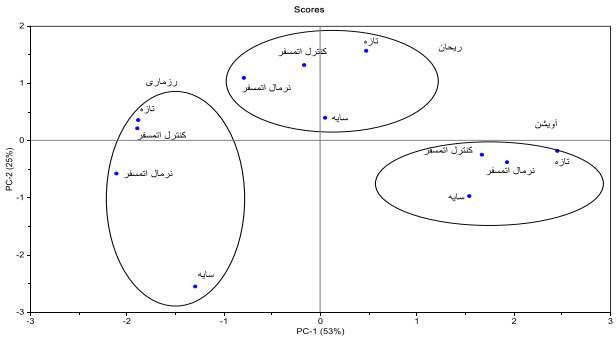


Figure (9) PCA scores diagram for basil, thymus and rosmarinus leaves in dryers

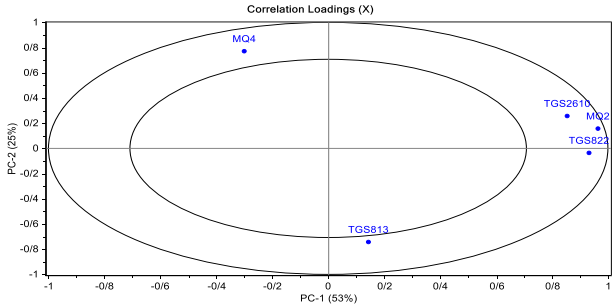


Figure (10) PCA loading diagram for basil, thymus and rosmarinus leaves in dryers

نتایج ماشین بردار پشتیبان SVM

مطابق جدول (۴) از این روش برای طبقه‌بندی افتراق گیاهان خشک شده، نوع خشک‌کن‌ها و تفکیک هر گیاه استفاده شد. به‌منظور دست‌یابی به عملکرد مناسب نوع طبقه‌بندی و پارامترهای آن از طبقه‌بندی C-SVM استفاده شد و پارامترهای C و γ از طریق به حداقل رساندن دقت طبقه‌بندی در اعتبارسنجی و با صحیح و خطا به دست‌آمدند. دقت آموزش و دقت طبقه‌بندی در اعتبارسنجی برای افتراق گیاهان به ترتیب ۱۰۰ و ۷۵ درصد و بر اساس نوع خشک‌کن‌ها به ترتیب ۴۱/۶۷ درصد و صفر به دست آمد؛ بنابراین برای طبقه‌بندی افتراق روش‌های خشک‌کردن هر سه نمونه از این روش به‌صورت جداگانه استفاده شد که دقت آموزش و دقت طبقه‌بندی در اعتبارسنجی به ترتیب ۱۰۰ درصد و صفر به دست آمد.

نتایج به دست آمده مشابه نتایج قبلی از روش SVM برای طبقه‌بندی رایحه‌ی گیاه نعناع خشک شده در روش‌های مختلف خشک‌کردن بود (Rasekh et al., 2023). این روش قادر بود با دقت آموزش ۹۷/۵ درصد و اعتبارسنجی ۹۴/۱۷ درصد نمونه‌ها را تفکیک کند. محققین از روش SVM برای تشخیص درجه خلوص اسانس نعناع فلفلی استفاده کردند. این روش قادر به تفکیک درجه خلوص نعناع فلفلی با دقت ۷۵ درصد بود (Samadi et al., 2022).

نتایج شاخص‌ها و تغییرات رنگ (ΔE) برای برگ‌های گیاهان تازه و خشک شده در خشک‌کن‌ها

شاخص‌های فضای رنگی RGB

نتایج تجزیه واریانس شاخص‌های رنگی R، G و B برای نمونه‌ها در جدول (۵) آورده شده است. مطابق جدول شاخص‌های رنگی G و B برای نمونه‌های ریحان و آویشن به ترتیب در سطح یک درصد و پنج درصد معنی‌دار شدند ولی شاخص رنگی R در دو نمونه اختلاف معنی‌داری ندارد. در گیاه رزماری شاخص‌های رنگی R و B در سطح یک درصد دارای اختلاف معنی‌داری هستند ولی شاخص رنگی G اختلاف معنی‌داری ندارد.

شکل (۱۱) مقایسه میانگین‌ها را برای نمونه‌های تازه و خشک شده ریحان، آویشن و رزماری نشان می‌دهد. مطابق شکل در شاخص‌های رنگی G و B برای گیاه ریحان بیشترین میزان این شاخص‌ها به ترتیب برای گیاه تازه ۹۸/۰۸ و روش خشک‌کردن کنترل اتمسفر ۶۵/۲۴ و کمترین آن به ترتیب در روش خشک‌کردن نرمال اتمسفر ۶۱/۶۴ و گیاه تازه ۳۲/۲۷ به دست آمد. در شاخص رنگی G گیاه تازه با هر سه روش خشک‌کردن دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشد ولی در شاخص رنگی B گیاه تازه با دو روش خشک‌کردن کنترل اتمسفر و سایه خشک دارای اختلاف معنی‌دار و با روش خشک‌کردن نرمال اتمسفر اختلاف معنی‌داری ندارد.

با توجه به شکل برای شاخص‌های رنگی G و B در گیاه آویشن بیشترین میزان این شاخص‌ها به ترتیب در روش‌های خشک کردن نرمال اتمسفر ۸۶/۶۳ و کنترل اتمسفر ۷۲/۴۹ و کمترین آن‌ها به ترتیب درروش سایه خشک ۷۷/۷۵ و گیاه تازه ۴۳/۸۶ به دست آمد. در شاخص رنگی G گیاه تازه با هر سه روش خشک کردن اختلاف معنی‌داری ندارد همچنین در شاخص رنگی B گیاه تازه با روش خشک کردن کنترل اتمسفر دارای اختلاف معنی‌دار ولی با دو روش دیگر اختلاف معنی‌داری ندارد.

Table (4) Accuracy values of SVM classification based on separation plants, types of dryers and drying of each plant

Separation					
Each plant			Dryers	Plants	
Rosmarinus	Thymus	Basil			
%100	%100	%100	%41.67	%100	**Training accuracy**
0	0	0	0	%75	**Classification accuracy in validation**

Table (5) Analysis of variance of R, G and B color indices for fresh and dried Basil, Thymus and Rosmarinus leaves in dryers

Indices			Plant
B	G	R	
0.001^{**}	0.001^{**}	0.313^{ns}	**Basil**
0.029^{*}	0.036^{*}	0.165^{ns}	**Thymus**
0.001^{**}	0.224^{**}	0.40^{**}	**Rosmarinus**

*: Significant difference at the probability level 5%, **: Significant difference at the probability level 1%, ^{ns}: No Significant difference.

مطابق شکل در شاخص‌های رنگی R و B در گیاه رزماری بیشترین میزان این شاخص‌ها به ترتیب در روش‌های خشک – کردن کنترل اتمسفر ۴۹/۶۷ و سایه خشک ۴۷/۸۴ و کمترین آن‌ها به ترتیب در گیاه تازه ۴۰/۹۱ و ۳۰/۱۷ به دست آمد. در شاخص رنگی R گیاه تازه با روش خشک کردن کنترل اتمسفر دارای اختلاف معنی‌داری ولی با دو روش دیگراختلاف معنی‌داری ندارد. همچنین شاخص رنگی B در گیاه تازه با هر سه روش خشک کردن دارای اختلاف معنی‌دار ولی هر سه روش خشک کردن باهم اختلاف معنی‌داری ندارند.

مقایسه تغییرات شاخص‌های رنگی R، G و B در سه روش خشک‌کردن

تغییرات شاخص‌های رنگی در روش‌های خشک‌کردن به دلیل تغییرات رنگ سبز گیاهان است. سبزینگی برگ‌های گیاهان به مقدار کلروفیل موجود در آن‌ها بستگی دارد. افزایش دما باعث تیرگی برگ‌ها می‌شود که ناشی از تخریب کلروفیل موجود در آن‌ها است (Bahmanpour et al., 2017). در فرآیند خشک‌کردن منیزیم موجود در کلروفیل در صورت وجود استیک اسید و اگزالیک اسید با دو اتم هیدروژن جایگزین می‌شوند و فئوفیتین تولید می‌کنند. به‌طوری‌که تغییرات رنگی به دما، مدت زمان رطوبت‌زدایی و اکسیژن موجود در اطراف بستگی دارد (Tirandaz et al., 2021). میزان شاخص رنگی G در روش سایه خشک در شکل (۱۱) به گیاه تازه ریحان و آویشن نزدیک‌تر است از طرفی شاخص B در روش سایه خشک به گیاه تازه آویشن نزدیک‌تر است که می‌تواند به دلیل دمای محیط باشد. میزان شاخص رنگی B درروش خشک‌کردن نرمال اتمسفر در شکل (۱۱) به گیاه تازه ریحان و رزماری نزدیک‌تر است همچنین میزان شاخص رنگی R در روش خشک کردن نرمال اتمسفر به گیاه تازه رزماری نزدیک‌تر است که می‌تواند به دلیل استفاده از لامپ مادون‌قرمز، فشار درون محفظه و مدت زمان رطوبت‌زدایی باشد.

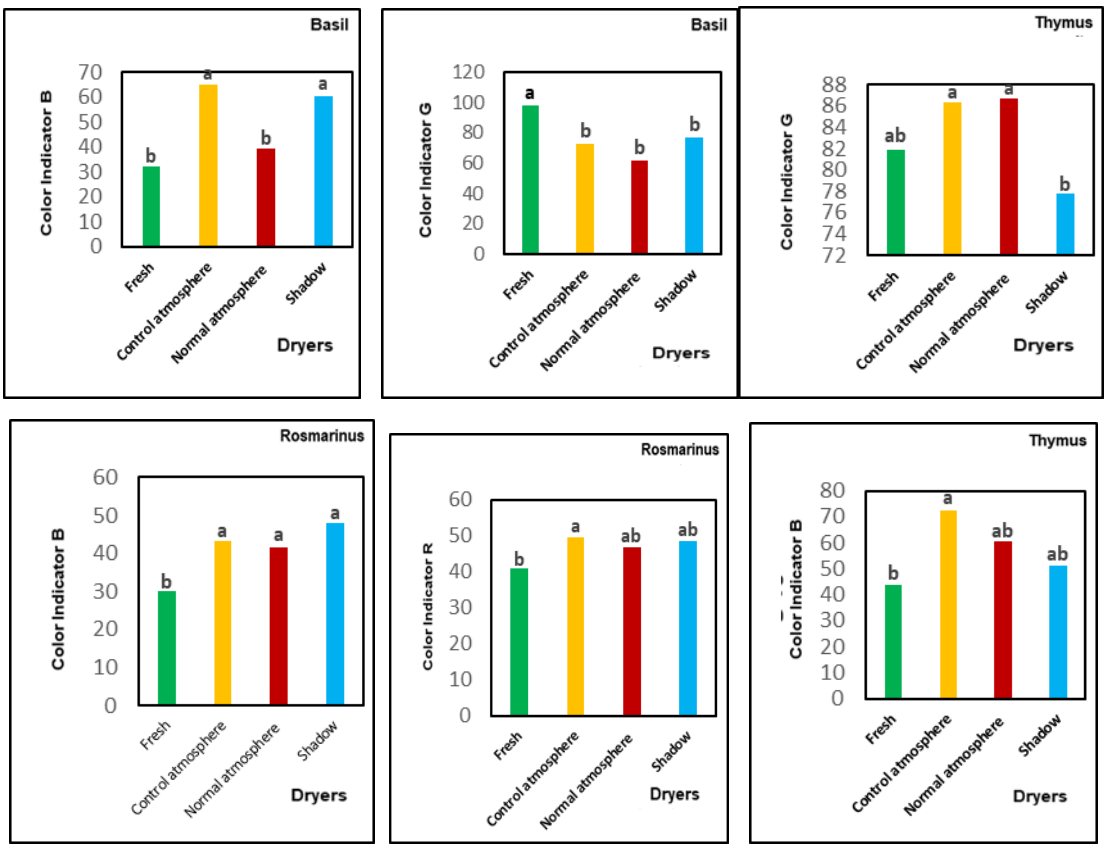


Figure (11) Comparison of averages for color indices R, G and B of fresh Basil, Thymus, Rosmarinus leaves and different drying methods.

فضای رنگی RGB یک روش مؤثر و کارآمد در رنگ‌سنجی گیاهان خشک شده است که در پژوهش‌ها از آن استفاده می‌شود. محققین ضمن بررسی تأثیر دما و روش خشک کردن بر مدت زمان خشک شدن به کیفیت رنگ گیاه نعناع نیز پرداختند (Bahmanpour et al., 2017). آن‌ها از فضای رنگی RGB برای کیفیت رنگ گیاه نعناع استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که دمای پایین باعث حفظ رنگ دانه‌های گیاه می‌شود.

شاخص‌های فضای رنگی Lab

نتایج تجزیه واریانس شاخص‌های رنگی L*، a* و b* و تغییرات رنگ (ΔE) برای نمونه‌ها در جدول (۶) آورده شده است. طبق جدول شاخص‌های رنگی L* و b* برای گیاه ریحان در سطح یک درصد دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشند و شاخص رنگی a* و (ΔE) اختلاف معنی‌داری ندارند. برای گیاه آویشن شاخص رنگی L* در سطح ۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار و شاخص‌های a*، b* و ΔE اختلاف معنی‌داری ندارند. همچنین برای گیاه رزماری شاخص‌های رنگی L* و a* در سطح ۵ درصد دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشند و شاخص رنگی b* و (ΔE) اختلاف معنی‌داری ندارند.

شکل (۱۲) مقایسه میانگین‌ها را برای نمونه‌های تازه و خشک شده ریحان، آویشن و رزماری نشان می‌دهد. مطابق شکل برای شاخص‌های رنگی L* و b* برای گیاه ریحان بیشترین میزان این شاخص‌ها به ترتیب برای گیاه تازه ۹۸/۳۰ و روش خشک‌کردن کنترل اتمسفر ۲/۰۱ و کمترین آن به ترتیب در روش خشک کردن نرمال اتمسفر ۹۶/۱۴ و گیاه تازه ۰/۹۰ به دست آمد. در شاخص رنگی L* گیاه تازه با دو روش خشک کردن نرمال اتمسفر و سایه خشک دارای اختلاف معنی‌دار و با روش خشک کردن کنترل اتمسفر اختلاف معنی‌داری ندارد. در شاخص رنگی b* گیاه تازه با هر سه روش خشک‌کردن دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشد.

با توجه به شکل شاخص رنگی L* برای گیاه آویشن بیشترین میزان این شاخص ۹۶/۱۴ در روش خشک کردن کنترل اتمسفر و کمترین آن ۹۵/۲۰ در روش سایه خشک به دست آمد. در شاخص رنگی L* گیاه تازه با روش سایه خشک دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشد ولی با دو روش دیگر اختلاف معنی‌داری ندارد.

مطابق شکل برای شاخص‌های رنگی L* و a* در گیاه رزماری بیشترین میزان این شاخص‌ها به ترتیب برای گیاه تازه ۹۴/۷۳ و روش خشک کردن کنترل اتمسفر ۲/۵۶ و کمترین آن به ترتیب برای روش خشک‌کردن کنترل اتمسفر ۹۲/۳۸ و گیاه تازه ۱/۶۰ به دست آمد. در شاخص رنگی L* گیاه تازه با هر سه روش خشک‌کردن دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشد ولی هر سه روش خشک کردن باهم اختلاف معنی‌داری ندارند. همین‌طور در شاخص رنگی b* گیاه تازه با روش خشک‌کردن کنترل اتمسفر دارای اختلاف معنی‌دار ولی با دو روش دیگر اختلاف معنی‌داری ندارد.

Table (6) Analysis of variance of color indices L*, a* and b* and color changes for fresh and dried Basil, Thymus and Rosmarinus leaves in dryers.

Plant	Indices			
	L*	a*	b*	ΔE
Basil	3.761^{**}	0.495^{ns}	1.562^{**}	0.843^{ns}
Thymus	0.887^{*}	0.455^{ns}	0.373^{ns}	0.53^{ns}
Rosmarinus	5.394^{*}	0.948^{*}	0.221^{ns}	1.281^{ns}

***: Significant difference at the probability level 5%, **: Significant difference at the probability level 1%, ^{ns}: No Significant difference.**

مقایسه تغییرات شاخص‌های رنگی L*، a* و b* در سه روش خشک‌کردن

تغییرات شاخص‌های رنگی L*، a* و b* در روش‌های خشک‌کردن به دلیل تغییر رنگ سبز گیاهان و کاهش کلروفیل است. هر چه مقدار کلروفیل در گیاهان بیشتر باشد رنگ سبز کمتر به سمت رنگ قرمز تمایل خواهد یافت. رنگ زرد در گیاهان خشک شده به دلیل افزایش دما است که باعث تخریب کلروفیل گیاهان و از بین رفتن رنگ‌دانه‌های سبز و مشاهده رنگ دانه‌های دیگر مانند کارتنوئیدها می‌شود (Sledz and Witrowa-Rajchert, 2012). مقدار شاخص رنگی L* در خشک‌کن کنترل اتمسفر در شکل (۱۲) به گیاهان تازه ریحان و آویشن نزدیک‌تر است که می‌تواند به دلیل خلأ موجود درون محفظه و اینکه هیدروژن و اکسیژن تحت کنترل هستند و استفاده از لامپ مادون‌قرمز باشد. از طرفی دیگر میزان شاخص‌های رنگی b* در گیاه ریحان و a* در گیاه رزماری در روش خشک کردن نرمال اتمسفر به گیاه تازه نزدیک‌تر هستند که می‌تواند به دلیل استفاده از لامپ مادون‌قرمز و فشار درون محفظه باشد.

سینتیک خشک‌کردن گیاه آگاروود و تغییرات رنگ آن در خشک‌کن خلأ مادون‌قرمز در چهار سطح دمایی ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه‌ی سلسیوس و فشار ۰/۶ بار بررسی شد (Alwi et al., 2022). آن‌ها با استفاده از فضای رنگی Lab به این نتیجه رسیدند که دمای پایین باعث حفظ رنگ دانه‌های گیاه می‌شود.

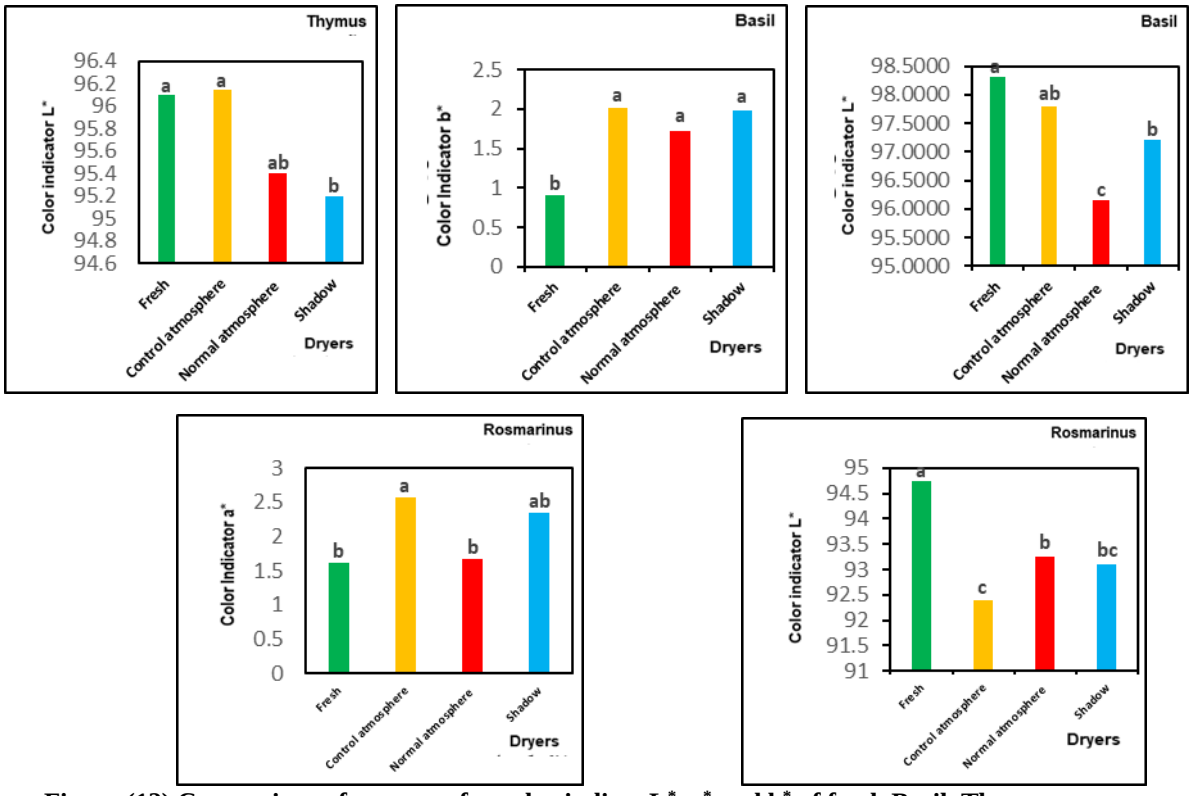


Figure (12) Comparison of averages for color indices L*, a* and b* of fresh Basil, Thymus, Rosmarinus leaves and different drying methods.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش به‌طور مؤثر نشان داد که:

۱. استفاده از خشک‌کن کنترل اتمسفر مادون‌قرمز نسبت به دو روش دیگر کمترین مدت زمان رطوبت‌زدایی، بیشترین ضریب تبیین را برای نمونه‌های آویشن و رزماری و کمترین را برای نمونه‌های ریحان و همچنین بیشترین ضریب مؤثر انتشار را داشت.

۲. بیشترین آهنگ رطوبت‌زدایی برای نمونه‌های ریحان و رزماری در خشک‌کن کنترل اتمسفر مادون‌قرمز و برای نمونه‌های آویشن در خشک‌کن نرمال اتمسفر مادون قرمز بود.

۳. از بینی الکترونیکی به‌عنوان تکنیکی غیرمخرب برای دریافت رایحه‌ی گیاهان خشک شده استفاده کرد.

۴. نمودار راداری تشخیص داد که کدام رایحه نمونه‌های خشک شده در خشک‌کن‌ها به گیاه تازه نزدیک تر است. بر اساس نمودار ریحان و رزماری در دو روش خشک کردن سایه خشک و کنترل اتمسفر مادون‌قرمز دچار کمترین تغییرات رایحه نسبت به گیاه تازه شده‌اند ولی درباره‌ی گیاه تازه آویشن این موضوع فقط در روش سایه خشک صدق می‌کند.

۵. دقت روش PCA برای افتراق گیاهان و خشک‌کن‌ها ۷۸ درصد بود، درحالی‌که دقت آموزش و دقت طبقه‌بندی در روش SVM برای افتراق گیاهان به ترتیب ۱۰۰ و ۷۵ درصد و به ترتیب برای نوع خشک‌کن‌های هر گیاه ۱۰۰ درصد و صفر بود؛ که در آخر بیشترین دقت طبقه‌بندی در روش ماشین بردار پشتیبان به دست آمد.

۶. شاخص‌های دو فضای رنگی RGB و Lab به شرایط خشک‌کردن در خشک‌کن‌ها از قبیل دما، مدت زمان رطوبت‌زدایی، فشار هوا و منبع حرارتی بستگی داشت.

۷. دو روش سایه خشک و نرمال اتمسفر در فضای رنگی RGB دچار کمترین تغییرات ظاهری نسبت به گیاه تازه شده‌اند. میزان شاخص رنگی R برای گیاه رزماری درروش خشک کردن نرمال اتمسفر دارای تغییرات کمتری نسبت به گیاه تازه شد. همچنین شاخص رنگی G برای گیاهان ریحان و آویشن خشک‌شده درروش سایه خشک دچار تغییرات کمتری نسبت به گیاه تازه را دارا بود. از طرفی شاخص رنگی B برای گیاهان ریحان و رزماری خشک شده در روش خشک کردن نرمال اتمسفر دچار تغییرات کمتری نسبت به گیاه تازه شد.

۸. دو روش کنترل اتمسفر و نرمال اتمسفر در فضای رنگی LAB دچار کمترین تغییرات ظاهری نسبت به گیاه تازه شده‌اند. شاخص رنگی L* برای گیاهان ریحان و آویشن در روش خشک‌کردن کنترل اتمسفر دارای تغییرات کمتری نسبت به گیاه تازه شد و همچنین شاخص‌های رنگی a* و b* به ترتیب در گیاهان ریحان و رزماری در روش خشک کردن نرمال اتمسفر دارای تغییرات کمتری نسبت به گیاه تازه بود.

سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله از دانشگاه بوعلی سینا که در تأمین هزینه‌های مالی این پژوهش در ما را یاری نمودند تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

Abdullah, M. Z., Guan, L. C., Lim, K. C., & Karim, A. A. (2004). The applications of computer vision system and tomographic radar imaging for assessing physical properties of food. *Journal of Food Engineering, 61(1),* 125-135. DOI: https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00194-8.

Ahmed, A. F., Attia, F. A., Liu, Z., Li, C., Wei, J., & Kang, W. (2019). Antioxidant activity and total phenolic content of essential oils and extracts of sweet basil (Ocimum basilicum L.) plants. *Food Science and Human Wellness, 8(3),* 299-305. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fshw.2019.07.004.

Ali, A., Oon, C. C., Chua, B. L., Figiel, A., Chong, C. H., Wojdylo, A., & Łyczko, J. (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 and Products, 151,* 112463. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112463.

Alibas, I., Yilmaz, A., Asik, B. B., & Erdoğan, H. (2021). Influence of drying methods on the nutrients, protein content and vitamin profile of basil leaves. *Journal of Food Composition and Analysis, 96,* 103758. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103758.

Alwi, H., Zubairy, N., & Hamid, K. H. K. (2022). Drying properties of agarwood leaves in vacuum far infrared dryer: Colour changes. *Materials Today: Proceedings, 63,* S174-S177. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.130.

Arabhosseini, A., Huisman, W., Van Boxtel, A., & Müller, J. (2009). Modeling of thin layer drying of tarragon (Artemisia dracunculus L.). *Industrial crops and products, 29(1),* 53-59. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.04.005.

Bahmanpour, H., Sajadiye, S. M., Sheikhdavoodi, M. J., & Zolfaghari, M. (2017). The effect of temperature and drying method on drying time and color quality of mint. *Journal of Agricultural Machinery, 7(2),* 415-426. DOI: https://doi.org/doi.10.22067/jam.v7i2.51268. [In Persian with English Abstract].

Banizaman, A., Mohtasebi, S. S., & Rafiee, S. (2020). Investigation of electronic nose system in classification of five types of native medical plants from Lamiales order. *Agricultural Machinery Mechanics Research Journal, 10(2),* 1-13. DOI: https://doi.org/10.22069/AMMRJ.2025.23175.1015. [In Persian with English Abstract].

Biabi, H., Abdanan Mehdizadeh, S., Nadafzadeh, M., & Salehi Salmi, M. (2019). Designing and developing a machine vision system to predict the chlorophyll and carotenoid content of plant leaves. *Journal of Agricultural Machinery, 9(2),* 279-293. DOI: https://doi.org/10.22067/jam.v9i2.71716. [In Persian with English Abstract].

Boustani, S., & Asefi, N. (2021). The effect of drying process on the physiochemical characteristics and quality of basil leaf leaves. *Food Technology & Nutrition, 18(1),* 5-16. DOI: https://doi.org/10.5958/2395-146X.2018.00059.5. [In Persian with English Abstract].

Dai, X., Zhao, J., Hua, L., Chen, H., & Liang, C. (2023). Thymus transplantation regulates blood pressure and alleviates hypertension-associated heart and kidney damage via transcription factors FoxN1 pathway. *International Immunopharmacology, 116,* 109798. DOI: https://doi.org/10.1016/j.intimp.2023.109798.

Dar, R. A., Shahnawaz, M., & Qazi, P. H. (2017). General overview of medicinal plants: A review. *The Journal of Phytopharmacology, 6(6),* 349-351. DOI: http://dx.doi.org/10.31254/phyto.2017.6608.

Dowlati, M., De la Guardia, M., & Mohtasebi, S. S. (2012). Application of machine-vision techniques to fish-quality assessment. *TrAC Trends in Analytical Chemistry, 40,*168-179. DOI: http://dx.doi.org/0.1016/j.trac.2012.07.011

Ghasempour, M., Iranbakhsh, A., Ebadi, M., & Oraghi Ardebili, Z. (2019). Multi-walled carbon nanotubes improved growth, anatomy, physiology, secondary metabolism, and callus performance in Catharanthus roseus: an in vitro study. *3 Biotech, 9(11),* Article no. 404. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s13205-019-1934-y.

Gholamhossinzade, B., Niknejad, Y., Fallah Amoli, H., & Mahdinia Afra, J. (2017). The effect of drying method on the amount and composition of essential oil of thyme in Polor, Amol city (Case Study). *Agricultural Researches in the Edge of the Desert, 14(2),* 133-143. DOI: [In Persian with English Abstract].

Giungato, P., Renna, M., Rana, R., Licen, S., & Barbieri, P. (2018). Characterization of dried and freeze-dried sea fennel (Crithmum maritimum L.) samples with headspace gas-chromatography/mass spectrometry and evaluation of an electronic nose discrimination potential. *Food Research International, 115*, 65-72. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.067.

Goñi, S. M., & Salvadori, V. O. (2017). Color measurement: comparison of colorimeter vs. computer vision system. *Journal of Food Measurement and Characterization, 11,* 538-547. DOI: https://doi.org/10.1007/s11694-016-9421-1.

Halahlah, A., Kavetsou, E., Pitterou, I., Grigorakis, S., Loupassaki, S., Tziveleka, L. A., & Detsi, A. (2021). Synthesis and characterization of inclusion complexes of rosemary essential oil with various β-cyclodextrins and evaluation of their antibacterial activity against Staphylococcus aureus. *Journal of Drug Delivery Science and Technology, 65,* 102660. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jddst.2021.102660.

Homayounfar, H., Amiri Chayjan, R., Sarikhani, H., & Kalvandi, R. (2020). Optimization of different drying systems for lavender leaves applying response surface methodology. *Journal of Agricultural Science and Technology, 22(3),* 679-692. DOI: https://civilica.com/doc/1817052.

Hosseini, H., Mohammad Zamani, D., & Master, A. (2020). Detection System for Sefidak Poudri Fungal Disease and Anthracnose Cucumber Leaf by Image Processing Technique and Artificial Neural Network. *Plant Protection (Scientific Journal of Agriculture), 40(4),* 15- 28. DOI: http://doi: 10.22092/erams.2020.341617.1338. [In Persian with English Abstract].

Hosseinzadeh, S., Jafarikukhdan, A., Hosseini, A., & Armand, R. (2015). The application of medicinal plants in traditional and modern medicine: a review of Thymus vulgaris. *International Journal of Clinical Medicine, 6(9),* 635-642. DOI: https://dx.doi.org/10.4236/ijcm.2015.69084.

Huang, M., Tang, J., Yang, B., & Zhu, Q. (2016). Classification of maize seeds of different years based on hyperspectral imaging and model updating. *Computers and Electronics in Agriculture, 122,* 139-145. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.029.

Jafarizadegan, M., Amiri Chayjan, R., & Karamian, R. (2020). Optimizing the performance of combined dryer (vacuum-infrared) in production process of edible button mushroom powder. *Agricultural Engineering, 43(2),* 141-161. DOI: https://dx.doi.org/10.22055/agen.2020.31903.1528. [In Persian with English Abstract].

Jha, S. N. (2010). Nondestructive Evaluation of Food Quality: Theory and Practice. Springer Science & Business Media. (first Edition).

Karami, H., Rasekh, M., & Mirzaee-Ghaleh, E. (2020). Application of the E-nose machine system to detect adulterations in mixed edible oils using chemometrics methods. *Journal of Food Processing and Preservation, 44(9),* e14696. DOI: http://dx.doi.org/10.1111/jfpp.14696.

Kasali, S., Minaei, S., & Ayyari, M. (2019). Effect of the drying process on saffron petals color features using machine vision. *Saffron Agronomy & Technology, 7(1),* 81-91. DOI: https://www.magiran.com/p1937418.

Khorramdel, S., Shabahang, J., & Asadi, G. A. (2013). Effect of drying methods on drying time, essential oil quantitative and qualitative of some of medicinal plants. *Eco-phytochemical Journal of Medical Plants, 1(1),* 1-13. DOI: https://doi.org/10.22087/pjmp%20med%20j.v4i4.779. [In Persian with English Abstract].

Kiani. S., Minaei, S., & Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2018). Real-time aroma monitoring of mint (Mentha spicata L.) leaves during the drying process using electronic nose system. *Measurement, 124*, 447-452. DOI: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.033.

Lima-Corrêa, R. D. A. B., Dos Santos Andrade, M., Freire, J. T., & Do Carmo Ferreira, M. (2017). Thin-layer and vibrofluidized drying of basil leaves (Ocimum basilicum L.): analysis of drying homogeneity and influence of drying conditions on thecomposition of essential oil and leaf colour. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 7*, 54-63. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jarmap.2017.05.001.

Makarichian, A., Chayjan, R. A., Ahmadi, E., & Mohtasebi, S. S. (2021). Assessment the influence of different drying methods and pre-storage periods on garlic (Allium Sativum L.) aroma using electronic nose. *Food and Bioproducts Processing, 127*, 198-211. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.02.016.

Matar, C., Salou, T., Hélias, A., Pénicaud, C., Gaucel, S., Gontard, N., & Guillard, V. (2021). Benefit of modified atmosphere packaging on the overall environmental impact of packed strawberries. *Postharvest Biology and Technology, 177*, 111521, 1-11. DOI: https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111521.

Mbegbu, N. N., Nwajinka, C. O., & Amaefule, D. O. (2021). Thin layer drying models and characteristics of scent leaves (Ocimum gratissimum) and lemon basil leaves (Ocimum africanum). *Heliyon, 7(1).* e05945. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05945.

Mohammadi, M., & Mohammad pour Karizaki, V. (2016). The study of osmotic dehydration of potato by using image processing. *Quarterly Journal of Food Scince and Technology. 56(13),* 81-90. DOI: https://www.magiran.com/p1526080. [In Persian with English Abstract].

Motevali, A., Kiani, R., & Hashemi, S. J. (2017). Investigating thermodynamic parameters and the amount of essential oil in rosemary drying process using pulsed microwave pretreatment. *Scienttific Research Journal of Energy Engineering and Management, 7(2),* 42-51. DOI: http://dx.doi.org/10.22104/srjeem.2019.3500.1839. [In Persian with English Abstract].

Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. *Comprehensive reviews in food science and food safety, 15(3),* 599-618. DOI: http://dx.doi.org/10.1111/1541-4337.12196/pdf.

Pisner, D. A., & Schnyer, D. M. (2020). Support vector machine. In Machine learning. Academic Press Book. 101-121. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-815739-8.00006-7.

Rahmani, H., & Alwi, S. N. (2012). A method for grading mazafati dates using image processing. *Iranian Journal of Biosystems Engineering, 43(1),* 19-28. DOI: https://www.magiran.com/p1178618. [In Persian with English Abstract].

Rasekh, M., Karami, H., Kamruzzaman, M., Azizi, V., & Gancarz, M. (2023). Impact of different drying approaches on VOCs and chemical composition of Mentha spicata L. essential oil: A combined analysis of GC/MS and E-nose with chemometrics methods. *Industrial Crops and Products, 206,* 117595. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117595.

Russo, M., Serra, D., Suraci, F., Di Sanzo, R., Fuda, S., & Postorino, S. (2014). The potential of e-nose aroma profiling for identifying the geographical origin of licorice (Glycyrrhiza glabra L.) roots. *Food Chemistry, 165*, 467-474. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.142.

Sadati Ardestani, N., Rojas, A., Esfandiari, N., Galotto, M. J., Babhadiashar, A., & Sajadian, S. A. (2022). Supercritical fluid extraction from Zataria multiflora boiss and impregnation of bioactive compounds in PLA for the development of materials with antibacterial properties. *Processes, 10(9),* 1787. DOI: https://doi.org/10.3390/pr10091787.

Safari Amiri, Z., Ghasemi Varnamkhasti, M., Tohidi, M., Mohtasbi, S. S., & Dowlati, M. (2017). Using the olfactory machine system to detect fraud in cumin. Journal of New *Food Technologies, 5(3),* 527-541. DOI: http://dx.doi.org/10.22104/JIFT.2017.2487.1579. [In Persian with English Abstract].

Salam, S., & Kheiralipour, K. (2021). Development and evaluation of chickpea classification system based on visible image processing technology and artificial neural network. *Innovative Food Technologies, 9(2),* 181-193. DOI: http://dx.doi.org/10.22104/jift.2021.5173.2063. [In Persian with English Abstract].

Samadi, M. A., Seyyedlow, S. S., Rohani, A., & Nikbakht, A. M. (2022). Application of electronic nose system based on support vector machine algorithm to detect the purity of peppermint essential oil. *Agricultural Machinery Mechanics Research Journal, 11(1),* 22, 41-49. DOI: https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2022.10098.542. [In Persian with English Abstract].

Shad, E., Hashemi Gahruie, H., Golmakani, M. T., & Mazidi, S. (2015). A Comparative study on microwave dry-diffusion and gravity extraction method on the quality of rosemary essential oil. *Journal of Research and Processing in Food Science and Industry, 4(3),* 257-270. DOI: http://www.rifst.ac.ir/jrifst.aspx. [In Persian with English Abstract].

Siedliska, A., Baranowski, P., & Mazurek, W. (2014). Classification models of bruise and cultivar detection on the basis of hyperspectral imaging data. *Computers and Electronics in Agriculture, 106,* 66-74. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.05.012. [In Persian with English Abstract].

Simon, P. W. (2014). Progress toward increasing intake of dietary nutrients from vegetables and fruits: The case for a greater role for the horticultural sciences. *HortScience, 49(2),* 112-115. DOI: http://dx.doi.org/10.21273/HORTSCI.49.2.112.

Sledz, M., & Witrowa-Rajchert, D. (2012). Influence of microwave-convective drying of chlorophyll content and colour of herbs. *Acta Agrophysica, 19(4)*. 865-876.

Tanrıkulu, G. İ., Ertürk, Ö., Yavuz, C., Can, Z., & Çakır, H. E. (2017). Chemical compositions, antioxidant and antimicrobial activities of the essential oil and extracts of Lamiaceae family (Ocimum basilicum and Thymbra spicata) from Turkey. *International Journal of Secondary Metabolite, 4(3, Special Issue 2),* 340-348. DOI: http://dx.doi.org/10.21448/ijsm.373828.

Therdthai, N., & Zhou, W. (2009). Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (Mentha cordifolia Opiz ex Fresen). *Journal of Food Engineering, 91(3),* 482-489. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.09.031.

Tirandaz, M. M., Rabani, H., Mirzayi Ghale, E., Khorami Vafa, M., & Vasali, f. (2021). Study on classification of oregano leaf color change due to heavy metal absorption using artificial neural network and image processing methods. *Environmental Research, 12,* 24, 209-222. DOI: https://www.magiran.com/p2418848. [In Persian with English Abstract].

Tohidi, M., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Ghafari nia, V., Mohtasbi, S. S., & Bonyadian, M. (2016). Construction and development of an olfactory machine system combined with pattern recognition methods for detecting formalin adulteration in raw milk. *Iranian Biosystems Engineering, 47(4),* 761-770. DOI: https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.60273. [In Persian with English Abstract].

Yang, W., Yu, J., Pei, F., Mariga, A.M., Ma, N., Fang, Y., & Hu, Q. (2016). Effect of hot air drying on volatile compounds of Flammulina velutipes detected by HS-SPME–GC– MS and electronic nose. *Food Chemistry 196,* 860-866. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.097.

Zurpikar, S., Mirzayi Ghale, E., Karami, H., Ramdani, Z., & Wilson, A. D. (2023). Investigating the effect of mentha plant growth age on the aroma released from the leaves using electronic nose and chemometrics methods. *Agricultural Machinery Mechanics Research Journal, 12(3),* 75-83. DOI: https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2023.14116.631. [In Persian with English Abstract].