

Drying kinetics and overall color change of *Allium hirtifolium* dried in an air-impingement jet dryer

Esmaeil Seidi ^{1*}, Aydin Salimi asl ², Mohammad Hadi Mohammadi ³

¹Assoc. Prof, Department of Agricultural, Payame Noor University, Tehran, Iran

²Assoc. Prof, Department of Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

³MSc. student, Agricultural Department, Payame Noor University, Tehran, Iran

Article information

Received: 2024/11/11

Accepted: 2025/01/23

Keywords:

Allium hirtifolium

Drying

Colour change

Air jet impingement

*Corresponding author:

e_seidi@pnu.ac.ir

ORCID: 

0000-0002-0517-5024



Extended Abstract

Introduction

Allium hirtifolium is one of the most commonly used agricultural products in the food industry in Iran, because it is rich in minerals, vitamins, essential fatty acids, and antioxidant compounds. Due to the major consumption of powdered *allium hirtifolium* in products that may be stored on the shelf for weeks or months, drying is one of the essential steps in its processing to preserve it longer. Today, due to the non-sterility and low quality of the dried product resulting from the old method of using sunlight, this method is no longer used, and industrial dryers are employed to dry the products. There are numerous methods for drying agricultural products. Each method has some benefits and some limitations. Energy consumption of the process, drying time, quality of the final product, and available technology are the most important factors in selecting the method to be used for a specific product. Among the drying methods, the impact jet method has been considered by many researchers in recent years. A major part of the results that have been reported shows that this technique could be a suitable method for drying a wide range of agricultural products. The advantages of this type of dryer include high heat transfer, reduced drying time, and increased quality of the final product.

Method

In the present study, the relationship between some factors that can affect the drying process and the final reduction of humidity of *Allium hirtifolium* slices was studied. Also, some visual factors, such as the colour of the slices after drying time, were considered. The effect of air temperature at three levels of 50, 60 and 70 degrees

Celsius, the velocity of the air coming out of the nozzles at three levels of 7, 10 and 13 meters per second and the ratio of the distance from the nozzle to the product surface to the nozzle diameter H/D. Three levels 4, 5 and 6 in the collision jet dryer were investigated on the drying rate and color of *Allium hirtifolium* leaves. The experiments were conducted using the response surface method and the central composite design in face-centered mode.

Results

As expected, the air temperature of the dryer had a reverse relationship with drying time. With an increase in fluid temperature from 50° C to 70° C, the drying time was reduced from 95 minutes to 50 minutes. Of course, the relationship was not linear. At the first period of the drying process, in which the humidity content of the slices was higher, the water evaporation rate from the surface of *Allium hirtifolium* pieces was higher. Over time, the evaporation rate was reduced because of the reduction in the water content portion of the slices. Additionally, it was clarified that, although all three factors of air temperature, ratio of distance to diameter, and air velocity affected the drying process, the role of fluid temperature was the most significant. Increasing air velocity was also reduced during the period. At a constant 60° C temperature of fluid, by increasing the speed level of air from 7 ms^{-1} to 13 ms^{-1} drying time was reduced from 90 minutes to 70 minutes. This relationship was not linear and had a more significant effect at lower speeds. The ratio of the distance from the nozzle to the product surface to the nozzle diameter, H/D, was another effective factor, the role of which on drying time was confirmed. When the H/D ratio was 4, the drying period time was 75 minutes. For an H/D ratio of 5, the drying period time was 80 minutes, and for an H/D ratio of 6, the drying period time was 90 minutes. So, it is clear that although the H/D ratio has an effect on the drying period time, its portion is minor. Another parameter that has been studied in this research is the final colour of *Allium hirtifolium* pieces. To quantify this parameter, three indices were used: (a^*), (b^*), and (L^*). These indices were used to consider suitable situations and select the best combinations of effective factors in the drying process. To achieve final results and visualize complex data, the collected quantities of measured parameters were presented in 3D graphs, allowing for the analysis of holistic situations and effects. By studying these graphs, it can be seen that if one of the effective factors, such as the H/D ratio, were constant, another factor could affect the drying process by itself or in combination with the third one.

Conclusions

Many drying methods have been used by researchers in Iran to prepare *Allium hirtifolium* pieces as a widely used industrial product. Among them, the impact jet method is probably the best. Obviously, some factors, such as air temperature, air velocity, and H/D ratio, have a serious effect on the drying period time of the product and the quality of the final leaves. Finding the best combinations of these factors that yield the best outcome with minimum inputs is the big challenge that has been studied in this research. So many experiments were conducted to consider various situations. The results showed that high drying rates occur at high temperatures and air velocities, as well as low H/D ratios. The most effective factor was air temperature. Also, the effect of two variables, temperature and air speed, on the variation of color change indexes, ΔL^* and Δb^* was significant, but H/D had no significant effect on these indices. Optimal conditions for drying *Allium hirtifolium* leaves with a jet dryer at 69 ° C, H/D ratio equal to 5.1, and air speed of 10.4 (m/s) were suggested.

Author Contributions

Esmaei Seidi: 34%

Aydin Salimi asl: 33%

Mohammad Hadi Mohammadi: 33%

Data Availability Statement

Not applicable.

Acknowledgements

Not applicable.

Ethical Considerations

This section states ethical approval details (e.g., Ethics Committee, ethical code) and confirms adherence to ethical standards, including avoidance of data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper

Funding Statement

The author(s) received no specific funding for this research

How to cite this paper:

Seidi, E., Mohammadi, M.H, Salimi asl, A. (2025). Drying kinetics and overall color change of *Allium hirtifolium* dried in an air-impingement jet dryer. Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery. 35: 51-68. <https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2025.15003.732>.



Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by [Shahrekord University](#). This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](#)



تغییرات رنگ و سینتیک خشک شدن برگه‌های نازک موسیر در خشک‌کن جت برخوردی

اسماعیل صیدی^{۱*}، آیدین سلیمی اصل^۲، محمد هادی محمدی^۳

۱- استادیار، گروه مکانیزاسیون، دانشکده کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیزاسیون، دانشکده کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

با توجه به مصرف عمده موسیر بصورت پودر در صنایع غذایی، خشک کردن آن ضروری است. امروزه به دلیل استریل نبودن و کیفیت پایین محصول خشک شده بوسیله روش قدیمی استفاده از نور خورشید، از این روش استفاده نمی‌شود و برای خشک کردن محصولات از خشک‌کن‌های صنعتی استفاده می‌شود. در میان روش‌های خشک کردن، بکارگیری روش جت برخوردی در سال‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. از مزیت‌های این نوع خشک‌کن می‌توان به انتقال حرارت بالا، کاهش مدت زمان خشک کردن و افزایش کیفیت محصول نهایی اشاره کرد. در پژوهش حاضر تاثیر دمای هوا در سه سطح ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس، سرعت هوای خروجی از نازل‌ها در سه سطح ۷، ۱۰ و ۱۳ متر بر ثانیه و نسبت فاصله نازل تا سطح محصول به قطر نازل یا همان نسبت H/D در سه سطح ۴، ۵ و ۶ در خشک‌کن جت برخوردی بر روی نرخ خشک شدن و تغییرات رنگ برگه‌های موسیر بررسی گردید. آزمایشات به روش سطح پاسخ (Response Surface Method) و طرح مرکب مرکزی (Central Composite Design) در حالت مرکز وجهی انجام و تحلیل گردید. نتایج نشان داد که دستیابی به نرخ خشک شدن بالا در دما و سرعت‌های بالای هوا و نسبت H/D های پایین روی می‌دهد. همچنین اثر دو متغیر دما و سرعت بر تغییر شاخص‌های تغییر رنگ معنی‌دار بوده اما نسبت H/D بر این شاخص‌ها اثر معنی‌دار نداشت. همچنین تاثیر دمای هوا بر نرخ خشک شدن برگه‌های موسیر بیشتر از سرعت هوا بود. اثر دما و سرعت هوا بر شاخص‌های ΔL^* و Δb^* تغییر رنگ در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود ولی نسبت H/D اثر معنی‌داری بر این شاخص‌ها نداشت. شرایط بهینه برای خشک شدن برگه‌های موسیر با خشک‌کن جت برخوردی دمای ۶۹ درجه سلسیوس، نسبت H/D برابر با ۵/۱ و سرعت هوای ۱۰/۴ متر بر ثانیه پیشنهاد گردید.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۴

واژه‌های کلیدی:

موسیر

خشک کردن

تغییرات رنگ

جت برخوردی

* پست الکترونیکی نویسنده

مسئول:

e_seidi@pnu.ac.ir

ORCID: 

۰۰۰۰-۰۰۰۲-۰۵۱۷-۵۰۲۴



مقدمه

کم کردن آب محصولات تولیدی کشاورزی و نیز مواد غذایی به خاطر کاستن وقوع واکنش‌های شیمیایی مخرب و کم شدن و یا توقف کامل رشد و نمو میکروارگانیسم‌های فاسد کننده مواد غذایی را فرایند خشک‌شدن می‌گویند. البته معنی ومفهوم خشک‌شدن^۱ با آبگیری^۲ یکسان نمی‌باشد. و بر اساس نظر کارگروه کشاورزی ایالات متحده آمریکا تفاوت میان این دو، در مقدار رطوبت موجود در محصول نهایی می‌باشد. به طوری که در روش آبگیری، میزان رطوبت باقیمانده در محصولات و مواد غذایی به دست آمده باید زیر ۳٪ بر پایه وزن خشک ماده^۳ باشد. درحالی که در روش خشک‌شدن، رطوبت باقیمانده در محصولات ومواد غذایی باید بیشتر از ۳٪ بر پایه وزن خشک ماده باشد پیاز و برگ موسیر به طور گسترده درکارخانجات صنایع غذایی و غذاهای مختلف از قبیل ماست، ترشی، برنج، گوشت، سس‌ها و سالادها به عنوان چاشنی و طعم دهنده استفاده می‌شود. در طب سنتی موسیر به عنوان یک گیاه دارویی شناخت شده است و از پیازهای این گیاه در صنایع داروسازی استفاده می‌شود. موسیر غنی از املاح معدنی، ویتامین‌ها، اسیدهای چرب ضروری بدن و ترکیبات آنتی اکسیدان می‌باشد. پیاز موسیر مانع از تکثیر سلول‌های سرطانی می‌شود و در درمان رماتیسم و ترمیم زخم‌های سطحی، سنگ کلیه، کاهش فشارخون و تقویت سیستم گوارش موثر است. همچنین به عنوان عطر و طعم دهنده در صنایع دارویی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Omidifar et al., 2020).

متداول‌ترین روش خشک کردن محصولات کشاورزی در ایران خشک کردن در مقابل نور خورشید و در فضای آزاد است که منجر به بروز مشکلاتی همچون کاهش کیفیت محصول، رشد میکروارگانیسم‌ها و فاسد شدن محصول، هجوم پرندگان و حشرات، بهداشتی نبودن و مشکلات آب و هوایی است (Poorgharib et al., 2023).

موسیر محصولی است که پس از برداشت و برای استفاده در صنایع غذایی باید به صورت پودر درآید و لازمه این کار این است که ابتدا خشک شود. با توجه به حساسیت موسیر به نور آفتاب حتما باید دور از نور آفتاب خشک شود و این کار به روش سنتی نیاز به زمان و فضای زیادی دارد

و در حجم زیاد و صنعتی تقریباً غیر ممکن است، درنتیجه استفاده از خشک‌کن‌های صنعتی برای خشک کردن آن در حجم زیاد ضروری است. خشک کردن میوه‌ها و سبزیجات با هدف ارتقای شرایط نگه داری، کوچک‌ترکردن جای مورد نیاز بسته‌بندی و کم‌ترکردن وزن هنگام حمل ونقل انجام می‌شود. شیوه‌های خشک کردن قدیمی به وسیله نور خورشید به دلیل کاهش کیفیت محصول و بهداشتی نبودن امروزه دیگر مورد استفاده قرار نمی‌گیرند و جای خود را به شیوه‌های دستگاهی داده‌اند. از نکات دارای اهمیت در انتخاب روش خشک کردن می‌توان به کیفیت محصول خشک شده، اندازه انرژی مصرف شده، سرعت خشک کردن و هزینه کم اشاره نمود (Sagar & Kumar, 2010). خشک‌کن جت برخوردی فن آوری با عملکرد بالا برای ارتقای انتقال حرارت است. از این فن آوری در فرآیندهای صنعتی برای خشک کردن، گرم کردن و سرد کردن استفاده می‌گردد به دلیل اینکه سرعت انتقال حرارت در ناحیه تاثیر جت بسیار بالاست موجب سرد یا گرم شدن سریع موضع می‌شود (Wae-hayee et al., 2013).

با توجه به نیاز به محصول خشک شده موسیر در بازار ایران و همچنین نوین بودن روش خشک کردن با جت برخوردی، در این تحقیق به بررسی پارامترهای موثر بر کیفیت و زمان خشک شدن برگه‌های موسیر شامل دما و سرعت هوای خارج شده از نازل‌ها و نسبت فاصله نازل‌ها تا محصول به قطر نازل‌ها پرداخته شده است.

عملیات خشک کردن بر کیفیت محصول و قیمت آن تاثیر زیادی می‌گذارد. کیفیت محصول بستگی به میزان تغییرات فیزیکی و بیوشیمیایی که در طول فرآیند خشک کردن در آن اتفاق می‌افتد دارد. دما، زمان خشک شدن و فعالیت آبی در هنگام عملیات خشک کردن، بر روی کیفیت محصول نهایی تاثیر می‌گذارد. دماهای پایین زمان خشک شدن را طولانی‌تر می‌کنند اما اثر مثبتی بر کیفیت محصول دارد (Cárcel et al., 2007).

خشک‌کن جت برخوردی

از جت برخوردی در صنایع به منظور گرما دادن، خنک کردن یا خشک کردن محصولات استفاده می‌گردد. روش جت برخوردی تاکنون معمولاً برای سطوح پیوسته همچون کاغذ، فلزات، منسوجات و ... رایج است. در خشک‌کن‌ها

³-Dry basis

¹-Drying

²-Dehydration

دادند که روش جت برخوردی در خشک کردن برگه سیب-زمینی سیستمی کارآ است (Farzad *et al.*, 2022). تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از تکنولوژی جت برخوردی هوا در خشک کردن: تخریب ساختار محصول در اثر گرما که در هنگام خشک کردن محصول روی می‌دهد به طور مستقیم وابسته به دما و زمان خشک شدن می‌باشد. در نتیجه خشک‌کن جت برخوردی با کمتر کردن زمان خشک شدن، محصولی با ساختار یکنواخت‌تر، بهداشتی‌تر و خوش رنگ‌تر تولید می‌کند (Zheng *et al.*, 2021).

محققان برای مطالعه خشک‌کن جت برخوردی بر خشک شدن جنسینگ تحقیقاتی انجام دادند و دریافتند که نرخ خشک شدن برگه‌ها در مقایسه با روش‌های دیگر افزایش داشت. همچنین مدت زمان خشک شدن تحت تاثیر دمای هوا، سرعت هوا و ضخامت برگه‌های جنسینگ می‌باشد. تاثیر دمای هوا و ضخامت نمونه‌ها بر رنگ نمونه‌ها معنی‌دار بود، اما اثر سرعت هوا معنی‌دار نبود. همچنین اثر دمای هوا، سرعت هوا و ضخامت نمونه‌ها بر نسبت آبگیری مجدد نمونه‌ها کاهشی است (Xiao *et al.*, 2014).

محققین در تحقیقی که با خشک کردن برگه‌های ملون بوسیله خشک‌کن ترکیبی جت برخوردی و مایکرو ویو انجام دادند به این نتیجه رسیدند که مدت زمان خشک شدن نسبت به روش‌های دیگر به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرد. هم چنین افزایش دمای هوا و ضخامت نمونه‌ها، مقدار ضریب نفوذ موثر در نمونه‌ها را افزایش داد (Zheng *et al.*, 2014).

گروهی دیگر با انجام پژوهشی درخصوص سینتیک خشک شدن برگه‌های جنسینگ آمریکایی بوسیله خشک‌کن جت برخوردی نشان دادند که دمای هوا نسبت به اندازه ضخامت نمونه و شدت هوای ورودی تاثیر بیشتری روی زمان خشک شدن دارند. (Wang *et al.*, 2015)

محققین دیگر دریافتند در خشک شدن نمونه‌های پیاز با استفاده از خشک‌کن جت برخوردی با کاهش مدت زمان خشک شدن نمونه‌ها، بهبود نرخ خشک شدن ارتقا یافته و کاهش کمتر مقدار ویتامین ث کمتر کاهش پیدا کرد که نشان‌دهنده مزیت این خشک‌کن‌ها نسبت به خشک‌کن‌های متداول می‌باشد (Li *et al.*, 2015).

مقدار انرژی مصرف شده و مسایل زیست محیطی جزء مشکلات به شمار می‌آیند که خشک‌کن جت برخوردی نیز از این قاعده مستثنی نمی‌باشد. دلیل اصلی اتلاف انرژی، در عملیات خشک کردن انتقال حرارت کم است که این مشکل در خشک‌کن جت برخوردی به علت قابلیت انتقال حرارت بالا پایینترین اتلاف افت انرژی را دارد. استفاده از پتانسیل تکنولوژی هوای جت در صنایع پخت نان در فرانسه توانست میزان صرفه جویی در مصرف انرژی را نسبت به سایر تکنولوژی‌های متداول به بالاتر از ۱۲ درصد برساند (Xiao *et al.*, 2014). از مزیت‌های دیگر آن کاهش زمان خشک کردن و حفظ کیفیت محصول است (Wang *et al.*, 2015). بنابراین نیاز است پژوهش‌هایی در خصوص تکنولوژی‌های خشک کردن با مصرف انرژی کمتر و حفظ کیفیت محصول انجام شود (Ljung *et al.*, 2017). در هنگام خشک کردن با دستگاه جت برخوردی، هوای داغ با فشار زیاد بر روی سطح محصول دمیده شده و ایجاد بستری از هوای داغ می‌کند که محصول را احاطه کرده و موجب نازک شدن برگه‌های مرزی دما می‌شود و سرعت انتقال حرارت افزایش می‌یابد، زمانی که به حرارت بالا و یکنواخت بر روی سطحی گسترده نیاز باشد از جت‌های برخوردی چندگانه^۱ استفاده می‌شود و یا چینی‌ها نازل‌ها تغییر می‌یابد (Sarkar *et al.*, 2004).

روش جت برخوردی کاربرد زیادی جهت سرد و گرم کردن سطوح دارد که به دلیل افزایش سرعت انتقال گرما و در نتیجه کاهش زمان خشک شدن، استفاده‌های فراوانی در صنایع مختلف دارد که از جمله آن‌ها می‌توان صنایع غذایی، ساخت منسوجات و کاغذ را نام برد. به عنوان مثال پژوهشگران با استفاده از این دستگاه خشک کردن برگه کیوی را انجام دادند (Huang *et al.*, 2017)، گروهی دیگر با این روش نتایج خوبی در خشک کردن برگه پیاز به دست آوردند (Sasongco *et al.*, 2020). همچنین پژوهشگران خشک کردن برگه جنسینگ آمریکایی را با این روش مورد پژوهش قرار دادند (Ju *et al.*, 2020). در تحقیقی دیگر کارایی این دستگاه در خشک کردن برگه ملون نشان داده شد (Jin *et al.*, 2024). همچنین در خشک کردن انگور بی‌دانه و هویج نتایج قابل قبولی از این سیستم گزارش شده است (Xiao *et al.*, 2010(b)). محققین دیگر نیز گزارش

¹ Multiple Jet Dryer

همچنین پژوهشگران با بررسی بافت، رنگ، میکرو ساختار و ماندگاری ارزش تغذیه برگه‌های کیوی خشک شده با روش‌های جت برخوردی و انجمادی دریافتند که خشک‌کن جت برخوردی به دلیل بازدهی نسبتاً بالا، انرژی مصرفی پایین و کیفیت بالای خشک کردن، برای ترکیب با خشک‌کن انجمادی مناسب می‌باشد. از نتایج دیگر این تحقیق این بود که نشان داد ترکیب این دو روش علاوه بر پایین بودن تغییرات رنگ نمونه‌ها، موجب حفظ ساختار برگه‌ها شده که در نتیجه سبب افزایش نسبت آگیری مجدد در نمونه‌ها شده بود (Huang et al., 2017).

گروهی نیز طی پژوهشی که در خصوص پارامترهای خشک‌کن جت برخوردی را بر سینتیک و کیفیت برگه‌های توت فرنگی را انجام دادند دریافتند که پارامترهای دمای هوا و سرعت هوا بیشترین تاثیر و H/D کمترین تاثیر را بر مدت زمان خشک شدن دارند. اثر دما و سرعت هوا بر زمان خشک شدن در سطح یک درصد معنی‌دار است اما اثر متقابل این دو پارامتر در سطح پنج درصد هم معنی‌دار نیست. نتایج نشان داد که تاثیر دمای هوا بر نرخ خشک شدن بیشتر از سرعت هوا بوده و افزایش H/D سرعت خشک شدن برگه‌های توت فرنگی را کاهش می‌دهد. آنها همچنین دریافتند که ضریب انتشار موثر با افزایش دما و سرعت هوا افزایش پیدا می‌کند. انرژی فعال‌سازی برگه‌های توت فرنگی در این شیوه $12/88$ تا $16/74$ کیلوژول بر مول برآورد گردید. آنها براساس این تحقیق مدل وانگ و سینگ با بیشترین R^2 و کمترین RMSE را برای پیش بینی نسبت رطوبت تعیین کردند. آنها همچنین متوجه شدند نسبت آگیری مجدد که پارامتری کیفی است با افزایش دما و سرعت هوای خروجی کاهش و با بالا رفتن H/D افزایش می‌یابد (Rad et al., 2021).

در پژوهشی دیگر خشک کردن موسیر تحت امواج مایکروویو مورد بررسی قرار گرفت. آنها از پردازش داده‌های آزمایشگاهی خود به ۱۰ مدل رایج مورد استفاده برای پیش بینی سینتیک خشک کردن مواد غذایی دریافتند که مدل دوجمله‌ای بهتر از سایر مدل‌ها سینتیک خشک کردن موسیر به روش مایکروویو در محدوده توان ۴۵۰ تا ۹۰۰ وات را پیش بینی می‌کند. نتایج حاصل از آزمایشات آنها نشان داد که با افزایش توان مایکروویو، سرعت خشک کردن نیز افزایش و زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. کمترین زمان خشک شدن مربوط به توان مایکروویو ۹۰۰

وات به دست آمد که در آن، زمان خشک شدن ۱۸ دقیقه بود که در مقایسه با زمان خشک کردن به روش هوای گرم که در مدت زمان ۴۰۰ دقیقه ۹۵ درصد به دست آمد. آنها همچنین اعلام کردند که با افزایش توان مایکروویو ضریب نفوذ رطوبت افزایش و انرژی فعالسازی موسیر کاهش پیدا می‌کند. در این تحقیق، پارامترهای رنگ موسیر نیز بررسی گردید و بهترین توان از نظر تغییر رنگ کل، توان ۴۵۰ وات و از نظر شاخص قهوه‌ای شدن، توان ۹۰۰ وات گزارش شده است (Abbasi et al., 2020).

در مطالعه‌ای تاثیر روش ترکیبی مایکروویو - هوای گرم بر سینتیک و خواص ظاهری موسیر بررسی شد. در این روش، پس از ایجاد امواج مایکروویو (۶۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ وات) نمونه‌ها بوسیله فرآیند ترکیبی خشک کردن امواج مایکروویو و هوای گرم قرار گرفتند. نتایج آزمایشات نشان داد که بهترین مدل برای مدل کردن سینتیک خشک کردن برشهای موسیر به این روش مدل لگاریتمی بود. همچنین تحلیل شکلهای خشک شدن نشان داد که افزایش توان مایکروویو باعث کاهش زمان خشک شدن و افزایش سرعت فرآیند شد و در قسمت ترکیبی نیز تاثیر توان مایکروویو به دلیل انرژی بالاتر غالب بود. نقطه‌ای بهینه‌ی عملیاتی برای دستیابی به کمترین زمان خشک کردن و کمترین میزان رطوبت در شوک ۹۰۰ وات و شرایط ترکیبی ۴۵۰ وات و دمای ۸۰ درجه سانتی گراد به‌وقوع پیوست. در اظهارنظر نهایی روش ترکیبی پیشنهادی نسبت به روش مایکروویو تنها، روش موثری برای حفظ خصوصیات کیفی محصول بود و کاربرد آن در خشک کردن موسیر توصیه شد (Karimi et al., 2021).

با توجه به پژوهش‌های انجام شده در زمینه استفاده از روش جت برخوردی برای خشک کردن محصولات کشاورزی و جدید بودن روش و عدم استفاده از این روش برای خشک کردن موسیر، لازم به نظر می‌رسد که سینتیک و کیفیت برگه‌های موسیر با این نوع خشک‌کن بررسی شود. با توجه به اینکه در موارد بررسی شده درباره خشک کردن محصولات هم چون انگور، ملون، کیوی و هویج نتایج خوبی حاصل شده است، انتظار می‌رود این روش، در خشک کردن موسیر نیز نتایج مطلوبی بدست دهد.

مواد و روش‌ها

خشک‌کن جت برخوردی: خشک‌کن جت برخوردی جزء خشک‌کن‌های با تکنولوژی نسبتاً جدید در صنعت می‌باشد

نازل H/D، به ترتیب در سه سطح (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس)، (۷، ۱۰ و ۱۳ متر بر ثانیه) و (۴، ۵ و ۶) انتخاب گردید. ضخامت برگه‌های موسیر در آزمایشات ثابت و برابر ۲ میلی‌متر در نظر گرفته‌شد. تیمارهای مورد نیاز برای بررسی با معرفی پارامترها و سطوح آنها به نرم‌افزار Design Expert نسخه ۸، توسط این نرم افزار ۲۱ تیمار تعیین گردید.



شکل ۲. فاصله نازل تا سطح محصول

آزمایشات انجام شده

بعد از انجام تمامی آزمایشات نتایج در نرم افزار Excell 2013، ثبت و در هر آزمایش منحنی تغییرات رطوبت در مقابل زمان رسم شد. آزمایشات انجام شده در این تحقیق به شرح زیر بود:

آماده‌سازی نمونه: موسیر مورد استفاده برای انجام آزمایشات از موسیر تازه برداشت شده از مزرعه روستای تپه محمدی حوزه شهرستان بیجار تهیه و در شرایط ۲ تا ۴ درجه سلسیوس تا زمان انجام آزمایشات در یخچال نگهداری گردید. قبل از شروع آزمایشات خشک کردن، موسیرها در محیط آزمایشگاه قرار داده شدند تا به دمای محیط (۲۵ درجه) برسند. به منظور جلوگیری از گرم شدن تدریجی اتاق آزمایش و عدم تاثیرگذاری دمای اتاق بر نمونه‌ها دمای محیط بوسیله دستگاه تهویه در حد متعارف ۲۵ درجه سانتی گراد تثبیت گردید. غده‌های موسیر توسط یک اسلایسر با ضخامت ۲ میلی‌متر برش داده شد. بلافاصله نمونه‌ها توزین شده و بر روی توری دستگاه خشک‌کن به صورت برگه نازک قرار داده شد و در فاصله‌های زمانی ۵

که اخیراً در پژوهش‌های مربوط به خشک کردن برگه نازک میوه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. خشک‌کن جت برخوردی استفاده شده در این تحقیق مطابق شکل ۱ از ۸ قسمت تشکیل شده است.



شکل ۱. دستگاه جت برخوردی

تابلو کنترل دما و سرعت هوا ۲- دمنده هوا ۳- گرم‌کن الکتریکی ۴- شیر تنظیم دبی هوا ۵- پلنوم ۶- صفحه مشبک ۷- صفحه نازل ۸- نازل هوا

نحوه کار دستگاه خشک‌کن جت برخوردی: هوا توسط یک پمپ دمنده به داخل گرم‌کن الکتریکی دمیده می‌شود و بعد از گرم شدن توسط المنت‌های برقی در داخل محفظه گرم‌کن، وارد محفظه دو پلنوم بالایی و زیرین شده و از طریق نازلها به طور مستقیم از بالا و زیر به سطح محصول که بر روی صفحه مشبک قرار می‌گیرد برخورد می‌کند.

نحوه تنظیم سرعت هوا: در این آزمایش سرعت هوای خارج شده از نازل‌ها بوسیله اینورتر کنترل و تنظیم شد. اینورتر مورد استفاده بوسیله تغییر فرکانس، سرعت موتور side channel را تغییر داده و به این ترتیب سرعت هوای خروجی از نازل‌ها تغییر کرد. ابتدا آزمایش‌هایی در دمای محیط برای به دست آوردن رابطه بین فرکانس اینورتر و سرعت هوای خروجی از نازل‌ها انجام شد. در این تحقیق برای کنترل دقیق دمای هوای گرم از یک کنترل کننده PID و نیز برای تنظیم سرعت برخورد هوا با سطح محصول از یک اینورتر استفاده گردید.

نحوه تغییر نسبت فاصله نازل تا سطح محصول به قطر نازل H/D: برای این منظور از مکانیزم تغییر فاصله سطح حامل نازل‌ها که بر روی چهار عدد پیچ متری نصب گردیده است همانند شکل ۲ استفاده شد.

با هدف بررسی تاثیر پارامترهای خشک کردن جت برخوردی بر سینتیک خشک شدن موسیر سه پارامتر دما، سرعت هوا و نسبت فاصله نازل تا سطح محصول به قطر

اندازه‌گیری رطوبت محصولات بر مبنای تر و خشک است. رطوبت بر مبنای تر عبارت است از نسبت وزن آب درون ماده به وزن ماده تر و رطوبت بر مبنای خشک عبارت است از نسبت وزن آب درون ماده به وزن ماده خشک.

طریقه کاهش رطوبت مواد در طی خشک شدن به این شکل است که هرگاه جسمی با رطوبت بالا که روی سطح آن آب آزاد وجود دارد با استفاده از هوایی با رطوبت ثابت (شرایط سایکرومتریک) خشک گردد، در ابتدای عملیات خشک شدن جرم رطوبتی که از جسم خارج گردد در فاصله‌های زمانی یکسان تغییر نمی‌کند. اما بعد از گذشت این مرحله ابتدایی، جرم رطوبتی که از جسم خارج می‌شود در فاصله‌های زمانی یکسان به طور یکنواختی کاهش می‌یابد. اگر عملیات خشک کردن جسم ادامه پیدا کند، مقدار رطوبت خارج شده از جسم به سمت صفر می‌رود. در این حالت گفته می‌شود رطوبت جسم به حالت تعادل رسیده است. مرحله اول خشک شدن را مرحله خشک کردن با نرخ ثابت و مرحله دوم را مرحله خشک کردن با نرخ نزولی می‌گویند.

اندازه‌گیری آب‌گیری مجدد: جذب مجدد آب توسط نمونه‌های خشک شده در بشر ۴۰۰ میلی لیتری حاوی ۲۰۰ میلی لیتر آب مقطر انجام شد. آزمایشات در دمای ۹۰ درجه سلسیوس انجام شد. نمونه‌ها بعد از ۲۰ دقیقه از آب خارج و بعد از خشک کردن سطح آنها با دستمال کاغذی، با استفاده از یک ترازوی ۰/۰۱ گرم توزین گردید. در نهایت درصد آبگیری با استفاده از رابطه ۳ محاسبه گردید:

$$(3) \quad \text{ن بعد از فرایند آبگیری مجدد} = \frac{\text{وزن برگه‌های خشک}}{\text{آبگیری درصد}}$$

اندازه‌گیری تغییرات رنگ نمونه‌ها در هنگام خشک شدن: برای بررسی تغییرات رنگ برگه‌های موسیر در هنگام فرایند خشک شدن، قبل از شروع خشک شدن و بعد از خشک شدن، از نمونه‌ها در اتاقک مخصوص عکس برداری مجهز به تنظیم نور، تصویر گرفته شد. با استفاده از نرم‌افزار Design Expert پارامترهای a^* ، b^* و L^* اندازه‌گیری شد. پارامتر L^* معرف روشنایی (۰ تا ۱۰۰)، پارامتر a^* (سبز تا قرمز) و پارامتر b^* (آبی تا زرد) دو مولفه رنگی هستند که محدوده آنها ۱۲۰- تا ۱۲۰+ می‌باشد. در این آزمایشات تغییر هر یک از این شاخص‌ها یعنی ΔL^* ، Δa^* و Δb^* به عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته شد. برای مقدار ΔL^* قدر مطلق تغییرات آن در نظر گرفته شد.

دقیقه توزین شد. قبل از قراردادن نمونه‌ها از آن تصویر گرفته شد. در شکل ۳ این مراحل نشان داده شده است.



شکل ۳. مراحل برش، آماده سازی و خشک کردن نمونه‌ها

اندازه‌گیری رطوبت اولیه: برای انجام این آزمایش مطابق استاندارد ASAE S358.2 سه نمونه به وزن‌های حداقل ۲۵ گرم از نمونه مرطوب موسیر تازه برداشت شده را وزن کرده و به منظور افزایش دقت آزمایش در سه پلیت جداگانه به مدت ۲۴ ساعت درون اون تحت دمای ۷۵ درجه سانتیگراد قرار داده شد تا خشک شود. پس از سپری شدن این زمان نمونه خشک شده را مجدداً وزن کرده و رطوبت اولیه هرکدام از نمونه‌ها با رابطه ۱ محاسبه گردید. اندازه‌گیری رطوبت اولیه در سه تکرار به منظور افزایش دقت انجام و میانگین آنها به عنوان رطوبت اولیه لحاظ گردید (Akpınar & Toraman, 2013).

$$(1) \quad M_0 = \frac{W_w - W_d}{W_d}$$

M_0 : رطوبت اولیه

W_w : وزن نمونه

W_d : وزن نمونه خشک شده

سینتیک خشک شدن: برای مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک شدن برگه‌های نازک موسیر از نسبت رطوبت در طول خشک شدن نمونه‌ها استفاده شد. نسبت رطوبت تعیین کننده فرایند خشک کردن است که با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت توده در لحظه، در طول زمان خشک شدن با رابطه ۲ محاسبه می‌گردد:

$$(2) \quad MR = \frac{M_d - M_e}{M_0 - M_e}$$

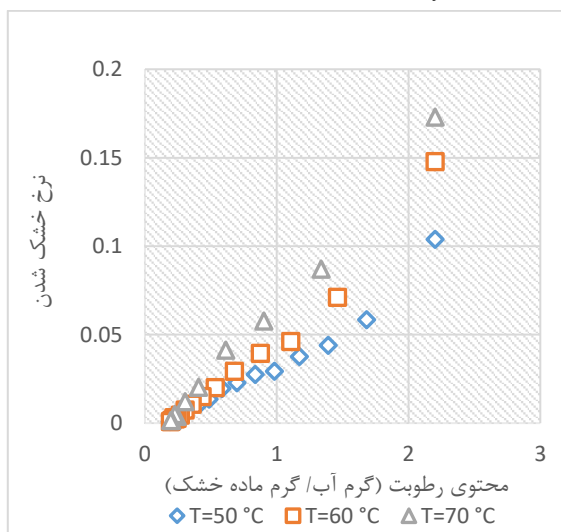
MR : نسبت رطوبت

M_d : رطوبت توده در لحظه

M_e : رطوبت تعادلی

M_0 : رطوبت اولیه

رطوبت آن کاهش می‌یابد. کاهش تخلخل نمونه‌ها ناشی از انقباض نمونه‌ها با پیشرفت خشک شدن و افزایش مقاومت در برابر حرکت آب باعث کاهش نرخ خشک شدن می‌گردد (Doymaz, 2018).



شکل ۴. تاثیر دمای هوا بر نرخ خشک شدن برگه‌های موسیر در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه و نسبت H/D=5

تاثیر سرعت هوا بر نسبت رطوبت و نرخ خشک شدن؛ شکل ۵ تاثیر سرعت هوای خروجی نازل بر نسبت رطوبت برگه موسیر را نشان می‌دهد. همانطور که از روی شکل پیداست افزایش سرعت هوای خروجی از نازل منجر به کاهش مدت زمان خشک شدن نمونه‌ها شد. بطوری‌که در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک شدن نمونه‌ها با سرعت‌های هوای ۷، ۱۰ و ۱۳ متر بر ثانیه به ترتیب ۸۰، ۷۰ و ۹۰ دقیقه به طول انجامید. می‌توان با افزایش سرعت هوای خروجی زمان خشک شدن را به طور قابل توجهی کاهش داد که با یافته‌های (Wang et al., 2015) مطابقت دارد.

تاثیر نسبت H/D بر نسبت رطوبت و نرخ خشک شدن
همان گونه که در شکل ۶ شکل نشان داده شده است، مدت زمان خشک شدن در H/D=۴ برابر با ۷۵ دقیقه، در H/D=۵ برابر با ۸۰ دقیقه و در H/D=۶ برابر ۹۰ دقیقه بود. بطور کلی می‌توان گفت که تغییرات نسبت H/D در مقایسه با تغییرات دما و سرعت هوا در محدوده مطالعه بر روی زمان خشک شدن تاثیر کمتری داشته است. برگه‌های موسیر در H/D=۴ در کمترین زمان خشک شده‌اند این نتیجه نشان می‌دهد که در این حالت حرارت و جرم بیشتری منتقل شده است که این نتیجه با نتیجه تحقیق (Chakroun 1998 et al.,) مطابقت دارد که ایشان نیز بیشترین انتقال حرارت

$$\Delta L^* = |\Delta L^*_2 - \Delta L^*_1| \quad (۴)$$

$$\Delta a^* = \Delta a^*_2 - \Delta a^*_1 \quad (۵)$$

$$\Delta b^* = \Delta b^*_2 - \Delta b^*_1 \quad (۶)$$

برای تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش از نرم‌افزارهای Design Expert version 8, Excel 2013, ImageJ 2015 استفاده گردید.

نتایج و بحث

نتایج آزمایشات خشک کردن برگه‌های موسیر: رطوبت اولیه موسیر پس از خشک شدن در آون ۶۸.۷۶٪ بدست آمد. برگه‌های موسیر تحت دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس، سرعت هوای ۷، ۱۰ و ۱۳ متر بر ثانیه و نسبت H/D ۴، ۵ و ۶ تا رسیدن به ۰/۱۵ بر مبنای خشک، خشک شدند.

تاثیر دمای هوا بر نسبت رطوبت و نرخ خشک شدن

با افزایش دمای هوای خارج شده از نازل‌ها، زمان خشک شدن کاهش یافت. مدت زمان خشک شدن در دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس به ترتیب برابر با ۹۵، ۸۰ و ۵۰ دقیقه بود. بنابراین افزایش دمای هوا توانسته است زمان خشک شدن موسیر را به طور قابل توجهی کاهش دهد. این نتیجه با نتایج حاصله از برخی تحقیقات مشابهت دارد (Xiao et al., 2010a و Rad et al., 2021). دلیل این امر را می‌توان ناشی از افزایش گرادیان درجه حرارت بین هوای داغ و سطح محصول در اثر افزایش دمای هوا دانست که در نتیجه انتقال حرارت و سرعت خشک شدن افزایش می‌یابد. در دماهای بالاتر به علت تفاوت دمای بین سطح نمونه و هوا، ویژگی‌های سطح نمونه با هوا زودتر متعادل می‌شود. افزایش دما به دلیل بالا رفتن ظرفیت هوا برای جذب رطوبت و نیز افزایش انرژی برای گرفتن رطوبت از محصول، عامل تبادل سریع رطوبت و کاهش مدت زمان خشک شدن در تیمارهای آزمایش است (Dikbasan, 2007).

نرخ خشک شدن مطابق رابطه ۶ محاسبه شد و در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نرخ خشک شدن برای برخی از شرایط آزمایش ترسیم گردید. از شکل‌ها می‌توان دریافت که تاثیر دما بر نرخ خشک شدن برگه‌های موسیر بیشتر از سرعت هوا و نسبت H/D می‌باشد که با یافته‌های تحقیقات پیشین مطابقت دارد (Xiao et al., 2010a). همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود نرخ خشک شدن در حالت اولیه مخصوص ماکزیمم است و به تدریج با کاهش محتوی

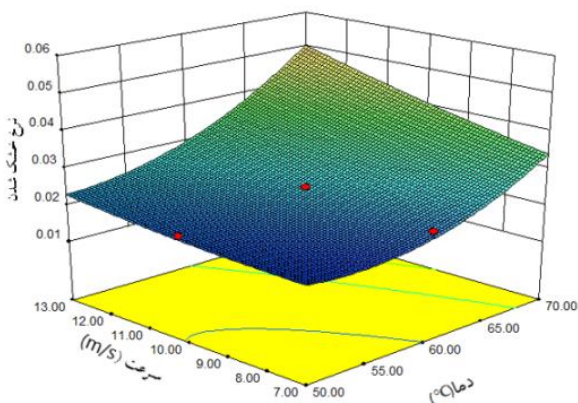
تاثیر پارامترهای دمای هوا، سرعت هوا و نسبت H/D بر نرخ خشک شدن

با استفاده از جدول تجزیه واریانس، معنی‌دار بودن اثرات خطی، درجه دوم و متقابل ضرایب مدل رگرسیون بر نرخ خشک شدن نمونه‌ها بررسی گردید. نتایج حاکی از آن بود که در اثرات خطی، تمام پارامترها تاثیرگذار بوده‌اند و در میان اثرات متقابل فقط پارامترهای دما و سرعت معنی‌دار بوده و اثر متقابل سایر پارامترها معنی‌دار نبود. در بین اثرات درجه دوم نیز تنها اثر دما معنی‌دار می‌باشد.

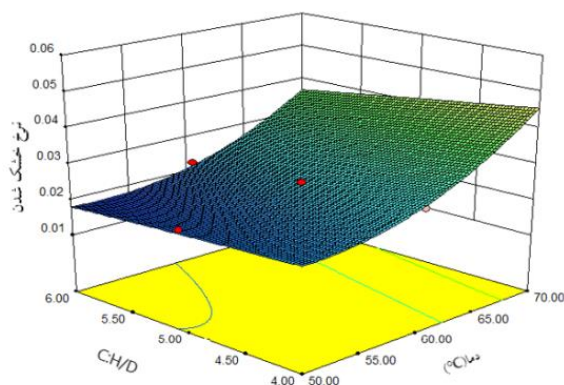
ارتباط بین نرخ خشک شدن و متغیرهای دما، سرعت هوا و H/D با استفاده از رابطه نمایی ۷ بر حسب مقادیر تعیین شده متغیرها بیان شد:

$$\begin{aligned} \text{Drying rate} = & 0.025 + 0.0011 \times A + 5.13E - 003 \times B - 3.09E - 003 \times C + 3.05E - 003 \times \\ & AB - 1.325E - 003 \times AC - 8.75E - 004 \times \\ & BC + 6.054E - 003 \times A^2 + 9.035E - 004 \times \\ & B^2 - 9.648E - 005 \times C^2 \quad (V) \end{aligned}$$

در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نمودار سه بعدی تاثیر متقابل پارامترهای موثر بر نرخ خشک شدن نشان داده شده است.

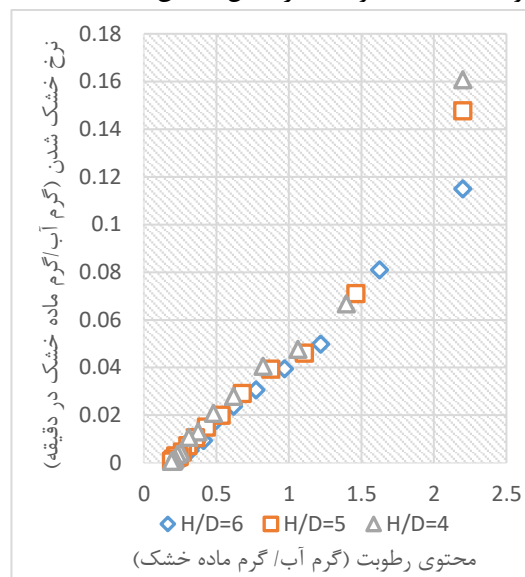


شکل ۷. اثر متقابل دمای و سرعت هوا بر نرخ خشک شدن بر گره‌های موسیر



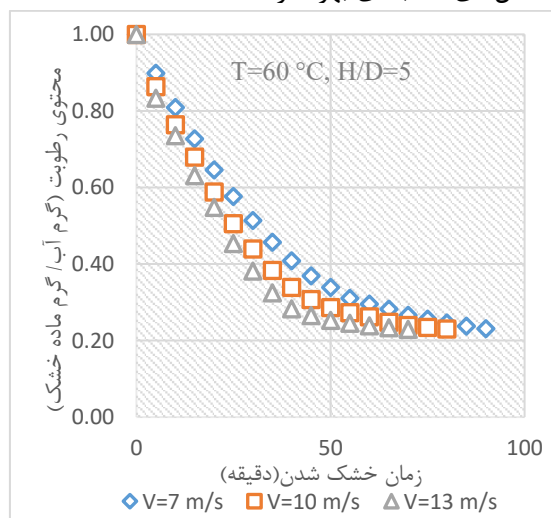
شکل ۸. اثر متقابل دمای هوا و H/D بر نرخ خشک شدن بر گره‌های موسیر

را در $H/D=4$ بدست آورده‌اند. بیشترین نرخ خشک شدن مربوط به $H/D=4$ بود که در شکل ۶ نشان داده شده است.

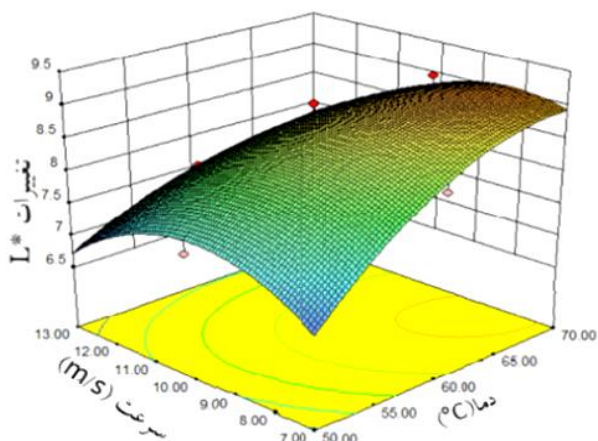


شکل ۵. تاثیر سرعت هوای خروجی نازل بر نسبت رطوبت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و نسبت $H/D=5$

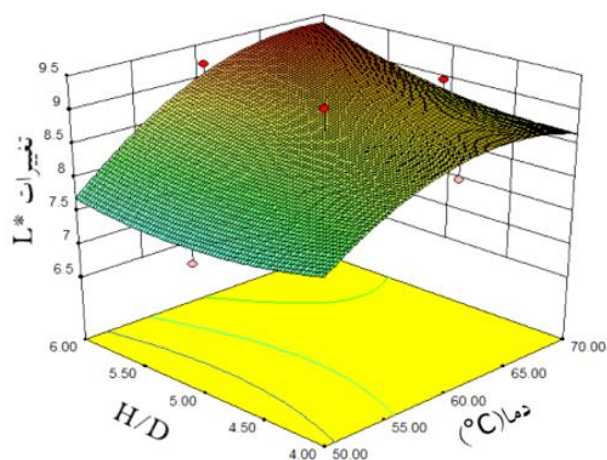
نتایج تحلیل آزمایشات خشک شدن برگه موسیر با روش سطح پاسخ: برای بررسی پارامترهای آزمایش شامل دمای هوا، سرعت هوای خروجی از نازل‌ها و نسبت فاصله نازل تا سطح محصول به قطر نازل بر متغیرهای پاسخ، آزمایشات به روش سطح پاسخ با به کارگیری طرح مرکب مرکزی در حالت مرکز وجهی انجام شد. برای بررسی ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته و همچنین اثرات متقابل پارامترهای دما، سرعت و نسبت H/D بر متغیرهای پاسخ، از شکل‌های سه بعدی بهره گرفته شد.



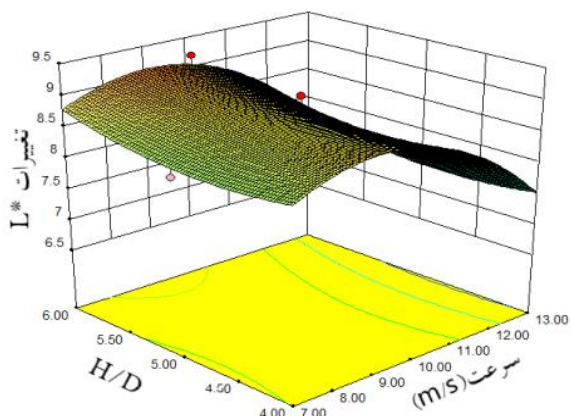
شکل ۶. تاثیر نسبت H/D بر نرخ خشک شدن برگه‌های موسیر در دمای ۶۰ درجه و سرعت ۱۰ متر بر ثانیه



شکل ۱۰. اثر متقابل دما و سرعت هوا بر تغییرات L^* در هنگام خشک شدن برگه‌های موسیر

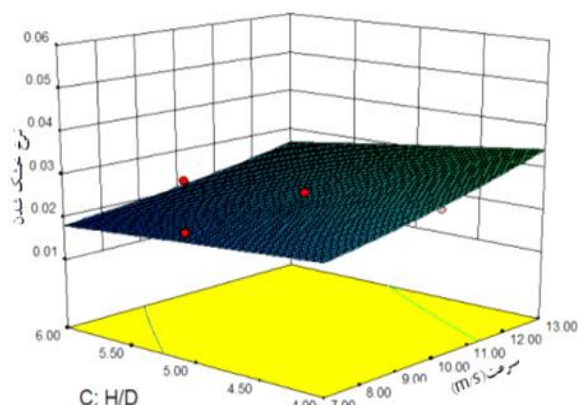


شکل ۱۱. اثر متقابل دما و H/D بر تغییرات L^* در هنگام خشک شدن برگه‌های موسیر



شکل ۱۲. اثر متقابل سرعت هوا و H/D بر تغییرات L^* در هنگام خشک شدن برگه‌های موسیر

بررسی تاثیر پارامترهای دمای هوا، سرعت هوا و نسبت H/D بر شاخص (a^*): از بررسی داده‌های جدول تجزیه واریانس مشخص شد که در میان اثرات خطی، فقط



شکل ۹. اثر متقابل سرعت هوا و H/D بر نرخ خشک شدن برگه‌های موسیر

تاثیر پارامترهای دمای هوا، سرعت هوا و نسبت H/D بر تغییرات شاخص‌های تغییر رنگ برگه خشک شده موسیر با روش سطح پاسخ: برای بررسی اثر پارامترهای آزمایش بر روی تغییرات رنگ برگه موسیر، تغییرات مقدار a^* ، b^* در حین خشک شدن اندازه‌گیری شد. آزمایشات به روش سطح پاسخ مطابق طرح مرکب مرکزی در حالت مرکز وجهی انجام شد. با استفاده از جدول تجزیه واریانس، معنی‌دار بودن اثرات خطی و متقابل ضرایب مدل رگرسیون بر تغییرات رنگ برگه موسیر خشک شده بررسی گردید. شاخص روشنایی (L^*): داده‌ها نشانگر آن بود که در میان اثرات خطی، دما و سرعت هوا در سطح یک درصد معنی‌دار می‌باشد. مقادیر در جدول ۱ ارائه شده است.

تمامی مقادیر ΔL^* در اصل منفی بوده اما در در عمل $|\Delta L^*|$ توسط نرم افزار در نظر گرفته شده است در میان اثرات متقابل، اثر دمای هوا و سرعت هوا در سطح احتمال ۱ درصد و همچنین اثر دمای هوا و نسبت H/D در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بودند. از میان اثرات درجه دوم نیز اثر پارامترهای دما و سرعت هوا در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود.

ارتباط بین نرخ تغییرات L^* و متغیرهای دما، سرعت هوا و H/D با استفاده از رابطه نمایی ۸ بر حسب مقادیر تعیین شده واقعی متغیرها بیان شده است:

$$\Delta L^* = 8.71 + 0.61 \times A - 0.50 \times B + 0.13 \times C - 0.39 \times A \times B + 0.23 \times A \times C - 7.500 \times 10^{-3} \times B \times C - 0.51 \times A^2 - 0.77 \times B^2 + 0.21 \times C^2 \quad (8)$$

در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نمودار سه بعدی تاثیر متقابل پارامترهای آزمایش بر تغییرات این شاخص نشان داده شده است.

متغیرهای دما، سرعت هوا و H/D با استفاده از رابطه‌ی نمایی ۹ بر حسب مقادیر کد شده واقعی متغیرها بیان شده است.

$$\Delta a^* = -0.83 + 0.33 \times A - 0.24 \times B - 0.11 \times C + 0.016 \times A \times B + 0.070 \times A \times C - 0.39 \times B \times C + 1.24 \times A^2 - 0.11 \times B^2 + 0.42 \times C^2 \quad (9)$$

دمای هوا در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد. داده‌ها در جدول ۲ آورده شده است. در میان اثرات متقابل، اثر سرعت هوا و H/D در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بوده و در میان اثرات درجه دوم نیز اثر دمای هوا با احتمال ۱ درصد معنی‌دار است. ارتباط بین نرخ تغییرات a^* و

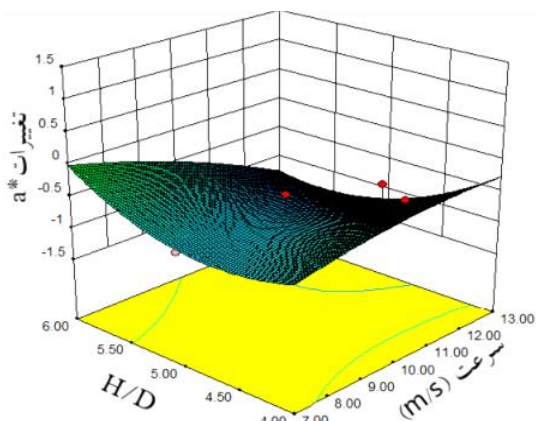
جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس داده‌های مدل تغییرات L^*

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	عدد F	عدد P
مدل	۱۲/۱۴	۹	۱/۳۵	۲۹/۵۵	<۰/۰۰۰۱
دمای هوا (A)	۳/۷۰	۱	۳/۷۰	۸۱/۰۲	<۰/۰۰۰۱
سرعت هوا (B)	۲/۴۶	۱	۲/۴۶	۵۳/۹۲	۰/۰۰۰۲
H/D (C)	۰/۱۷	۱	۰/۱۷	۳/۶۵	۰/۰۹۷۸
AB	۱/۲۳	۱	۱/۲۳	۲۷/۰۱	۰/۰۰۱۳
AC	۰/۴۱	۱	۰/۴۱	۸/۸۸	۰/۰۲۰۵
A2	۰/۶۹	۱	۰/۶۹	۱۵/۰۶	۰/۰۰۶۰
B2	۱/۵۷	۱	۱/۵۷	۳۴/۵۰	۰/۰۰۰۶
C2	۰/۱۲	۱	۰/۱۲	۲/۵۵	۰/۱۵۴۱
باقیمانده	۰/۳۲	۷	۰/۴۹		
کل	۱۲/۴۵	۱۶			

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس داده‌های مدل تغییرات a^*

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	عدد F	عدد P
مدل	۱۱/۵۵	۹	۱/۲۸	۱۰/۹۳	۰/۰۰۲۳
دمای هوا (A)	۱/۱۱	۱	۱/۱۱	۹/۴۶	۰/۰۱۷۹
سرعت هوا (B)	۰/۵۶	۱	۰/۵۶	۴/۸۰	۰/۰۶۴۶
H/D (C)	۰/۱۲	۱	۰/۱۲	۱/۰۱	۰/۳۴۸۰
AB	۲/۱۰۳	۱	۱/۹۳	۰/۰۱۸	۰/۸۹۷۳
AC	۰/۰۳۹	۱	۰/۰۳۹	۰/۳۳	۰/۵۸۲۲
BC	۱/۲۳	۱	۱/۲۳	۱۰/۵۱	۰/۰۱۴۲
A2	۴/۰۹	۱	۴/۰۹	۳۴/۸۳	۰/۰۰۰۶
B2	۰/۰۳۴	۱	۰/۰۳۴	۰/۲۹	۰/۶۰۷۰
C2	۰/۴۸	۱	۰/۴۸	۴/۰۶	۰/۰۸۳۹
باقیمانده	۰/۸۲	۷	۰/۱۲		
کل	۱۲/۳۷	۱۶			

$$\Delta b^* = 6.59 + 0.49 \times A - 0.39 \times B + 0.059 \times C - 0.25 \times A \times B + 0.24 \times A \times C + 0.087 \times B \times C - 0.2 \times A^2 - 0.39 \times B^2 + 0.026 \times C^2 \quad (10)$$



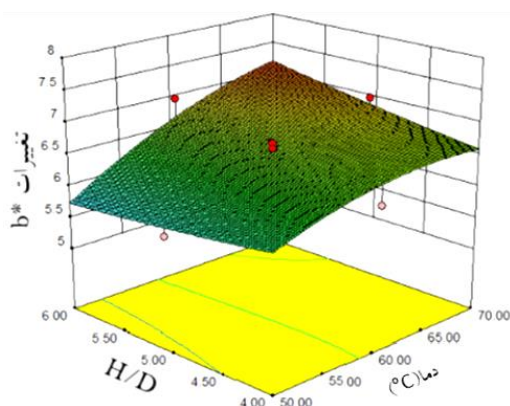
شکل ۱۵. اثر متقابل سرعت هوا و H/D بر تغییرات Δb^* در

هنگام خشک شدن برگ‌های موسیر

در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ نمودار سه بعدی تاثیر متقابل پارامترهای آزمایش بر تغییرات شاخص b^* ترسیم گردیده است.

بهینه‌سازی

یکی از اهداف به کارگیری روش سطح پاسخ بدست آوردن شرایط بهینه برای فرآورده‌ها می‌باشد. در مرحله بهینه‌سازی برای هر یک از متغیرهای پاسخ هدفی تعیین گردیده که حالت بهینه متغیرهای مستقل بر اساس این اهداف مشخص می‌شود (Zhang et al., 2018).

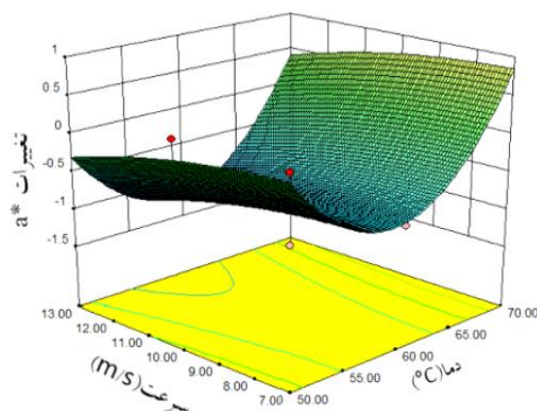


شکل ۱۶. اثر متقابل دمای هوا و H/D بر تغییرات Δb^* در هنگام

خشک شدن برگ‌های موسیر

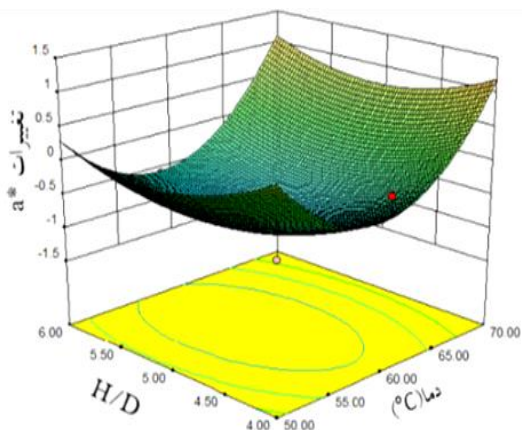
در فرآورده‌های خشک کردن محصولات کشاورزی به منظور دستیابی به بازدهی اقتصادی، نرخ خشک شدن بالا مورد نظر می‌باشد. همچنین از نظر کیفیت محصول نهایی و بازپسندی آن، نمونه محصول خشک شده باید دارای نسبت آگیری مجدد بالا و کمترین تغییرات رنگ کلی باشد. بنابراین اهداف بهینه‌سازی شامل حداکثر بودن نرخ

در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ نمودار سه بعدی تاثیر متقابل پارامترهای آزمایش بر تغییرات این شاخص نشان داده شده است.



شکل ۱۳. اثر متقابل دما و سرعت هوا بر تغییرات Δa^* در هنگام

خشک شدن برگ‌های موسیر



شکل ۱۴. اثر متقابل سرعت هوا و H/D بر تغییرات Δa^* در

هنگام خشک شدن برگ‌های موسیر

بررسی تاثیر پارامترهای دمای هوا، سرعت هوا و نسبت H/D بر شاخص روشنایی (b^*) برگه موسیر با روش سطح پاسخ: با بررسی جدول واریانس مشخص شد اثرات خطی هر سه پارامتر دما و سرعت هوا و H/D بر تغییرات b^* در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. مقادیر در جدول ۳ آورده شده است.

در بررسی اثرات متقابل هم اثر دما و سرعت هوا همچنین اثر سرعت هوا و H/D در سطح ۵ درصد معنی‌دار بوده است. همچنین از میان اثرات درجه دوم هم اثر سرعت با سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار می‌باشد. ارتباط بین نرخ تغییرات b^* و متغیرهای دما، سرعت هوا و H/D با استفاده از رابطه نمایی ۱۰ بر حسب مقادیر کد شده واقعی متغیرها بیان شده است:

خشک‌شدن و نسبت آبگیری مجدد و حداقل بودن تغییرات رنگ نمونه‌ها می باشد. بر طبق نتایج تحلیل نرم‌افزار Design Expert نسخه ۸ مقدار بهینه متغیرهای دما، سرعت و H/D به ترتیب برابر با ۶۹ درجه سلسیوس، ۱۰/۴ متر بر ثانیه و ۵/۱ به دست آمد و مقدار متغیرهای پاسخ

شامل نرخ خشک شدن، نسبت آبگیری مجدد، ΔL^* (تغییرات روشنایی)، Δa^* (تغییرات سبز تا قرمز) و b^* (تغییرات آبی تا زرد) به ترتیب برابر با (۰/۰۴۷)، (۲/۶۳)، (۷/۳۱)، (۰/۱۲۵) و (۵/۹۳) با شاخص رضایت‌مندی ۰/۶۲ می‌باشد.

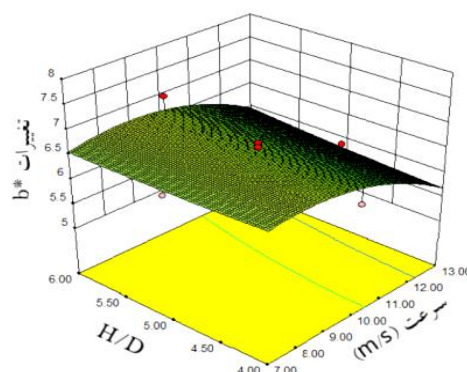
جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس داده‌های مدل تغییرات b^*

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	عدد F	عدد P
مدل	۶/۰۱	۹	۰/۶۷	۱۴/۹۶	۰/۰۰۰۹
دمای هوا (A)	۲/۴۰	۱	۲/۴۰	۵۳/۸۲	۰/۰۰۰۲
سرعت هوا (B)	۱/۴۹	۱	۱/۴۹	۳۳/۴۰	۰/۰۰۰۷
H/D (C)	۰/۳۵	۱	۰/۳۵	۰/۷۸	۰/۴۰۶۴
AB	۰/۵۰	۱	۰/۵۰	۱۱/۲۱	۰/۰۱۲۳
AC	۰/۴۷	۱	۰/۴۷	۱۰/۵۴	۰/۰۱۴۱
BC	۰/۰۶۱	۱	۰/۰۶۱	۱/۳۷	۰/۲۷۹۷
A2	۰/۱۱	۱	۰/۱۱	۲/۳۷	۰/۱۶۷۷
B2	۰/۴۰	۱	۰/۴۰	۹/۰۷	۰/۰۱۹۶
C2	۱/۸۶	۱	۱/۸۶	۰/۰۴۲	۰/۸۴۳۷
باقیمانده	۰/۳۱	۷	۰/۰۴۵		
کل	۶/۳۲	۱۶			

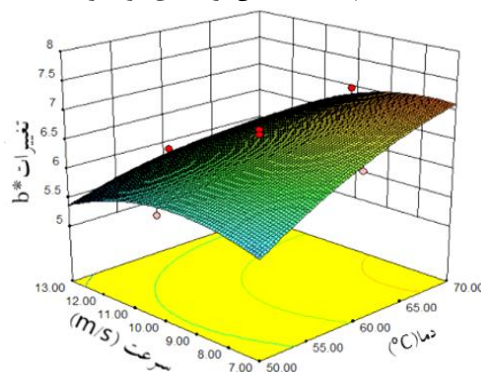
بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق آزمایش‌های خشک کردن برگه‌های موسیر در خشک‌کن جت برخوردی به منظور بررسی تاثیر پارامترهای دما و سرعت هوا و نسبت فاصله نازل تا سطح محصول به قطر نازل H/D بر روی سینتیک خشک شدن محصول و نیز تغییر رنگ آن انجام گردید. نتایج حاصل نشان داد که پارامترهای دمای هوا و سرعت هوا بیشترین تاثیر را عملکرد سیستم داشتند به گونه‌ای که با افزایش هر کدام از آنها نرخ تبخیر آب تکه‌های موسیر افزایش پیدا می‌کرد. نتایج حاصله با یافته‌های محققانی چون (Huang et al., 2017)، (Sasongko et al., 2020)، (Ju et al., 2020)، (Jin et al., 2024) و (Xiao et al., 2014) در تطبیق کامل است. ارتباط مستقیم میان افزایش دما و افزایش نرخ تبخیر بدیهی به نظر می‌رسد چراکه با افزایش دمای سیال عبوری گرادیان دمای میان محصول و هوا افزایش یافته و فرار مولکول‌های آب از سطح آن راحت‌تر اتفاق می‌افتد و البته هوای گرم‌تر ظرفیت پذیرش مقدار بیشتری از رطوبت را دارا است.

در مورد تاثیر سرعت سیال بر نرخ تبخیر، می‌توان موضوع را از دوجنبه مورد بررسی قرار داد. ابتدا نرخ



شکل ۱۷. اثر متقابل سرعت هوا و H/D بر تغییرات b^* در هنگام خشک شدن برگه‌های موسیر



شکل ۱۸. اثر متقابل دمای هوا و سرعت هوا بر تغییرات b^* در هنگام خشک شدن برگه‌های موسیر

در حالت کلی می‌توان گفت در خشک کردن برگه‌های موسیر در خشک‌کن جت برخوردی از میان فاکتورهای موثر بر خشک شدن، دمای هوای عبوری و سرعت سیال هوا از تاثیرگذاری بیشتری برخوردارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

اسماعیل صیدی: ۳۴٪

آیدین سلیمی اصل: ۳۳٪

محمد هادی محمدی: ۳۳٪

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها است.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

حمایت مالی

نویسنده(ها) هیچ حمایت مالی خاصی برای انجام این پژوهش دریافت نکرده‌اند.

منابع

- Abbasi, H., Layeghinia, N., Bibak, F., Karimi, S. (2020) Investigation of mass transfer and drying kinetics of shallot by Combined microwave-hot air drying of peeled longan. *Journal of Food Engineering*, 81(2), 459-468. DOI: [10.29252/fsct.18.01.10](https://doi.org/10.29252/fsct.18.01.10)
- Akpinar, E. K., & Toraman, S. (2013). Estimation of the moisture diffusivity and activation energy in thin layer drying of ginger slices. *International Journal of Nutrition and Food Engineering*, 7(6), 415-418. DOI: [10.5281/zenodo.1075372](https://doi.org/10.5281/zenodo.1075372)
- ASAE Standards. (2003). *Moisture Measurement – Forages*. ASAE, S358.2.
- Cárcel, J. A., Benedito, J., Rosselló, C., & Mulet, A. (2007). Influence of ultrasound intensity on mass transfer in apple immersed in a sucrose solution. *Journal of food engineering*, 78(2), 472-479. DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2005.10.018](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.018)
- Chakroun, W. M., Abdel-Rahman, A. A., & Al-Fahed, S. F. (1998). Heat transfer augmentation

جایگزینی سیال هوا است به گونه‌ای که در سرعت‌های پایین، هوای مجاور تکه‌های موسیر که قسمتی از رطوبت آن را در خود ذخیره کرده است با افزایش رطوبت نسبی مواجه می‌شود لذا گرادیان رطوبت میان آن و تکه‌های محصول کاهش یافته و نرخ تبخیر آب از سطح محصول کاهش می‌یابد، اما با افزایش سرعت سیال هوای مجاور تکه‌های محصول با سرعت بیشتری جابه‌جا شده و با هوای خشک‌تر جایگزین می‌گردد که موجب افزایش نرخ تبخیر خواهد شد. نکته دیگر را در خواص ترمودینامیکی سیال هوا می‌توان جستجو کرد به گونه‌ای که با افزایش سرعت آن (به مانند هر گاز دیگر) افت فشار درون سیال افزایش پیدا می‌کند، انبساط نسبی گاز و افزایش فضای بین مولکولی مترتب بر این امر جاگیری مولکول‌های بخار آب در درون سیال را تسهیل کرده و از این طریق موجب افزایش نرخ تبخیر می‌شود.

همچنین نتایج حاصله نشان داد که، نسبت فاصله نازل تا سطح محصول به قطر نازل H/D (در محدوده مطالعه شده) کمترین تاثیر را بر مدت زمان خشک شدن داشتند. این نتایج با یافته‌های (Rad et al., 2021) و (Abbasi et al., 2020) در تضاد است. زیرا آنها عامل بالا را از فاکتورهای موثر بر نرخ تبخیر گزارش کرده‌اند. دلیل این امر می‌تواند انتخاب غیر صحیح قطر نازل‌ها و یا فواصل میان آنها و سینی‌های محصول باشد. به نظر می‌رسد اندازه‌های مورد استفاده در این پژوهش تفاوت معناداری با یکدیگر نداشته‌اند. و چنانچه آزمایشات با نسبت H/D های بالاتر از ۱۰ و یا کمتر از ۳ تکرار شوند احتمال معنادار بودن این فاکتور افزایش می‌یابد.

همچنین یافته‌ها نشان داد که تاثیر دمای هوا بر نرخ خشک شدن برگه‌های موسیر بیشتر از سرعت هوا بود. که با نتایج گزارش شده توسط (Sarkar et al., 2004)، (Zheng et al., 2014) و (Karimi et al., 2021) تطبیق دارد.

اثر دما و سرعت هوا بر شاخص‌های ΔL^* و Δb^* تغییر رنگ در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود ولی H/D اثر معنی‌داری بر این شاخص‌ها نداشت. همچنین تنها اثر دما بر شاخص Δa^* در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود و اثر پارامترهای دیگر بر این شاخص معنی‌دار نبود. این نتایج با گزارشات محققین پیشین همخوانی داشت (Sasongko et al., 2020)، (Ju et al., 2020).

- Ahmadabadi, H. (2020). Biochemical and Histological Evidence on the Protective Effects of *Allium hirtifolium* Boiss (Persian Shallot) as an Herbal Supplement in Cadmium Induced epatotoxicity. *Evidence Based Complementary and Alternative Medicine*, (1), 74-85. DOI: [10.1155/2020/7457504](https://doi.org/10.1155/2020/7457504)
- Poorgharib, M., Mehrjerdi, M. Z., & Arabhosseini, A. (2023). Effect of different drying methods on antioxidant and phytochemical yield of *Allium hirtifolium* Boiss. 27-44. IOP Conference Series Earth and Environmental Science. DOI: [10.1088/1755-1315/1413/1/012081](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1413/1/012081)
- Rad, M., Goli, H., & Mirahmadi, F. (2021). Effects of Air Impingement Jet Drying on Drying Kinetics and Some Quality Attributes of Strawberry Slices. *Journal of Agricultural Machinery*, 11(2), 409-422. DOI: [10.22067/jam.v11i2.83943](https://doi.org/10.22067/jam.v11i2.83943)
- Sagar, V. R., & Suresh Kumar, P. (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of food science and technology*, 47, 15-26. DOI: [10.1007/s13197-010-0010-8](https://doi.org/10.1007/s13197-010-0010-8)
- Sarkar, A., Nitin, N., Karwe, M. V., & Singh, R. P. (2004). Fluid flow and heat transfer in air jet impingement in food processing. *Journal of food science*, 69(4), 113-122. DOI: [10.1111/j.1365-2621.2004.tb06315](https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb06315)
- Sasongko, S. B., Hadiyanto, H., Djaeni, M., Perdanianti, A. M., & Utari, F. D. (2020). Effects of drying temperature and relative humidity on the quality of dried onion slice. *Heliyon*, 6(7). DOI: [10.1016/j.heliyon.2020.e04338](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04338)
- Wae-hayee, M., Tekasakul, P., & Nuntadusit, C. (2013). Influence of nozzle arrangement on flow and heat transfer characteristics of arrays of circular impinging jets. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 35(2).
- Wang, D., Dai, J. W., Ju, H. Y., Xie, L., Xiao, H. W., Liu, Y. H., & Gao, Z. J. (2015). Drying kinetics of American ginseng slices in thin-layer air impingement dryer. *International Journal of Food Engineering*, 11(5), 701-711. DOI: [10.1515/ijfe-2015-0002](https://doi.org/10.1515/ijfe-2015-0002)
- Xiao, H. W., GAO, Z. J., Lin, H. A. I., & YANG, W. X. (2010) a. Air impingement drying characteristics and quality of carrot cubes. *Journal of Food Process Engineering*, 33(5), 899-918. DOI: [10.1111/j.1745-4530.2008.00314.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00314.x)
- Xiao, H. W., Law, C. L., Sun, D. W., & Gao, Z. J. (2014). Color change kinetics of American ginseng (*Panax quinquefolium*) slices during air impingement drying. *Drying Technology*, 32(4), 418-427. DOI: [10.1080/07373937.2013.834928](https://doi.org/10.1080/07373937.2013.834928)
- Xiao, H. W., Pang, C. L., Wang, L. H., Bai, J. W., Yang, W. X., & Gao, Z. J. (2010)b. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer. *Biosystems* for air jet impinged on a rough surface. *Applied thermal engineering*, 18(12), 1225-1241. DOI: [10.1016/S13594311\(97\)00100-2](https://doi.org/10.1016/S13594311(97)00100-2)
- Dikbasan, T. (2007). Determination of effective parameters for drying of apples (Master's thesis, *Izmir Institute of Technology* (Turkey)).
- Doymaz, İ. (2018). Effect of pre-treatment and air temperature on drying kinetics and quality of Jerusalem artichoke. *Scientific Study & Research. Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, 19(4), 395.
- Farzad, M., El Ferouali, H., Kahraman, O., & Yagoobi, J. (2022). Enhancement of heat transfer and product quality using jet reattachment nozzles in drying of food products. *Drying Technology*, 40(2), 352-370. DOI: [10.1080/07373937.2020.1804927](https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1804927)
- Huang, D., Li, W., Shao, H., Gao, A., & Yang, X. (2017). Colour, texture, microstructure and nutrient retention of kiwifruit slices subjected to combined air-impingement jet drying and freeze drying. *International Journal of Food Engineering*, 13(7), 20160344. DOI: [10.1111/1541-4337.13175](https://doi.org/10.1111/1541-4337.13175)
- Jin, W., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2024). A high-efficiency radio-frequency-assisted hot-air drying method for the production of restructured bitter melon and apple chips. *Foods*, 13(2), 197. DOI: [10.3390/foods13020197](https://doi.org/10.3390/foods13020197)
- Ju, H. Y., Zhao, S. H., Mujumdar, A. S., Zhao, H. Y., Duan, X., Zheng, Z. A., ... & Xiao, H. W. (2020). Step-down relative humidity convective air drying strategy to enhance drying kinetics, efficiency, and quality of American ginseng root (*Panax quinquefolium*). *Drying Technology*. DOI: [10.1080/07373937.2019.1597373](https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1597373)
- Karimi, S., Bibak, F., Layeghiniya, N., & Abbasi, H. (2021). Determination of drying kinetics of *Allium stipitatum* under a proposed combined microwave-hot air method and investigation of effect of operating conditions on its color parameters. *Journal of food science and technology*, 18(110), 99-115. DOI: [10.29252/fsct.18.01.10](https://doi.org/10.29252/fsct.18.01.10)
- Li, W., Wang, M., Zhang, B., & Yang, X. (2015). Effects of air-impingement jet drying on drying kinetics, nutrient retention and rehydration characteristics of onion (*Allium cepa*) slices. *International Journal of Food Engineering*, 11(3), 435-446. DOI: [10.1515/ijfe-2014-0269](https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0269)
- Ljung, A. L., Andersson, L. R., Andersson, A. G., Lundström, T. S., & Eriksson, M. (2017). Modelling the evaporation rate in an impingement jet dryer with multiple nozzles. *International Journal of Chemical Engineering*, (1), 57-62. DOI: [10.1155/2017/5784627](https://doi.org/10.1155/2017/5784627)
- Omidifar, N., Nili-Ahmadabadi, A., Gholami, A., Dastan, D., Ahmadimoghaddam, D., & Nili-

- Engineering*, 105(2), 233-240.
[DOI:10.1016/j.biosystemseng.2009.11.001](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.11.001)
- Zheng, X., Xiao, H., Wang, L., Zhang, Q., Bai, J., Xie, L., ... & Gao, Z. (2014). Shorting drying time of Hami-melon slice using infrared radiation combined with air impingement drying. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(1), 262-269.
[DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.01.033](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2014.01.033)
- Zheng, Q., Li, X., Liu, T., Zhang, Y., Liu, J., Zhang, H., ... & Gao, X. (2021). Effects of air-impingement jet drying on drying kinetics, color, polyphenol compounds, and antioxidant activities of *Boletus aereus* slices. *Journal of Food Science*, 86(5), 2131-2144.
[DOI: 10.1111/1750-3841.15702](https://doi.org/10.1111/1750-3841.15702)