

" Effects of Cutting Type, Temperature, and Vacuum Pressure on Microwave Vacuum Drying Characteristics"

Ali Kazemian¹, Arash Latifi Mamaqani², Sasan Asiaei³ 

Abstract: This study investigated the simultaneous effects of cutting geometry (plain slices of 2 and 4 mm, latticed slices of 2 and 4 mm, and cubes), temperature (85, 95, 105 °C), and vacuum pressure (55, 80, 100 kPa) on drying kinetics, energy consumption, and quality attributes of apples in a microwave-vacuum dryer. Samples were dried at a constant power of 3 W/g, and the evaluated indices included drying time, specific energy, color change, brightness, and rehydration ratio. Results indicated that the 2mm latticed geometry, by creating vapor escape routes and increasing the surface to volume ratio, significantly reduced the drying time to 95 minutes and increased the rehydration ratio to 4.5. Increasing temperature and pressure accelerated the drying rate and reduced specific energy consumption by up to 56%, without any significant loss in color quality. Two-way analysis of variance revealed that the independent effects of geometry and process conditions on all indices were significant, but their interaction effect was not significant. The optimal conditions were determined as the 2-mm latticed slice at 105 °C and 100 kPa, which provided the best trade-off between drying rate, energy efficiency, and final product quality for industrial applications.

Keywords: Color change, Cutting geometry, Dried apple, Drying kinetics, Energy consumption, Mass transfer, Microwave vacuum drying, Product quality, Rehydration ratio, Vacuum pressure

I. INTRODUCTION

Apple is one of the most widely consumed fruits worldwide; however, its high moisture content makes it highly susceptible to microbial spoilage and quality deterioration during storage [1], [2]. Drying is an effective preservation method that extends shelf life and reduces transportation and storage costs [3]. Conventional hot-air drying is commonly used in the food industry, but it often requires long processing times and may adversely affect product quality, including color, texture, and nutritional value [4], [5].

Microwave-vacuum drying has emerged as a promising alternative because it combines volumetric microwave heating with reduced-pressure conditions, resulting in shorter drying times, lower energy consumption, and improved product quality [6]–[9]. The efficiency of this process depends on several factors, including temperature, vacuum pressure, and product geometry, which directly influence heat and mass transfer mechanisms [10], [11].

Although numerous studies have investigated the effects of drying conditions, limited information is available regarding the combined influence of cutting geometry and operating parameters on drying kinetics, energy consumption, and quality attributes of apples during microwave-vacuum drying. Therefore, this study aimed to evaluate the effects of cutting type, temperature, and vacuum pressure on drying behavior, energy efficiency, and quality characteristics of dried apples and to determine the optimum processing conditions.

II. MATERIALS AND METHODS

Fresh green apples (Mashhad variety) at full ripeness, weighing 180–220 g each with a 5 cm average slice diameter, were procured from a local market. Initial moisture content was approximately 85% (wet basis). Apples were washed, manually peeled, and immersed in 0.5% citric acid for 5 minutes to prevent enzymatic browning, then rinsed and surface-dried.

Five cutting geometries were prepared: plain slices (2 and 4 mm thick), latticed slices (2 and 4 mm thick with seven symmetrical 3-mm diameter holes in a honeycomb arrangement), and 10 -mm cubes. The latticed design increased the surface-to-volume ratio by approximately 10% while removing only 2.5% of tissue volume.

Drying experiments were conducted in a custom-built microwave-vacuum system consisting of a stainless-steel chamber, a 2.45 GHz magnetron, an oil vacuum pump with ejector, a solenoid valve, and temperature/pressure sensors. Samples were placed in a single layer on Teflon mesh baskets. Microwave power was fixed at 3 W/g based on initial sample weight. Three process conditions were evaluated: 85°C, 55 kPa, 95°C/80 kPa, and 105°C, 100 kPa. Drying continued until final moisture reached below 5% , confirmed by weight change of less than 0.01 g over 5 minutes. Sample weight, temperature, and pressure were monitored and recorded every 5 minutes.

Moisture content (M, dry basis) and moisture ratio (MR) were calculated using:

¹ Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: alikazemian137@gmail.com

² Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: arash.latifi1379@gmail.com

³ Corresponding author , Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: asiaei@iust.ac.ir

$$M = \frac{W_t - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

where W_t is sample weight at time t , W_d is final dry weight, and M_t and M_0 are moisture contents at time t and initially. The Page model was fitted to drying data:

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (3)$$

Color parameters (L^* , a^* , b^*) were measured to determine total color change:

$$\Delta E = \sqrt{((\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2)} \quad (4)$$

Rehydration ratio (RR) was obtained by soaking dried samples in distilled water:

$$RR = \frac{W_{rehydrated} - W_{dry}}{W_{dry}} \quad (5)$$

Specific energy consumption was calculated from total energy input divided by removed moisture mass. All experiments were replicated three times, and two-way ANOVA with Duncan's multiple-range was used for statistical analysis.

III. RESULTS AND DISCUSSION

Drying kinetics demonstrated that the 2 mm latticed geometry consistently exhibited superior performance compared with all other cutting geometries throughout the experiments. Under the highest process conditions of 105°C and 100 kPa, the 2 mm latticed samples reached the desired moisture level within only

95 min, whereas the cubic samples required 155 min under the same operating conditions. This remarkable improvement can be attributed to the unique structural characteristics of the latticed geometry, which provided a larger effective surface area for moisture removal and facilitated the formation of multiple vapor escape channels. The presence of seven uniformly distributed holes significantly reduced internal mass transfer resistance and promoted rapid moisture migration from the interior to the surface of the samples. In addition, increasing the drying temperature from 85°C to 105°C and raising the pressure from 55 kPa to 100 kPa accelerated the drying process for all geometries and shortened the required drying time by approximately 30 to 40 percent as a result of improved heat and mass transfer rates.

Specific energy consumption followed a trend similar to that observed for drying time. The 2 mm latticed samples showed the lowest energy requirement of 2.8 kWh, while the cubic samples consumed 4.6 kWh under identical drying conditions. Therefore, optimizing the cutting geometry alone resulted in an energy saving of approximately 56 percent. Quality analysis further demonstrated that the 2 mm latticed geometry provided

the best preservation of product appearance and structural integrity. These samples maintained the highest brightness value of 74 and exhibited the lowest total color change of 3.5. In contrast, the cubic geometry showed the poorest color retention with a brightness value of 68 and a total color change of 5.2, which can be attributed to the prolonged exposure of the samples to thermal conditions during drying.

The rehydration ratio was also strongly affected by sample geometry. The highest value of 4.5 was obtained for the 2 mm latticed samples, whereas the cubic samples exhibited the lowest value of 2.6, indicating a greater degree of structural collapse and reduced porosity. Statistical evaluation using analysis of variance confirmed that both cutting geometry and process conditions had significant effects on all investigated responses at the five percent significance level, whereas the interaction between these factors was not statistically significant.

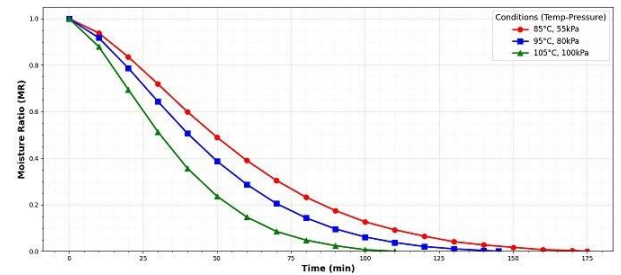


Fig. 3. Drying curves for a 2 mm simple slab geometry under different temperature–pressure conditions

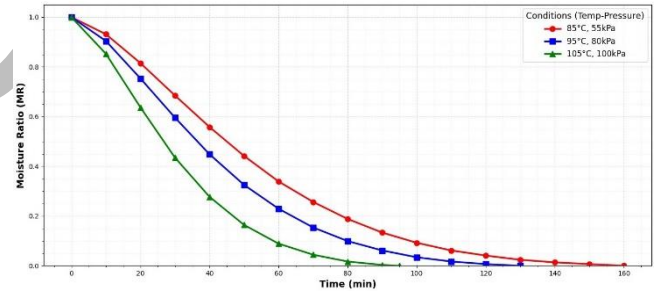


Fig. 4. Drying curves for the 2 mm lattice geometry

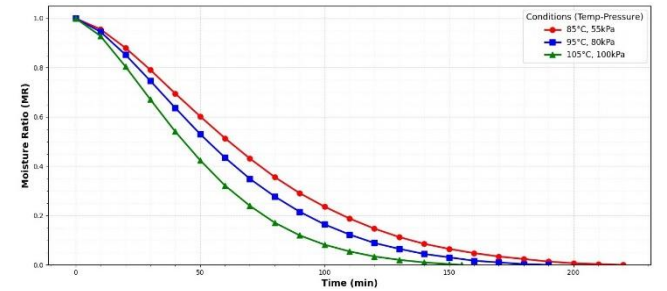


Fig. 5. Drying curves for the cubic geometry

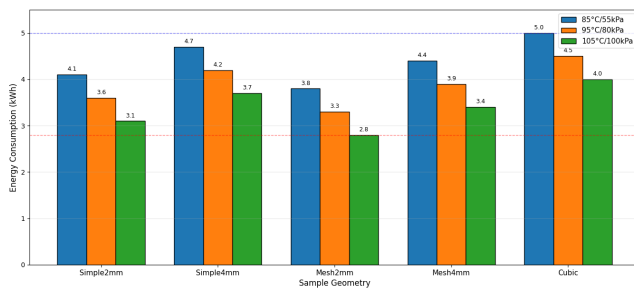


Fig. 6. Comparison of energy consumption during apple drying for five different geometries under three temperature-pressure conditions. The data indicate that the 2 mm lattice geometry at 105°C exhibits the lowest energy consumption, requiring only 2.8 kWh

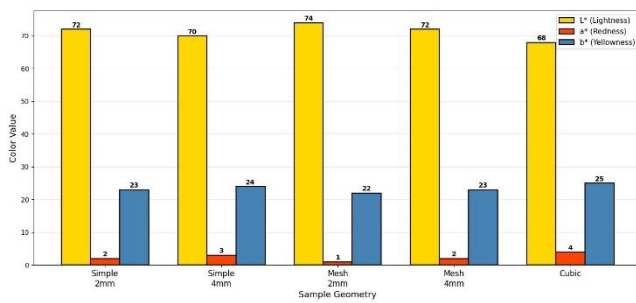


Fig.7. Color parameters of dried apple samples with different geometries

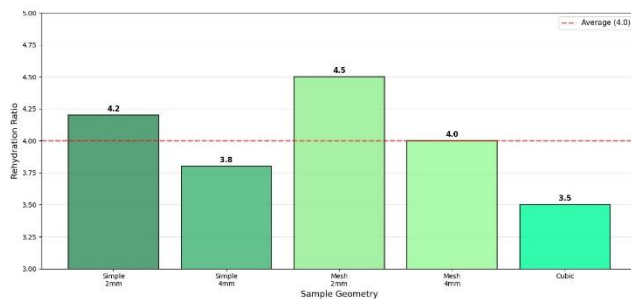


Fig.8. Rehydration capacity of dried apple samples with different geometries

IV. Conclusion

This study experimentally investigated the simultaneous effects of cutting geometry, temperature, and vacuum pressure on drying kinetics, energy consumption, and quality attributes of apples during microwave vacuum drying. The 2 mm latticed geometry consistently outperformed all other shapes, achieving the shortest drying time 95 min, lowest energy consumption 2.8 kWh, best color retention $\Delta E = 3.5$, $L^* = 74$, and highest rehydration ratio $RR = 4.5$ at 105°C and 100 kPa. Increasing temperature and pressure significantly accelerated drying and reduced specific energy consumption by up to 56% without

compromising final product quality. Statistical analysis confirmed that both geometry and process conditions independently influenced all responses, with no significant interaction between them. The optimal industrial conditions were identified as 2mm latticed slices dried at 105°C and 100 kPa, offering a 39% reduction in cycle time, 56% energy savings, and 80% improvement in rehydration capacity compared to cubic samples. These findings provide practical guidelines for producing high quality dried apples with enhanced energy efficiency and reduced production costs in industrial microwave vacuum drying systems.

References

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations, "FAOSTAT Statistical Database," 2022. [Online]. Available: <http://www.fao.org/faostat/> [Accessed: Jan. 15, 2026].
- [2] D. A. Hyson, "A comprehensive review of apples and apple components and their relationship to human health," *Advances in Nutrition*, vol. 2, no. 5, pp. 408–420, 2011.
- [3] P. J. Fellows, *Food Processing Technology: Principles and Practice*, 4th ed. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2017.
- [4] A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying*, 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015.
- [5] A. Vega-Gálvez et al., "Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties of apple slices," *Food Chemistry*, vol. 110, no. 2, pp. 441–446, 2008.
- [6] P. P. Lewicki, "Design of hot air drying for better foods," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 17, no. 4, pp. 153–163, 2006.
- [7] M. Maskan, "Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air drying," *Journal of Food Engineering*, vol. 48, no. 2, pp. 169–175, 2001.
- [8] C. Ratti, "Hot air and freeze-drying of high-value foods," *Journal of Food Engineering*, vol. 49, no. 4, pp. 311–319, 2001.
- [9] C. Ratti, "Freeze drying for food preservation," *Drying Technology*, vol. 27, no. 6, pp. 81–95, 2009.
- [10] S. Gunasekaran, "Pulsed microwave–vacuum drying of food materials," *Drying Technology*, vol. 17, no. 6, pp. 1205–1228, 1999.
- [11] S. Devahastin, *Advanced Food Drying Technologies*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.
- [12] Y. Wang and Y. Xi, "Microwave vacuum drying of foods: principles and applications," *Food Engineering Reviews*, vol. 6, no. 2, pp. 101–117, 2014.
- [13] A. Figiel, "Drying kinetics and quality of vacuum–microwave dehydrated garlic cloves and slices," *Journal of Food Engineering*, vol. 94, no. 1, pp. 98–104, 2009.
- [14] M. Zielińska and M. Markowski, "Color characteristics of carrots dried by microwave–vacuum method," *Drying Technology*, vol. 28, no. 3, pp. 347–353, 2010.
- [15] M. Zhang et al., "Recent developments in microwave-assisted drying of vegetables, fruits and aquatic products," *Drying Technology*, vol. 24, no. 10, pp. 1259–1277, 2006.

تحلیل تجربی نوع برش، دما و فشار خلأ بر سینتیک جرم، ویژگی‌های کیفی محصول و مصرف انرژی در خشک‌سازی مایکروویو تحت خلأ

چکیده

در این پژوهش، تأثیر نوع برش سبب بر سینتیک خشک‌سازی و ویژگی‌های کیفی محصول در خشک‌کن مایکروویو-خلأ بررسی شد. نمونه‌ها شامل برش ورقه‌ای (۲) و ۴ میلی‌متر، مشبک (۲ و ۴ میلی‌متر) و مکعبی بودند که در دماهای ۸۵، ۹۵ و ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۵۵، ۸۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال خشک شدند. شاخص‌های ارزیابی شامل زمان و نرخ خشک‌شدن، مصرف انرژی، تغییر رنگ، روشنایی و نسبت بازجذب آب بودند. نتایج نشان داد برش مشبک ۲ میلی‌متری کوتاه‌ترین زمان خشک‌شدن، کمترین مصرف انرژی و بهترین کیفیت ظاهری و بافتی را ارائه کرد. افزایش دما و فشار نرخ خشک‌سازی را افزایش و مصرف انرژی ویژه را بدون افت قابل توجه کیفیت کاهش داد. شرایط بهینه شامل برش مشبک ۲ میلی‌متری با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال بود.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کن مایکروویو-خلأ - سبب خشک - شکل برش - مصرف انرژی - کیفیت محصول

مقدمه

می‌دهد، و در عین حال هزینه‌های نگهداری (نیاز به سردخانه و حمل‌ونقل (کاهش وزن تا ۸۰ درصد) را به طور قابل توجهی پایین می‌آورد [۴،۵]. از دیدگاه فیزیکی، خشک‌سازی شامل سه مرحله اصلی است: دوره نرخ ثابت که تبخیر سطحی غالب است، دوره نرخ کاهش اول که انتقال رطوبت داخلی شروع می‌شود، و دوره نرخ کاهش دوم که رطوبت متصل تبخیر می‌گردد. مدل‌های ریاضی مانند پیچ یا میدیلی برای توصیف سینتیک خشک‌سازی استفاده می‌شوند. اما کیفیت نهایی محصول خشک‌شده در عمل بسیار وابسته به روش و پارامترهای فرآیند است؛ به گونه‌ای که انتخاب ناصحیح روش خشک‌سازی می‌تواند به از دست رفتن بخش عمده‌ای از خواص حسی (رنگ، طعم، بافت) و تغذیه‌ای (تا ۸۰ درصد ویتامین C و ۵۰ درصد فنول‌ها) منجر شود. برای مثال، خشک‌سازی نامناسب می‌تواند شاخص تغییر رنگ را به بیش از ۲۰ برساند که محصول را غیرقابل فروش می‌کند [۶]. بنابراین، ارزیابی کیفیت با ابزارهایی مانند رنگ‌سنجی که روشنایی، قرمز-سبز و زرد-آبی را اندازه می‌گیرد، بافت‌سنجی سختی و تردی و آنالیز شیمیایی برای فنول‌ها ضروری است.

روش‌های کلاسیک مانند خشک‌سازی با هوای گرم از نظر سهولت و مقیاس‌پذیری مزایا دارند، زیرا تجهیزات ساده‌ای مانند خشک‌کن‌های تونلی یا کابینتی نیاز دارند و می‌توانند در مقیاس صنعتی (تا هزاران تن) استفاده شوند، اما معایبی مثل زمان طولانی فرآیند (۲۴-۸۰ ساعت برای سبب)، مصرف انرژی بالا و تخریب ترکیبات حساس به دما (مانند ویتامین C که در دمای بالای ۶۰ درجه تخریب می‌شود) را نیز به همراه دارند [۷،۸]. در این روش، گرمایش سطحی باعث تشکیل پوسته سخت می‌شود که انتقال رطوبت را کند کرده و کیفیت را کاهش می‌دهد. مطالعات نشان می‌دهند که خشک‌سازی هوای گرم می‌تواند تغییر رنگ را به ۱۵-۲۵ برساند و بافت را سفت کند. از سوی دیگر، روش‌هایی مثل انجماد-خشک کیفیت بالایی ارائه می‌دهند، زیرا در دمای پایین (-۵۰) و خلأ انجام می‌شود و ساختار متخلخل تا ۹۰ درصد را حفظ می‌کند، اما به دلیل هزینه سرمایه‌ای بالا (تجهیزات گران مانند مصرف انرژی زیاد و زمان طولانی (۴۸-۲۴ ساعت)، اغلب برای محصولات خاص و گران‌قیمت مانند داروها یا میوه‌های لوکس به کار می‌روند [۹،۱۰]. این روش حفظ ۹۰ درصد فنول‌ها را تضمین می‌کند، اما برای تولید انبوه سبب اقتصادی نیست.

در سال‌های اخیر، ترکیب دو تکنولوژی «گرمایش حجمی با مایکروویو» و «خشک‌سازی در فشار کاهش‌یافته خلأ» معروف به خشک‌سازی مایکروویو-خلأ به‌عنوان یک مسیر میانی و کارآمد مطرح شده است. این روش که از دهه ۱۹۶۰ توسعه

سبب به‌عنوان یکی از محصولات باغی و پرمصرف جهان، نه تنها از منظر تغذیه‌ای اهمیت دارد، بلکه از منظر اقتصادی و زنجیره تأمین غذا نیز نقش قابل توجهی ایفا می‌کند [۱]. این میوه که از خانواده رزاسه است، با بیش از ۷۵۰۰ رقم شناخته شده، در بیش از ۹۰ کشور جهان کشت می‌شود و تولید جهانی آن طبق آمار سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد در سال ۲۰۲۲ به بیش از ۸۶ میلیون تن رسیده است. چین به عنوان بزرگ‌ترین تولیدکننده، حدود ۴۹ میلیون تن (۵۷ درصد سهم جهانی) را به خود اختصاص داده، در حالی که ایران با تولید سالانه حدود ۳-۴ میلیون تن، در رتبه چهارم تا هفتم جهانی قرار دارد و صادرات آن در سال‌های اخیر به بیش از ۲۰۰ هزار تن رسیده است. ارزش بازار جهانی سبب بیش از ۱۰۰ میلیارد دلار تخمین زده می‌شود و نقش آن در اقتصاد کشاورزی کشورهای در حال توسعه مانند ایران، جایی که باغداری حدود ۲۰ درصد از تولید ناخالص داخلی بخش کشاورزی را تشکیل می‌دهد، بسیار حیاتی است. با این حال، ماهیت آبدار این میوه با رطوبت اولیه ۸۵-۸۸ درصد، آن را مستعد فساد میکروبی، آنزیمی و فیزیکی می‌کند؛ بدون فرآوری و نگهداری مناسب، درصد قابل توجهی از محصول (تا ۳۰ درصد در کشورهای در حال توسعه) در مراحل پس از برداشت دچار فساد یا افت کیفیت می‌شود. این هدررفت نه تنها خسارات اقتصادی به بار می‌آورد (حدود ۱ میلیارد دلار سالانه در ایران)، بلکه به مشکلات زیست‌محیطی مانند افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و هدررفت منابع آب (هر تن سبب حدود ۸۲۲ لیتر آب مصرف می‌کند) منجر می‌شود؛ بنابراین توسعه روش‌های مؤثر برای افزایش ماندگاری و تولید محصولات با ارزش افزوده مانند میوه خشک، همواره در کانون توجه پژوهشگران و صنعت قرار دارد [۲،۳]. در این راستا، تبدیل سبب به محصولات خشک‌شده مانند چیپس یا پودر، نه تنها ماندگاری را تا ۱۲-۲۴ ماه افزایش می‌دهد، بلکه ارزش افزوده اقتصادی (تا ۵ برابر قیمت میوه تازه) ایجاد می‌کند و به صادرات کمک می‌نماید.

خشک‌سازی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری مواد غذایی است که ریشه در تمدن‌های باستانی دارد؛ شواهد باستان‌شناسی نشان می‌دهد که خشک‌کردن میوه‌ها از حدود ۱۲ هزار سال پیش در خاورمیانه آغاز شده و مصریان باستان از آن برای حفظ ماهی و میوه استفاده می‌کردند. این روش با کاهش رطوبت به کمتر از ۱۰-۱۵ درصد مخمرها را مهار می‌کند، واکنش‌های شیمیایی نامطلوب مانند اکسیداسیون لیپیدها، هیدرولیز پروتئین‌ها و بروئینگ آنزیمی (به دلیل پلی‌فنول اکسیداز) را کاهش

این مطالعه بر اساس ارزیابی‌های کمی مانند نسبت سطح به حجم و مدل‌های تجربی انجام شد و نشان‌دهنده اهمیت انتخاب هندسه برای میوه‌های گرمسیری در فرآیندهای ترکیبی است. این نتایج بر اهمیت هندسه برش در بهینه‌سازی فرآیندهای خشک‌سازی مایکروویو تأکید دارد [۲۳].

از منظر مکانیزم، شکل برش می‌تواند توزیع دما را تغییر دهد به طور مثال برش‌های با سطح آزاد بیشتر و کانال‌های خروج بخار (مثل مشبک‌ها) معمولاً مسیرهای کوتاه‌تر و متعدد برای تبخیر فراهم می‌آورند که می‌تواند از ایجاد نقاط داغ و تخریب موضعی جلوگیری کند؛ در مقابل، قطعات متراکم‌تر ممکن است باعث تشکیل گرادیان‌های رطوبت و دما شوند که خود تأثیر منفی بر کیفیت دارد [۲۵]. این خواص نه تنها بر سینتیک خشک‌سازی تأثیرگذارند، بلکه بر پارامترهای مهم محصول نهایی مثل تغییر رنگ، روشنایی، شاخص تخلخل، بافت و ظرفیت بازجذب آب نیز اثر می‌گذارند [۲۶، ۲۷].

یکی دیگر از جنبه‌های حیاتی، مصرف انرژی است، انرژی ویژه مصرفی، تابع پیچیده‌ای از زمان فرآیند، انرژی تابشی و انتقال گرمایی است. انتخاب هندسه مناسب نمونه می‌تواند به طور مستقیم بر زمان خشک‌سازی و در نتیجه بر مصرف انرژی مؤثر باشد؛ بنابراین مطالعاتی که هم‌زمان سینتیک خشک‌سازی، کیفیت محصول و مصرف انرژی را تحلیل کنند برای طراحی خشک‌سازی مایکروویو-خلأ صنعتی فرآیند ضروری‌اند [۲۸]. برای مثال، در پژوهش روی گلابی، انتشار کربن دی اکسید را ۵۰ درصد کاهش داد [۲۹].

در نهایت، از آنجا که صنایع غذایی همواره به دنبال راهکارهایی با کیفیت بالاتر و مصرف انرژی کمتر هستند، تحقیقاتی که به صورت منسجم و مقایسه‌ای نقش هندسه برش را در فرآیند خشک‌کردن مایکروویو-خلأ بررسی کنند، می‌توانند راهنمایی‌های عملی ارزشمندی برای تولیدکنندگان ارائه دهند. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که ضخامت و شکل هندسی نمونه تأثیر مستقیمی بر سینتیک خشک‌شدن، انتقال جرم و کیفیت محصول نهایی دارند [۳۰، ۳۱].

در زمینه بهینه‌سازی ابعاد هندسی برای فرآیندهای خشک‌سازی، پژوهشگران محدودیت‌های ساختاری و عملیاتی متفاوتی را در ادبیات تحقیق گزارش کرده‌اند که مبنای مهندسی طراحی آزمایش‌ها قرار می‌گیرد. به عنوان مثال، دوازده همکاران [۱۷] در بررسی خشک‌سازی لایه‌نازک سیب نشان دادند که انتخاب ضخامت‌های کمتر از ۲ میلی‌متر به دلیل پدیده انقباض شدید بافتی و تمرکز تنش‌های حرارتی مایکروویو، منجر به تغییر شکل، ایجاد چرکینگی و شکنندگی شدید در محصول نهایی می‌شود. از سوی دیگر، وگا-گالوز و همکاران [۵] تبیین کردند که افزایش ضخامت ورقه‌ها به فراتر از ۴ میلی‌متر، به دلیل افزایش طول مسیر نفوذ داخلی بر اساس قانون دوم فیک، زمان فرآیند را به شدت طولانی کرده و مصرف انرژی ویژه را به صورت تصاعدی افزایش می‌دهد؛ لذا بازه عملیاتی ۲ تا ۴ میلی‌متر را به عنوان محدوده کارآمد و بهینه پیشنهاد دادند. علاوه بر هندسه ورقه‌ای، در خصوص قطعات حجیم نیز کوی و همکاران [۳۷] در بررسی خشک‌سازی مایکروویو-خلأ مکعب‌های سیب گزارش کردند که مکعبی به ضلع ۱۰ میلی‌متر مناسب‌ترین هندسه حجیم است؛ زیرا در ابعاد بزرگ‌تر از ۱۰ میلی‌متر، به دلیل محدودیت عمق نفوذ امواج مایکروویو در بافت‌های مرطوب، گرادیان شدید حرارتی ایجاد شده و مغز نمونه دچار سوختگی داخلی می‌شود. از سوی دیگر، مطالعات نشان داده‌اند که برخی هندسه‌ها مانند برش‌های خال‌ی و هلالی برای فرآیندهای مایکروویو چالش‌برانگیز هستند؛ ژانگ و همکاران [۱۵] اشاره کردند که در برش‌های خال‌ی، به دلیل وجود لبه‌های تیز متعدد و کشیدگی ساختار، پدیده تمرکز میدان الکترومغناطیسی رخ می‌دهد که منجر به سوختگی موضعی لبه‌ها قبل از اتمام فرآیند می‌شود. برش‌های هلالی نیز به دلیل دارا بودن ضخامت نامتقارن در طول یک قطعه، موجب جذب ناهمگون امواج مایکروویو، انقباض نامتقارن بافت و عدم یکنواختی

یافته، از امواج مایکروویو با فرکانس برای گرمایش حجمی استفاده می‌کند که حرارت را مستقیماً در داخل ماده (از طریق چرخش مولکول‌های قطبی مانند آب) تولید می‌کند، و با کاهش فشار به نقطه جوش آب را به ۳۰-۵۰ درجه پایین می‌آورد؛ این ترکیب منجر به افزایش نرخ تبخیر (تا ۵ برابر)، کاهش زمان فرآیند (به ۳۰-۶۰ دقیقه)، و کاهش اثرات حرارتی موضعی (مانند سوختگی سطحی) می‌شود؛ به طوری که حفظ رنگ ساختار تخلخلی و برخی ترکیبات زیست‌فعال (حفظ ۷۰-۹۰ درصد فنول‌ها) بهتر از روش‌های مرسوم گزارش شده است [۱۱، ۱۲، ۱۳].

مطالعات تجربی نشان می‌دهند که خشک‌سازی مایکروویو-خلأ می‌تواند بصورت چشمگیری زمان خشک‌سازی را کاهش دهد و در بسیاری موارد کیفیت حسی (طعم، بافت پف‌دار) و قابلیت بازجذب آب محصول را ارتقاء دهد، که برای کاربردهای غذایی مانند اسنک‌ها ایده‌آل است [۱۴]. برای مثال، در مطالعه‌ای روی سیب، خشک‌سازی مایکروویو-خلأ زمان را از ۲۴ ساعت (هوای گرم) به ۴۵ دقیقه کاهش داد و پارامتر روشنایی را از ۶۰ به ۷۵ افزایش داد [۱۵].

با این حال، کارایی و کیفیت حاصل از خشک‌سازی مایکروویو-خلأ تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل است که مهم‌ترین آن‌ها دمای کاری (۸۵-۱۰۵ درجه سانتی‌گراد)، فشار خلأ (۵۵-۱۰۰ کیلوپاسکال)، الگوی تابش پالسی یا پیوسته (برای جلوگیری از نقاط داغ) و همچنین ویژگی‌های فیزیکی نمونه مانند اندازه، ضخامت و هندسه برش می‌باشند [۱۶، ۱۷]. شامل شکل برش و نسبت سطح به حجم می‌تواند روی مسیرهای انتقال جرم، توزیع میدان الکترومغناطیسی در داخل ماده، و در نهایت روی سینتیک خشک‌سازی و ویژگی‌های بافتی اثرگذار باشد. برای مثال، نسبت سطح به حجم بالاتر در برش‌های مشبک، نرخ خشک‌سازی را ۳۰-۵۰ درصد افزایش می‌دهد [۱۸، ۱۹].

بخش عمده‌ای از کارهای پیشین به بررسی پارامترهای فرآیندی و اثر ضخامت برش‌ها پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که کاهش ضخامت معمولاً منجر به کاهش زمان خشک‌سازی و افزایش نرخ انتقال رطوبت می‌شود [۲۰]. اما بررسی‌های سیستماتیک و مقایسه‌ای درباره نقش مستقیم هندسه برش (مثلاً مقایسه ورقه‌های تخت، نمونه‌های مشبک با سطوح باز بیشتر، و قطعات مکعبی با سطوح محدودتر) در زمینه خشک‌سازی مایکروویو-خلأ برای میوه‌ها، به ویژه برای سیب، هنوز محدود است و شکاف پژوهشی در این حوزه محسوس است [۲۱]. در مطالعه دفرایه و همکاران ۲۰۱۷، که بر روی تأثیر اندازه و شکل میوه‌های تازه برش‌خورده بر زمان خشک‌سازی و کیفیت محصول تمرکز داشت، نشان داده شد که هندسه برش (مانند اندازه و شکل قطعات) به طور مستقیم بر سینتیک خشک‌سازی و کیفیت نهایی میوه‌ها تأثیرگذار است؛ به طوری که برش‌های کوچک‌تر و اشکال منظم‌تر (مانند ورقه‌های نازک یا قطعات مکعبی کوچک) زمان خشک‌سازی را کاهش می‌دهند (تا ۳۰-۵۰ درصد کمتر)، انقباض را کم می‌کنند، حفظ رنگ و بافت را بهبود می‌بخشند، و کیفیت حسی را حفظ می‌کنند، در حالی که برش‌های بزرگ‌تر یا نامنظم منجر به خشک‌شدن ناهموار، افزایش تغییر رنگ و افت کیفیت می‌شود؛ این نتایج بر اساس مدل‌های انتقال جرم و حرارت و آزمایش‌های تجربی روی میوه‌های مختلف مانند سیب و توت‌فرنگی به دست آمده و پیشنهاد می‌کند که بهینه‌سازی هندسه برای فرآیندهای صنعتی ضروری است [۲۲]. همچنین، در مطالعه عسکری و همکاران (۲۰۰۹)، که به بررسی تأثیر خشک‌سازی مایکروویو مکمل روی سه شکل برش مانگو پرداخت، گزارش شد که هندسه برش (شامل ورقه‌های نازک، قطعات مکعبی و اشکال نامنظم) بر سینتیک خشک‌سازی، جذب شکر، کاهش وزن و از دست رفتن آب تأثیرگذار است؛ به گونه‌ای که پس از اسمزی دهیدراسیون، خشک‌سازی مایکروویو (با قدرت ۲۰۰-۶۰۰ وات) زمان فرآیند را برای اشکال با سطح بیشتر (مانند ورقه‌ها) کاهش داد (۴۰ درصد کمتر)، کیفیت بافتی را بهبود بخشید، و ساختار متخلخل را حفظ کرد، بدون افت شدید در خواص تغذیه‌ای؛

در انتقال جرم می‌شوند. از این رو، تمرکز بر هندسه‌هایی با تقارن ضخامتی بر مبنای نسبت سطح به حجم ضرورت دارد. با این حال، در مراجع گذشته اثر ساختارهای مشبک در این محدوده‌های ابعادی به صورت مقایسه‌ای و سیستماتیک کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

با توجه به مرور ادبیات پژوهش، مشخص است که اکثر تحقیقات گذشته بر تغییرات پارامترهای عملیاتی دستگاه (مانند توان، دما و فشار خلا) تمرکز داشته‌اند و کمتر به تأثیر فیزیکی هندسه و آرایش ساختاری خود ماده بر پدیده‌های انتقال هم‌زمان حرارت و جرم پرداخته شده است. لذا، نوآوری کلیدی این پژوهش، ارزیابی هندسه‌های نوین برش (به‌ویژه ساختار مشبک در ضخامت‌های مختلف) به عنوان یک استراتژی غیرشیمیایی جهت افزایش نسبت سطح به حجم نمونه است. این رویکرد هندسی با کوتاه‌کردن مسیر نفوذ موثر رطوبت، پتانسیل بالایی در تسریع نرخ خشک‌شدن و در نتیجه کاهش اتلاف انرژی ترمودینامیکی در سیستم میکروویو خلا دارد که تاکنون در مراجع گذشته مورد بررسی قرار نگرفته است.

بیان مسئله

در مطالعات پیشین تمرکز اصلی بر پارامترهای عملیاتی مانند توان میکروویو، دمای فرآیند و سطح فشار خلا بوده و اثر نوع و ساختار هندسی برش (مانند ورقه‌ای ساده با ضخامت‌های متفاوت، برش‌های مشبک با سوراخ‌های باز و قطعات مکعبی) کمتر به صورت مقایسه‌ای و تحت شرایط یکسان ارزیابی شده است. این در حالی است که هندسه برش به طور مستقیم بر نسبت سطح به حجم، مسیرهای خروج بخار آب،

توزیع یکنواخت انرژی میکروویو در داخل نمونه و در نتیجه بر سینتیک انتقال جرم، مصرف انرژی ویژه و ویژگی‌های کیفی محصول نهایی (از جمله تغییر رنگ، روشنایی، ظرفیت بازجذب آب و بافت محصول) تأثیرگذار است.

عدم بررسی سیستماتیک این عامل مانع از دستیابی به بهینه‌سازی کامل فرآیند خشک‌سازی میکروویو-خلا شده و فرصت کاهش بیشتر مصرف انرژی، کوتاه‌تر کردن زمان تولید و ارتقای کیفیت محصول به سطح استانداردهای صادراتی را از دست داده است. به‌ویژه در شرایطی که صنایع غذایی به دنبال روش‌های پایدار، کم‌مصرف و با کیفیت بالا برای فرآوری میوه‌هایی مانند سیب هستند، شناسایی هندسه بهینه برش می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر بهره‌وری اقتصادی و زیست‌محیطی فرآیند داشته باشد. بنابراین این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف پژوهشی قصد دارد اثر متغیرهای مستقل کلیدی را بر شاخص‌های عملکرد فرآیند و کیفیت محصول به صورت تجربی و مقایسه‌ای بررسی کند.

بدین منظور در جدول زیر پارامترهای حیاتی برای تولید و ارزیابی سیب به عنوان یک محصول از دیدگاه اقتصادی مورد بررسی قرار میگیرد، در این جدول پارامترهایی مثل زمان خشک شدن به عنوان عامل تعیین کننده نرخ تولید و مصرف انرژی که مستقیماً هزینه‌های جانبی را هدف میگیرد، و شاخص‌های کلیدی برای کیفیت سنجی آورده شده اند:

جدول ۱- شاخص‌های کلیدی کمی و کیفی در تولید اقتصادی و فرآوری برای محصول سیب

دسته‌بندی	شاخص ارزیابی	واحد اندازه‌گیری	هدف (کمینه/بیشینه)	توضیح مختصر
سینتیک خشک‌شدن	زمان خشک‌شدن نهایی	دقیقه	کمینه	مدت زمان لازم برای رسیدن محصول به رطوبت نهایی
مصرف انرژی	انرژی کل مصرفی	کیلو وات ساعت	کمینه	مصرف کل انرژی در کل فرآیند خشک‌کردن
کیفیت ظاهری و بافتی	تغییر رنگ	بدون واحد	کمینه	میزان انحراف رنگ محصول خشک‌شده نسبت به نمونه تازه
کیفیت ظاهری و بافتی	ظرفیت بازجذب آب	بدون واحد	بیشینه	توانایی محصول خشک‌شده در جذب مجدد آب

بدین منظور باید پارامترهای ورودی که روی این شاخص‌ها تأثیر گذار هستند، علاوه بر هندسه سیب مورد توجه قرار داد. شاخص‌های ارزیابی اصلی ورودی که در این پژوهش مورد توجه ویژه قرار می‌گیرند و برای مقایسه دقیق هندسه‌های مختلف برش استفاده می‌شوند به شرح زیر هستند:

جدول ۲- پارامترهای ورودی موثر و مورد ارزیابی آزمایش

متغیر مستقل	سطوح مورد بررسی	توضیح مختصر
هندسه برش سیب	ورقه‌ای ساده ۲,۴ میلی‌متر مشبک ۲,۴ میلی‌متر مکعبی ۱۰ میلی‌متر × ۱۰ میلی‌متر میلی‌متر ۱۰ × میلی‌متر	بررسی اثر شکل و ضخامت بر انتقال جرم، سینتیک خشک‌شدن و کیفیت محصول
دمای فرآیند (°C)	۸۵، ۹۵، ۱۰۵	محدوده دمایی رایج در خشک‌کن میکروویو-خلا
فشار خلا (kPa)	۵۵، ۸۸، ۱۰۰	محدوده فشار خلا قابل دستیابی در دستگاه

با انجام آزمایش‌های تجربی تحت شرایط کنترل‌شده و تحلیل آماری داده‌ها، این پژوهش به شناسایی هندسه و شرایط عملیاتی بهینه‌ای خواهد رسید که بهترین تعادل ممکن را بین سرعت فرآیند، بهره‌وری انرژی و کیفیت محصول نهایی برقرار کند. نتایج حاصل می‌تواند مبنای علمی و کاربردی مناسبی برای طراحی و بهینه‌سازی خطوط تولید صنعتی سیب خشک با روش خشک‌سازی میکروویو-خلاء فراهم آورد و به کاهش ضایعات، مصرف انرژی و بهبود کیفیت محصولات صادراتی کمک کند.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، تأثیر هندسه برش سیب بر سینتیک خشک‌شدن، مصرف انرژی و کیفیت محصول نهایی در فرآیند خشک‌کن میکروویو-خلاء بررسی شد. تمام مراحل به گونه‌ای توصیف شده‌اند که امکان تکرار دقیق آزمایش توسط سایر محققان فراهم باشد.

برای نمونه از سیب‌های سبز محلی مشهد استفاده شد که از بازار میوه محلی تهیه گردیدند. سیب‌ها در مرحله رسیدگی کامل انتخاب شدند (رنگ سبز یکنواخت، سختی متوسط، بدون آسیب ظاهری) و هر سیب متوسط وزنی حدود ۱۸۰ تا ۲۲۰ گرم و میانگین قطر هر اسلایس ۵ سانتی متر بود. رطوبت اولیه نمونه‌ها حدود ۸۵ درصد بود.

ابتدا سیب‌ها با آب سرد شسته شدند تا آلودگی‌های سطحی حذف شود. پوست‌گیری دستی با چاقوی ساده انجام شد و برای جلوگیری از قهوه‌ای شدن

آنزیمی، نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه در محلول ۰.۵ درصد اسید سیتریک غوطه‌ور شدند، سپس با آب شسته و با دستمال کاغذی خشک گردیدند.

معیار انتخاب و مشخصات مهندسی هندسه‌های برش

معیار انتخاب هندسه‌ی برش در این پژوهش بر پایه‌ی سه مؤلفه‌ی انتقال جرم، محدودیت‌های ساختاری بافت سیب و فیزیک امواج میکروویو تعیین شده است. در مرحله‌ی طراحی آزمایش، برش‌های خاللی و هلالی به دلایل فنی از چرخه حذف شدند، به طور مثال اگرچه برش خاللی با ابعاد $2 \times 5 \times 50$ میلی‌متر نسبت سطح به حجم بالایی معادل ۱.۴۴ دارد، اما بر اساس مستندات ژانگ و همکاران [۱۵]، وجود لبه‌های تیز در این هندسه باعث تمرکز شدید میدان الکترومغناطیسی شده و پیش از خروج رطوبت از مرکز نمونه، سوختگی موضعی لبه‌ها را به دنبال دارد.

از سوی دیگر، برش هلالی با قطر ۵۰ میلی‌متر و ضخامت متغیر ۲ تا ۱۲ میلی‌متر که نسبت سطح به حجم آن ۰.۵۲ است، به دلیل عدم تقارن و تغییرات ضخامت، جذب ناهمگون امواج و گرادیان حرارتی شدید ایجاد می‌کند، چنانکه کنتراس و همکاران [۳۸] نیز گزارش کرده‌اند. بنابراین تمرکز پژوهش بر دو هندسه‌ی پایدار و متقارن یعنی ورقه‌ای با ضخامت‌های ۲ و ۴ میلی‌متر در دو نوع ساده و مشبک و همچنین مکعبی معطوف گردید.

جدول ۳_ مشخصات هندسی، ابعادی و واکنش حرارتی اشکال مختلف برش سیب در فرآیند خشک‌کن میکروویو-خلاء

هندسه / ابعاد	حجم (میلی متر مکعب)	سطح (میلی متر مربع)	نسبت سطح به حجم	بازه نسبت بازجذب آب	واکنش توزیع حرارت	وضعیت در این پژوهش	مرجع
ورقه‌ای ساده ۲ میلی‌متر	۳۹۲۵	۴۲۳۹	۱.۰۸	۴.۲-۳.۵	جذب یکنواخت امواج	انتخاب شد	دایماز و همکاران [17]
ورقه‌ای ساده ۴ میلی‌متر	۷۸۵۰	۴۵۵۳	۰.۵۸	۳.۳-۲.۸	افزایش گرادیان رطوبت داخلی	انتخاب شد	وگا گالوز و همکاران [5]
ورقه‌ای مشبک ۲ میلی‌متر	۳۸۲۶	۴۲۷۲	۱.۱۱	۴.۸-۴.۰	تشدید خروج بخار هیدرودینامیکی	انتخاب شد	طراحی این پژوهش
ورقه‌ای مشبک ۴ میلی‌متر	۷۶۵۲	۴۸۲۳	۰.۶۳	۳.۷-۳.۲	بهبود نفوذ در نمونه ضخیم	انتخاب شد	طراحی این پژوهش
مکعبی	۱۰۰۰	۶۰۰	۰.۶	۳.۵-۳.۰	انطباق با عمق نفوذ امواج	انتخاب شد	کویی و همکاران [37]
خاللی طول: ۵۰ عرض: ۵ ضخامت: ۲	۵۰۰	۷۲۰	۰.۴۴	۲.۲-۱.۸	تمرکز میدان در لبه‌ها	حذف شد (X)	ژانگ و همکاران [15]
هلالی قطر: ۵۰ ضخامت متغیر ۲ تا ۱۲	۴۲۰۰	۲۱۶۸	۰.۵۲	۲.۰-۱.۵	ناهمگونی حرارتی	حذف شد (X)	کنتراس و همکاران [38]

ایجاد مساحت سطح جانبی در دیواره داخلی سوراخ‌ها، منجر به افزایش حدوداً ۱۰ درصدی (بین ۳.۴٪ تا ۸.۶٪) در شاخص نسبت سطح به حجم شد.

پیکربندی سبدها و تمهیدات مهندسی جهت توزیع همگن امواج مگنترون

نمونه‌ها برای ایجاد یکنواختی میدان الکترومغناطیسی و جلوگیری از تشکیل نقاط داغ، در سه سبد توری تفلونی به قطر ۲۰ سانتی‌متر و به‌صورت عمودی در مرکز محفظه استوانه‌ای (قطر ۳۲ سانتی‌متر) قرار گرفتند. فاصله حدود ۶ سانتی‌متری از دیواره‌ها و فاصله ۱۵ سانتی‌متری بین سبدها، بازتاب مؤثر امواج و خروج بخار آب را تسهیل کرد. همچنین، استفاده از همزن امواج متحرک، امواج ایستاده را به میدان سه‌بعدی یکنواخت تبدیل نمود. دیواره‌های استیل ضدزنگ با بازتابندگی بالا و سبدهای تفلونی با اتلاف دی‌الکتریک ناچیز، توزیع یکنواخت انرژی را تضمین کردند. ارزیابی رطوبت نهایی نیز عدم اختلاف معنی‌دار بین طبقات را نشان داد.

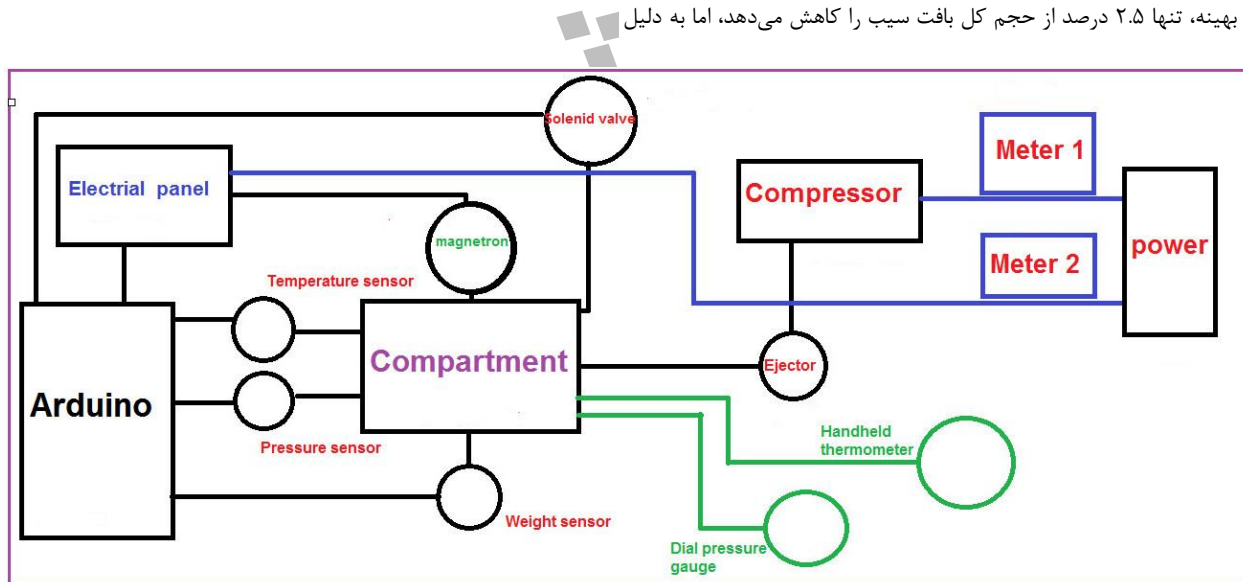
دستگاه خشک‌کن مایکروویو—خلاً شامل محفظه خلاً استوانه‌ای، مگنترون با توان قابل تنظیم، سیستم خلاً متشکل از کمپرسور، اجکتور و شیر سلونوئیدی، حسگرهای دما و فشار، کنترلر ثبت داده و کنترلر اندازه‌گیری انرژی بود. مگنترون گرمایش حجمی و سریع نمونه‌ها را فراهم می‌کرد و سیستم خلاً فشار کاری ۵۵ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال را به‌طور پایدار حفظ می‌نمود. شکل ۱ نمای شماتیک اجزای دستگاه و نحوه استقرار آن‌ها را نشان می‌دهد.

مطابق داده‌های جدول ۳، ورقه‌ای مشبک ۲ میلی‌متری با نسبت سطح به حجم ۱.۱۱ و بازجذب آب ۴.۰-۴.۸، ورقه‌ای ساده ۲ میلی‌متری با نسبت ۱.۰۸ و بازجذب ۳.۵-۴.۲، و مکعبی با نسبت ۰.۶ و بازجذب ۳.۰-۳.۵ عملکرد مطلوبی دارند. در مقابل، خلالی علی‌رغم نسبت سطح به حجم بالای ۱.۴۴، به دلیل تمرکز میدان در لبه‌های تیز مردود شده است و هلالی نیز با نسبت ۰.۵۲ و بازجذب ۱.۵-۲.۰ به همراه ناهمگونی حرارتی، شرایط لازم را تأمین نمی‌کند.

برای هندسه‌های مشبک، به منظور توزیع یکنواخت انتقال جرم و جلوگیری از تجمع تنش‌های حرارتی، ۷ سوراخ با قطر ۳ میلی‌متر در آرایش لانه زنبوری ایجاد شد. این آرایش هندسی (یک سوراخ در مرکز و ۶ سوراخ در فواصل متقارن ۲ سانتی‌متر با زاویه ۶۰ درجه)، تنها حالتی است که فاصله‌ای کاملاً مساوی میان تمام سوراخ‌ها و لبه‌های خروجی نمونه برقرار می‌کند و پخش‌شدگی یکنواخت مایکروویو را تضمین می‌نماید.

انتخاب دقیق قطر ۳ میلی‌متر برای سوراخ‌ها بر اساس آزمون‌های پیش‌گشت و به عنوان یک نقطه متعادل میان دو محدودیت فیزیکی تعیین گردید؛ چرا که بر اساس بررسی‌های تجربی، انتخاب قطر کمتر از ۳ میلی‌متر به دلیل پدیده انقباض شدید بافتی سیب در طول فرآیند، منجر به انسداد و گرفتگی سریع سوراخ‌ها شده و کارایی کانال‌ها را از بین می‌برد. از سوی دیگر، انتخاب قطر بیش از ۳ میلی‌متر به دلیل حذف بیش از حد بافت سلولی، استحکام مکانیکی نمونه را به شدت کاهش داده و منجر به فروپاشی ساختاری و دفرمه شدن شدید ورقه‌ها تحت اتمسفر خلاء می‌گردد.

تحلیل کمی روابط هندسی نشان داد که ایجاد این سوراخ‌های ۳ میلی‌متری با این آرایش بهینه، تنها ۲.۵ درصد از حجم کل بافت سیب را کاهش می‌دهد، اما به دلیل



شکل ۱ - سنسور دما برای پایش شرایط حرارتی به تابلو برق متصل است و از طریق آن ایمنی و عملکرد مگنترون کنترل می‌شود. سنسور فشار مقدار خلاً داخل محفظه را اندازه‌گیری کرده و برای کنترل مستقیم شیر برقی و تنظیم فشار به‌کار می‌رود. همچنین سنسور وزن تغییرات جرم نمونه را ثبت کرده و برای تحلیل سینتیک خشک‌شدن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آرduino دریافت، پردازش و مدیریت می‌شود. این سیستم کنترلی امکان تنظیم خودکار پارامترهای فرآیند و افزایش دقت و تکرارپذیری نتایج را فراهم می‌سازد.

به‌منظور پایش و کنترل دقیق شرایط عملیاتی، از سنسورهای مختلف دما، فشار و وزن استفاده شده است که داده‌های آن‌ها به‌صورت لحظه‌ای توسط میکروکنترلر



شکل ۲- این تصاویر اجزای واقعی به کار رفته در خشک کن مایکروویو-خلأ را نشان می دهند که شامل تابلو برق و کلیدهای کنترلی، کمپرسور و اجکتور سیستم خلأ، شیر برقی، گیج فشار، واحد ثبت وزن و سبد حاوی نمونه ها داخل محفظه است. این اجزا به صورت یکپارچه برای پایش و کنترل دما، فشار و کاهش وزن نمونه ها در طول فرآیند خشک شدن به کار گرفته شده اند.

همچنین به منظور ارزیابی کیفیت سیب از دو شاخص اساسی یعنی تغییر رنگ و نسبت باز جذب آب استفاده گردید، که رابطه تغییر رنگ کل با رابطه (۴) محاسبه گردید [۳۳]:

$$\Delta E = \sqrt{((\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2)} \quad (4)$$

که در آن ΔL تغییر روشنایی، Δa تغییر شاخص رنگ قرمزسبز و Δb تغییر شاخص رنگ زردآبی نمونه نسبت به نمونه تازه است.

به منظور ارزیابی توانایی نمونه ها در باز جذب آب پس از فرآیند خشک کردن، شاخص نسبت باز جذب آب محاسبه شد. این شاخص میزان آب جذب شده توسط نمونه خشک را نسبت به وزن خشک اولیه نشان می دهد و بیانگر قابلیت نگهداری بافت و کیفیت محصول نهایی است.

نسبت باز جذب آب با رابطه (۵) تعیین شد [۳۴]:

$$RR = \frac{W_{rehydrated} - W_{dry}}{W_{dry}} \quad (5)$$

که $W_{rehydrated}$ وزن نمونه پس از باز جذب آب و W_{dry} وزن خشک است. برای اطمینان از پایداری شرایط دستگاه و تکرارپذیری نتایج، همه آزمایش ها سه بار تکرار شد و برای مثال، یکی از این آزمایش ها (هندسه ورقه ای ساده ۲ میلی متر در شرط دمای ۸۵ درجه سانتی گراد و فشار ۵۵ کیلو پاسکال) در جدول ۴ آمده است. جدول زیر مقادیر اصلی هر تکرار، میانگین، انحراف استاندارد و درصد تغییرات را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، درصد تغییرات در اکثر شاخص ها کمتر از ۵ درصد است (مانند زمان خشک شدن ۱.۴٪، انرژی مصرفی ۲.۵٪، آب حذف شده ۱.۹٪، دمای متوسط ۰.۴۲٪ و فشار متوسط ۴.۰۱٪)، که بیانگر پایداری مناسب شرایط آزمایش است. تنها وزن نهایی با ۱۶.۷۱٪ کمی بالاتر است، که احتمالاً به دلیل تفاوت های طبیعی نمونه های سیب است.

آزمایش ها در سه شرایط عملیاتی مختلف دمای ۸۵ درجه سانتی گراد و فشار ۵۵ کیلو پاسکال، دمای ۹۵ درجه سانتی گراد و فشار ۸۰ کیلو پاسکال، و دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد و فشار ۱۰۰ کیلو پاسکال انجام شد. توان مایکروویو در تمامی آزمون ها بر مبنای وزن اولیه نمونه به صورت ثابت بر روی مقدار ۳ وات بر گرم تنظیم و روی این مقدار ثابت گردید. خشک کردن تا رسیدن به رطوبت نهایی کمتر از ۵ درصد (بر پایه خشک) یا وزن ثابت (تغییر وزن کمتر از ۰.۰۱ گرم در ۵ دقیقه) ادامه یافت. هر ۵ دقیقه وزن نمونه ها با ترازوی دیجیتال اندازه گیری شد. رطوبت بر خشکی M با رابطه (۱) محاسبه گردید [۳۰]:

$$M = \frac{W_t - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

که در آن W_t وزن نمونه در زمان t و W_d وزن خشک نهایی است. همچنین مصرف انرژی کل با کنتور آنولوگ ثبت شد.

به منظور تحلیل سینتیک خشک شدن نمونه ها، نسبت رطوبت بر اساس مقادیر رطوبت محاسبه شد. با توجه به پایین بودن رطوبت تعادلی در شرایط خشک کردن مایکروویو-خلأ، مقدار رطوبت تعادلی در محاسبات ناچیز در نظر گرفته شد و نسبت رطوبت مطابق رابطه (۲) تعریف گردید [۳۱]:

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

که در آن M_t رطوبت نمونه در زمان t و M_0 رطوبت اولیه نمونه است. به منظور توصیف رفتار سینتیک خشک شدن و بررسی اثر هندسه برش، داده های تجربی نسبت رطوبت با استفاده از مدل پیچ برازش داده شدند. فرم ریاضی این مدل به صورت رابطه (۳) بیان می شود [۳۲]:

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (3)$$

در این رابطه، k ثابت سرعت خشک شدن و n ضریب بدون بعد مدل هستند. برازش پارامترهای مدل با استفاده از روش کمترین مربعات غیرخطی انجام شد.

جدول 4- نتایج تکرار آزمایش برای بررسی پایداری شرایط دستگاه در هندسه ورقه‌ای ساده با ضخامت ۲ میلی‌متر در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۵۵ کیلوپاسکال (شامل مقادیر هر تکرار، میانگین، انحراف استاندارد و درصد تغییرات)

شاخص	تکرار ۱	تکرار ۲	تکرار ۳	میانگین	انحراف استاندارد	درصد تغییرات (CV)
وزن اولیه (گرم)	۳۷۰	۳۴۵	۳۶۱	۳۵۸	۱۲.۶۶	۳.۵۳
وزن نهایی (گرم)	۷۸	۵۷	۶۲	۶۵	۱۰.۹۷	۱۶.۷۱
آب حذف شده (گرم)	۲۹۲	۲۸۸	۲۹۹	۲۹۳	۵.۵۷	۱.۹۰
زمان کل خشک شدن (دقیقه)	۱۷۵	۱۷۲	۱۷۷	۱۷۴	۲.۵۲	۱.۴۴
انرژی مصرفی (kWh)	۴.۱	۳.۹۰	۴.۰	۴.۰	۰.۱	۲.۵
دمای متوسط (°C)	۸۱	۸۲	۸۱	۸۱	۰.۳۵	۰.۴۲
فشار متوسط (kPa)	۶۱	۵۷	۵۷	۵۹	۲.۳۷	۴.۰۱

این تکرارها نشان می‌دهند که دستگاه و شرایط آزمایش پایدار بوده و نتایج قابل اعتماد هستند. درصد تغییرات پایین در شاخص‌های کلیدی (زمان، انرژی، دما و فشار) تأیید می‌کند که خطاهای سیستماتیک یا تصادفی ناچیز بوده است.

تجزیه و تحلیل آماری

تمامی آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌ها در سه تکرار انجام و نتایج به صورت میانگین به همراه انحراف معیار گزارش شدند. جهت ارزیابی اثرات معنادار اصلی فاکتورها (شامل شکل هندسی برش و شرایط عملیاتی) و همچنین اثرات متقابل آن‌ها بر ویژگی‌های خشک شدن، مصرف انرژی و شاخص‌های کمی، از آزمون تحلیل واریانس دوطرفه استفاده گردید. برای مقایسه میانگین‌ها و تعیین تفاوت‌های معنادار، آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد (کمتر از پنج صدم) به کار گرفته شد. کلیه تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار اسپاس (نسخه ۲۶) انجام شد.

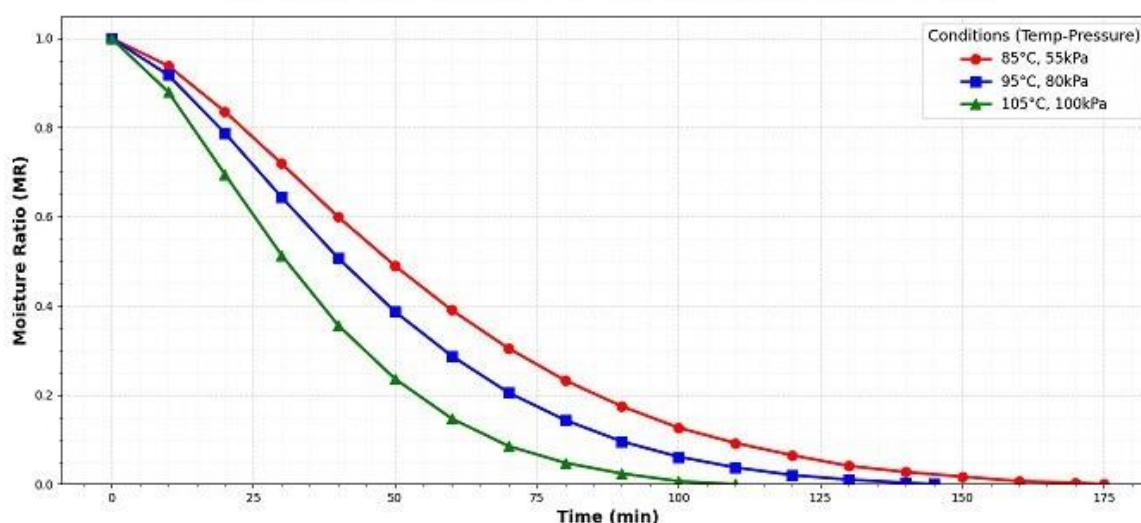
نتایج و بحث

در این پژوهش، سینتیک خشک شدن سیب در فرایند خشک کردن مایکروویو-خلأ مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تحلیل رفتار خشک شدن، اثر پنج هندسه مختلف

شامل ورقه‌ای ساده با ضخامت ۲ میلی‌متر، ورقه‌ای ساده با ضخامت ۴ میلی‌متر، مشبک با ضخامت ۲ میلی‌متر، مشبک با ضخامت ۴ میلی‌متر و نمونه‌های مکعبی، در سه سطح مختلف دما-فشار ارزیابی شد. همچنین، برای تعیین معناداری اثر پارامترهای ورودی بر متغیرهای خروجی، از آزمون تحلیل واریانس استفاده شد. افزون بر این، به منظور مقایسه و طبقه‌بندی میزان اثرگذاری هر یک از هندسه‌ها و شرایط دما-فشار، آزمون چنددامنه‌ای دانکن به کار گرفته شد.

همان‌گونه که در شکل ۳ برای هندسه ورقه‌ای ساده با ضخامت ۲ میلی‌متر نشان داده شده است، نسبت رطوبت سیب بر حسب زمان با افزایش دما و فشار به طور محسوسی کاهش یافت. بالاترین سطح دما-فشار موجب افزایش سرعت خشک شدن و کاهش زمان لازم برای رسیدن به رطوبت نهایی گردید.

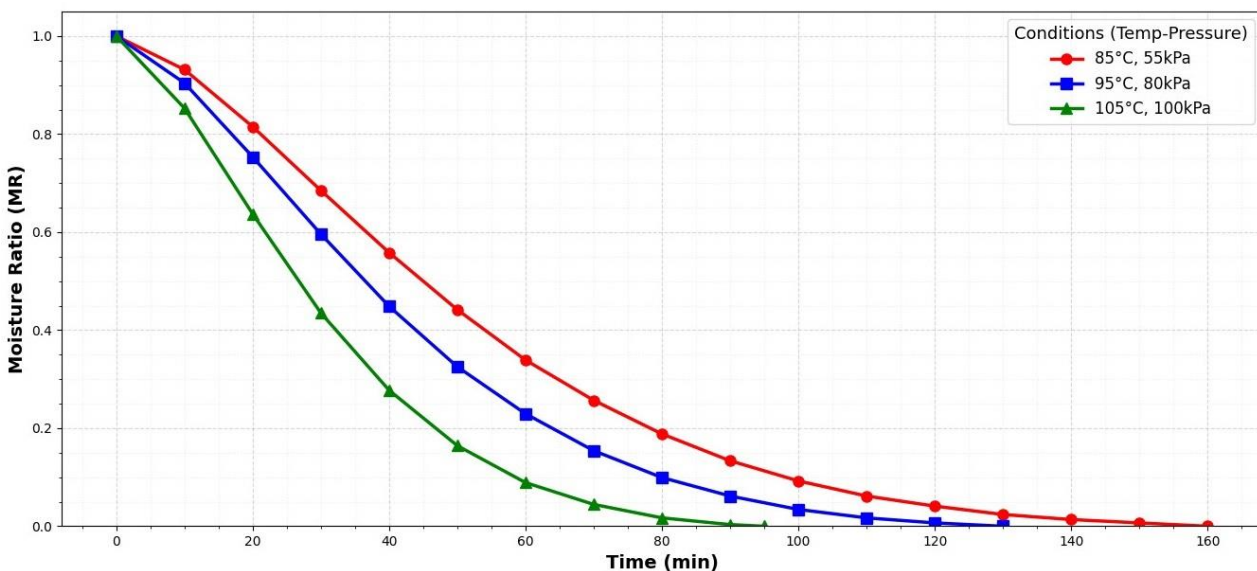
این رفتار ناشی از افزایش نرخ انتقال حرارت و جرم در شرایط دمایی و فشاری بالاتر است؛ به این صورت که میدان مایکروویو انرژی گرمایی بیشتری به نمونه منتقل کرده و فشار کاهش یافته خلأ نقطه جوش آب را پایین آورده و تبخیر را تسریع می‌کند.



شکل ۳- منحنی خشک شدن برای هندسه ورقه‌ای ساده ۲ میلی‌متر تحت سطوح مختلف دما-فشار

هندسه ورقه‌ای ساده افزایش یافت و بالاترین سطح دما-فشار سریع‌ترین روند را ایجاد کرد. ساختار مشبک با کوتاه کردن مسیر خروج رطوبت و افزایش سطح تبخیر، کارایی فرآیند را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد.

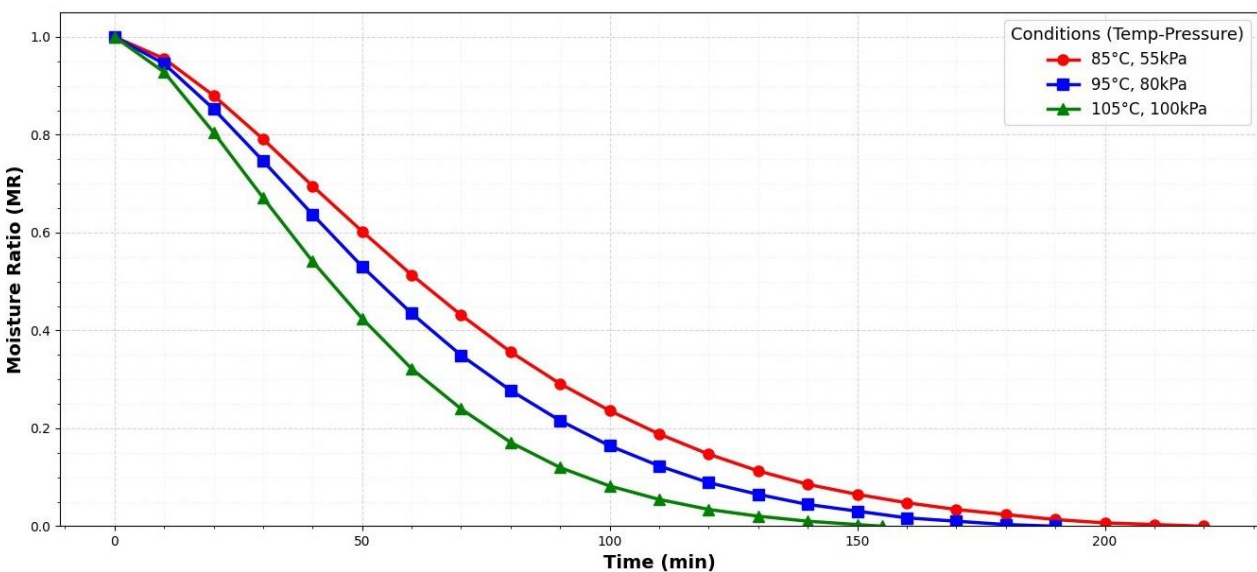
به دلیل ساختار مشبک که سطح تماس بیشتری با محیط خشک‌کن فراهم می‌کند، انتقال رطوبت در این نمونه‌ها سریع‌تر صورت گرفت. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، سرعت خشک‌شدن در تمامی شرایط دمایی-فشاری نسبت به



شکل ۴- منحنی‌های خشک‌شدن هندسه مشبک ۲ میلی‌متر

میدان خلأ، روند خشک‌شدن کندتر صورت گرفت (شکل ۵). کاهش نسبت سطح به حجم، انتقال همزمان حرارت و جرم را محدود کرده و موجب طولانی شدن زمان خشک‌شدن می‌شود.

نمونه‌های با هندسه مکعبی که دارای حجم بیشتر و نسبت سطح به حجم کمتری هستند، به زمان بیشتری برای رسیدن به رطوبت نهایی نیاز داشتند. اثر سطوح مختلف دما فشار در این هندسه نیز مشهود بود، اما به دلیل کاهش سطح در معرض تابش و



شکل ۵- منحنی‌های خشک‌شدن هندسه مکعبی

از خود نشان دادند. همچنین افزایش دما و فشار در تمامی هندسه‌ها به دلیل تسریع در نرخ انتقال حرارت و جرم، موجب بهبود کارایی فرآیند خشک‌شدن شد.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که هندسه نمونه و شرایط عملیاتی (دما و فشار) تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر سینتیک خشک‌شدن دارند. نمونه‌های نازک‌تر و مشبک به دلیل دارا بودن مسیر کوتاه‌تر برای خروج رطوبت و سطح تماس بیشتر، عملکرد بهتری

هندسه نمونه نقش مهمی در کاهش یا افزایش زمان خشک شدن دارد و ترکیب مناسب هندسه و شرایط فرآیندی می تواند بازده فرآیند را بهینه کند.

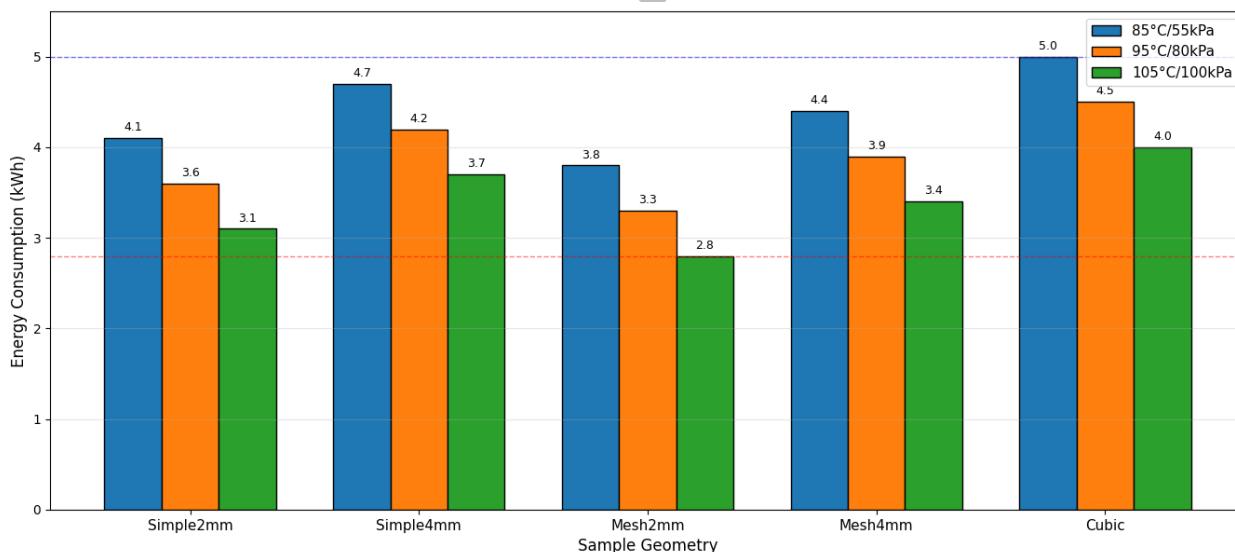
زمان لازم برای رسیدن به رطوبت نهایی برای تمامی هندسه ها و شرایط فرآیندی در جدول ۵ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، هندسه مشبک کمترین زمان خشک شدن و مکعبی بیشترین زمان را نشان داد. این نتایج نشان می دهد که

جدول ۵- زمان خشک شدن نهایی برای هندسه ها و شرایط دما-فشار مختلف

هندسه / شرایط	۸۵ درجه سانتی گراد -۵۵ (کیلوپاسکال دقیقه)	۹۵ درجه سانتی گراد -۸۰ (کیلوپاسکال دقیقه)	۱۰۵ درجه سانتی گراد -۱۰۰ (کیلوپاسکال دقیقه)
ورق ساده با ضخامت ۲ میلی متر	۱۷۵	۱۴۵	۱۱۰
ورق ساده با ضخامت ۴ میلی متر	۲۰۵	۱۷۵	۱۴۰
ورق مشبک با ضخامت ۲ میلی متر	۱۶۰	۱۳۰	۹۵
ورق مشبک با ضخامت ۴ میلی متر	۱۹۰	۱۶۰	۱۲۵
هندسه مکعبی	۲۲۰	۱۹۰	۱۵۵

خشک شدن کندتری دارد. در خشک کردن مایکروویو-خلأ نیز هندسه با تأثیر بر توزیع انرژی و مهاجرت بخار، نقش مهمی در سینتیک خشک شدن ایفا می کند. نتایج شکل ۶ نیز نشان می دهد در هر پنج هندسه، با افزایش دما و فشار عملیاتی، مصرف انرژی کل کاهش می یابد. از آنجا که توان ویژه در همه آزمایش ها ثابت بوده، مصرف انرژی متناسب با زمان فرایند است؛ بنابراین هر عاملی که زمان خشک شدن را کاهش دهد، مصرف انرژی را نیز کم می کند.

در چارچوب قانون دوم فیک، هندسه برش با تغییر طول مسیر نفوذ و مقاومت انتقال جرم، زمان خشک شدن را کنترل می کند. نتایج نشان داد هندسه مشبک ۲ میلی متری کمترین زمان خشک شدن (۹۵ تا ۱۶۰ دقیقه) و نمونه مکعبی بیشترین زمان (۱۵۵ تا ۲۲۰ دقیقه) را دارد. این تفاوت ناشی از نسبت سطح به حجم بیشتر، مسیر نفوذ کوتاه تر و مقاومت داخلی کمتر در نمونه های مشبک است. در مقابل، هندسه مکعبی به دلیل سطح تبادل کمتر و حجم بیشتر،



شکل ۶- مقایسه مصرف انرژی در خشک کردن سیب برای پنج هندسه مختلف تحت سه شرایط دمایی فشاری. داده ها نشان می دهند که هندسه مشبک ۲ میلی متری در شرایط دمایی ۱۰۵ درجه سانتی گراد کمترین مصرف انرژی (۲.۸ کیلووات ساعت) را دارد.

برای مکعبی، ۳.۴ برای مشبک ۲ میلی متر، ۳.۹ برای ورقه ۲ میلی متر، ۴.۲ برای مشبک ۴ میلی متر و ۴.۶ کیلووات ساعت برای ورقه ۴ میلی متر است. در سطح بالا ۱۰۵ درجه سانتی گراد و ۱۰۰ کیلوپاسکال نیز کمینه انرژی باز هم برای مشبک ۲ میلی متر با ۲.۸ و بیشینه برای مکعبی با ۴.۶ کیلووات ساعت دیده می شود و ورقه

در سطح پایین ۸۵ درجه سانتی گراد و ۵۵ کیلوپاسکال بیشترین انرژی مربوط به نمونه مکعبی با ۶.۴ کیلووات ساعت و کمترین مربوط به مشبک ۲ میلی متر با ۴.۲ کیلووات ساعت است و ورقه ۲ میلی متر با ۴.۸، مشبک ۴ میلی متر با ۵.۱ و ورقه ۴ میلی متر با ۵.۵ کیلووات ساعت بین این دو قرار می گیرند. در سطح میانی ۹۵ درجه سانتی گراد و ۸۰ کیلوپاسکال همین روند حفظ می شود و مقادیر به ترتیب ۵.۴

توان ثابت انرژی کل افزایش می یابد. اختلاف ورقه ۲ میلی متر با مشبک هم ضخامت نیز نشان می دهد نبود کانال های خروج بخار به تنهایی می تواند مصرف انرژی را به طور محسوسی افزایش دهد.

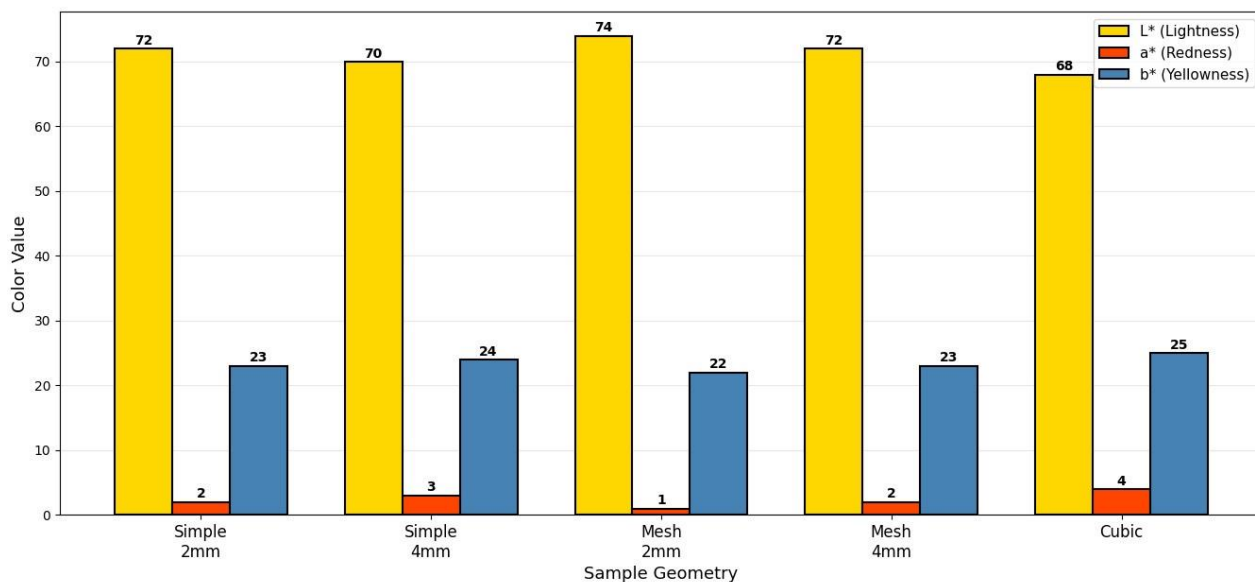
در نهایت بهترین حالت از نظر انرژی مشبک ۲ میلی متر در ۱۰۵ درجه سانتی گراد و ۱۰۰ کیلوپاسکال با ۲.۸ کیلووات ساعت و بدترین حالت نمونه مکعبی در ۸۵ درجه سانتی گراد و ۵۵ کیلوپاسکال با ۶.۴ کیلووات ساعت است و این یعنی با انتخاب درست هندسه و شرایط عملیاتی می توان مصرف انرژی را بیش از ۵۶ درصد کاهش داد.

علت اصلی این تفاوت، زمان ماند حرارتی کمتر در نمونه های مشبک است. در شرایط ۱۰۵ درجه سانتی گراد و ۱۰۰ کیلوپاسکال، زمان خشک شدن مشبک ۲ میلی متری ۹۵ دقیقه است اما برای مکعبی ۱۵۵ دقیقه؛ بنابراین واکنش های قهوه ای شدن و تخریب رنگدانه ها در مشبک کمتر رخ می دهد. همچنین وجود هفت سوراخ ۳ میلی متری در مشبک، خروج سریع بخار را ممکن می کند، از تجمع رطوبت و ایجاد نقاط داغ جلوگیری می شود و توزیع انرژی میکروویو یکنواخت تر می گردد؛ در نتیجه افت روشنایی و افزایش قرمزی و زردی محدود می شود.

۲ میلی متر ۳.۲، مشبک ۴ میلی متر ۳.۵ و ورقه ۴ میلی متر ۳.۸ کیلووات ساعت مصرف می کنند.

از نظر علمی، کم مصرف بودن مشبک ۲ میلی متر ناشی از کاهش مقاومت غالب فرایند است. این هندسه نسبت سطح به حجم بالاتری دارد، طول مسیر خروج رطوبت را کوتاه می کند و مهم تر از همه با وجود ۷ سوراخ ۳ میلی متری مسیرهای کم افت برای تخلیه بخار ایجاد می شود. در نتیجه بخار تولید شده در گرمایش حجمی مایکروویو در بافت حبس نمی شود، گرادپان های فشار و رطوبت داخلی کمتر می شود و سهم بیشتری از انرژی جذب شده واقعا صرف تبخیر موثر می گردد. در مقابل، در نمونه مکعبی به دلیل سطح تماس کم و مسیر طولانی انتقال رطوبت از مرکز تا سطح، انتقال جرم داخلی گلوگاه می شود، زمان فرایند بالا می رود و در

نتایج شاخص های رنگ نشان داد نمونه مشبک ۲ میلی متری بهترین حفظ رنگ را دارد؛ روشنایی آن ۷۴ است و کمترین قرمزی و زردی را به ترتیب با مقادیر ۱ و ۲۲ نشان می دهد. در مقابل، نمونه مکعبی با روشنایی ۶۸ و بیشترین قرمزی و زردی یعنی ۴ و ۲۵، بیشترین افت رنگ را تجربه کرده است. سایر هندسه ها بین این دو قرار می گیرند و ترتیب تغییر رنگ کل هم نشان می دهد هرچه نمونه نازک تر و مشبک تر باشد، تغییرات رنگی کمتر است.



شکل ۷- پارامترهای رنگی نمونه های خشک شده سیب در هندسه های مختلف

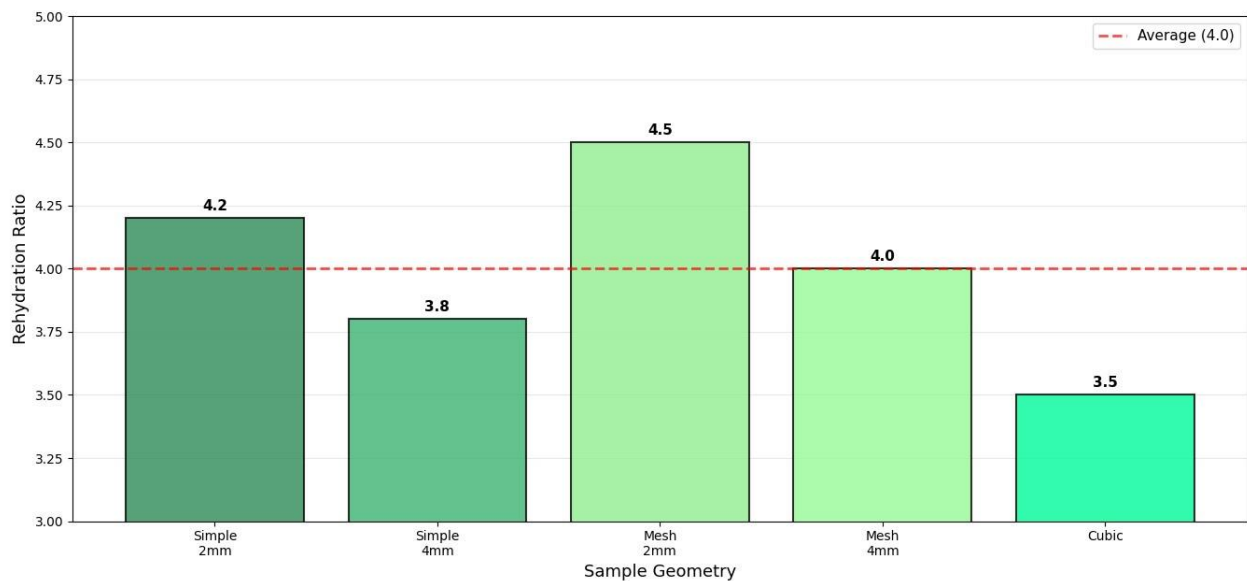
در مجموع، بهترین کیفیت رنگ متعلق به مشبک ۲ میلی متری در بالاترین دما و فشار و ضعیف ترین کیفیت متعلق به نمونه مکعبی در پایین ترین دما و فشار است.

مطابق شکل ۸، بیشترین نسبت بازجذب آب مربوط به هندسه مشبک ۲ میلی متری با مقدار ۴.۵ و کمترین مقدار مربوط به نمونه مکعبی با مقدار ۳.۵ بود

اثر دما و فشار هم روشن است؛ در مشبک ۲ میلی متری با افزایش شرایط از ۸۵ درجه سانتی گراد و ۵۵ کیلوپاسکال به ۱۰۵ درجه سانتی گراد و ۱۰۰ کیلوپاسکال، تغییر رنگ کل از ۴.۸ به ۳.۵ کاهش می یابد، چون زمان خشک شدن از ۱۶۰ به ۹۵ دقیقه کم می شود و فشار بالاتر از خشک شدن زودهنگام سطح جلوگیری کرده و تبخیر را یکنواخت تر می کند.

که اختلافی در حدود ۲۹ درصد را نشان می‌دهد. این موضوع بیانگر تأثیر مستقیم هندسه بر حفظ ریزساختار محصول در طول فرآیند خشک‌شدن است.

در هندسه مشبک، به دلیل افزایش نسبت سطح به حجم و کاهش مقاومت انتقال جرم داخلی، بخار تولیدشده سریع‌تر از بافت خارج شده و زمان خشک‌شدن به ۹۵ دقیقه کاهش یافته است.



شکل ۸- ظرفیت بازجذب نمونه‌های خشک‌شده سیب در هندسه‌های مختلف

این امر از ایجاد گرادیان‌های شدید رطوبتی و تنش‌های ساختاری درون نمونه جلوگیری کرده و موجب حفظ شبکه مویرگی و تخلخل مؤثر محصول می‌شود. در مقابل، نمونه مکعبی با زمان خشک‌شدن ۱۵۵ دقیقه، به دلیل محدودیت نفوذ رطوبت و مقاومت بالاتر انتقال جرم، دچار جمع‌شدگی بیشتری شده و بخشی از منافذ مؤثر خود را از دست داده است. در نتیجه ضریب نفوذ آب در مرحله بازجذب کاهش یافته و ظرفیت جذب مجدد آب محدود می‌شود. بنابراین بهبود بازجذب هندسه‌های مشبک، پیامد کاهش مقاومت، حفظ تخلخل ساختار و کوتاه‌تر شدن زمان خشک‌شدن است.

نتایج تحلیل آماری شاخص واریانس دو طرفه و آزمون دانکن

نتایج تجزیه واریانس در جدول ۶ نشان داد اثر شکل هندسی و شرایط فرآیند (دما و فشار) بر همه شاخص‌های خروجی شامل زمان خشک‌شدن، مصرف انرژی ویژه، تغییرات رنگ و نسبت بازجذب آب در سطح ۵ درصد معنادار است. این موضوع بیان می‌کند که هر دو عامل به‌طور مستقل بر سینتیک خشک‌شدن، بازده انرژی و کیفیت محصول اثرگذارند. در مقابل، اثر متقابل شکل هندسی و شرایط فرآیند بر هیچ‌یک از شاخص‌ها معنادار نبود.

جدول ۶- تجزیه واریانس شاخص‌های فرآیند خشک‌کردن سیب

منبع تغییرات	درجه آزادی	زمان خشک‌شدن (P_value)	مصرف انرژی ویژه (P_value)	تغییرات رنگ (P_value)	نسبت بازجذب آب (P_value)
شکل هندسی	۴	۰.۰۱۲	۰.۰۴۵	۰.۰۱۸	۰.۰۳۲
شرایط فرآیند	۲	۰.۰۰۸	۰.۰۱۱	۰.۰۰۶	۰.۰۱۲
اثر متقابل	۸	۰.۰۹۴	۰.۰۱۱۲	۰.۰۸۲	۰.۱۵۶

بنابراین تأثیر هندسه بر عملکرد خشک‌کردن و کیفیت، به سطح دما و فشار وابسته نیست و این دو عامل بدون تداخل مؤثر عمل می‌کنند. از نظر مکانیزمی نیز این نتیجه قابل انتظار است؛ زیرا در مایکروویو گرمایش حجمی باعث می‌شود الگوی گرمایش در هندسه‌های مشابه، در سطوح مختلف دما و فشار عمدتاً یکسان بماند و تنها شدت آن تغییر کند. در نتیجه، می‌توان دما-فشار و هندسه را جداگانه برای بهینه‌سازی انرژی یا کیفیت تنظیم کرد.

نتایج آزمون چنددامنه‌ای دانکن در جدول ۷، برای شاخص زمان خشک‌شدن نشان داد دو نمونه مشبک ۲ میلی‌متر (۱۲۸.۳ دقیقه) و ورقه‌ای ۲ میلی‌متر (۱۳۷.۰ دقیقه) هر دو در گروه a قرار دارند؛ یعنی در سطح ۵ درصد اختلاف معناداری بین آن‌ها وجود ندارد. در مقابل، مشبک ۴ میلی‌متر (۱۵۸.۲ دقیقه) در گروه b، ورقه‌ای ۴ میلی‌متر (۱۶۸.۰ دقیقه) در گروه c و مکعبی (۱۸۸.۳ دقیقه) در گروه d قرار گرفتند و اختلاف آن‌ها با هم و با گروه اول معنادار بود.

در مصرف انرژی ویژه نیز مشبک ۲ میلی‌متر (۰.۱۰) و ورقه‌ای ۲ میلی‌متر (۰.۱۱) در گروه **a** و بدون اختلاف معنادار بودند. مشبک ۴ میلی‌متر (۰.۱۲) و ورقه‌ای ۴ میلی‌متر (۰.۱۳) در گروه **b** قرار گرفتند و نمونه مکعبی (۰.۱۵) به‌تنهایی در گروه **c** قرار داشت.

برای تغییرات رنگ، فقط مشبک ۲ میلی‌متر (۳.۵) در گروه **a** قرار گرفت و کمترین تغییر رنگ را نشان داد. ورقه‌ای ۲ میلی‌متر (۴.۰) و مشبک ۴ میلی‌متر

(۴.۳) در گروه **b** بودند و تفاوت معناداری با هم نداشتند. سپس ورقه‌ای ۴ میلی‌متر (۴.۷) در گروه **c** و مکعبی (۵.۲) در گروه **d** قرار گرفت.

در شاخص نسبت بازجذب آب، هر پنج هندسه در گروه‌های کاملاً جدا دسته‌بندی شدند؛ به‌طوری که مشبک ۲ میلی‌متر با مقدار ۴.۵ بهترین وضعیت (بالاترین گروه) و مکعبی با مقدار ۲.۶ ضعیف‌ترین وضعیت (پایین‌ترین گروه) را داشت.

جدول ۷- تست دانکن برای هندسه نسبت بازجذب آب، تغییرات رنگ، مصرف انرژی ویژه و زمان خشک‌شدن

نسبت بازجذب آب (RR)	تغییرات رنگ (ΔE)	مصرف انرژی ویژه (kWh/kg water)	زمان خشک‌کردن (min)	نوع هندسه
a	a	a	a	مشبک ۲ میلی‌متر
b	b	a	a	ورقه‌ای ۲ میلی‌متر
c	b	b	b	مشبک ۴ میلی‌متر
d	c	b	c	ورقه‌ای ۴ میلی‌متر
e	d	c	d	مکعبی

در مجموع، در بیشتر شاخص‌ها مشبک ۲ میلی‌متر بهترین عملکرد و هندسه مکعبی ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داد. این الگوی گروه‌بندی بیانگر نقش مهم نسبت سطح به حجم و همچنین مسیرهای خروج بخار در سرعت خشک‌شدن و کیفیت نهایی محصول است. همچنین، نتایج آزمون چنددامنه‌ای دانکن برای سه سطح مختلف دما-

فشار، مطابق جدول ۸، نشان داد که این سه تیمار در تمامی شاخص‌های مورد بررسی شامل زمان خشک‌شدن، مصرف انرژی ویژه، تغییرات رنگ و نسبت بازجذب آب، در گروه‌های آماری متفاوتی قرار دارند و اختلاف میان آن‌ها در سطح ۰.۰۵ معنادار است.

جدول ۸- نتایج آزمون چنددامنه‌ای دانکن برای مقایسه شرایط مختلف دما-فشار

نسبت بازجذب آب (RR)	تغییرات رنگ (ΔE)	مصرف انرژی ویژه (kWh/kg water)	زمان خشک‌کردن (min)	نوع هندسه
a	a	a	a	۸۵ سانتی‌گراد فشار ۵۵ کیلوپاسکال
b	b	b	b	۹۵ سانتی‌گراد فشار ۸۰ کیلوپاسکال
c	c	c	c	۱۰۵ سانتی‌گراد فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال

به‌طوری که با افزایش دما و فشار از ۸۵ درجه سانتی‌گراد و ۵۵ کیلوپاسکال به ۹۵ درجه سانتی‌گراد و ۸۰ کیلوپاسکال و سپس به ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۰۰ کیلوپاسکال، زمان خشک‌شدن به‌صورت معناداری از ۱۹۲ به ۱۶۳ و سپس به ۱۲۸ دقیقه کاهش یافت. مصرف انرژی ویژه نیز به‌ترتیب از ۰.۱۳۵ به ۰.۱۱۵ و سپس به ۰.۰۹۵ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم آب کاهش پیدا کرد. همچنین، مقدار تغییرات رنگ از ۴.۹ به ۴.۲ و سپس به ۳.۵ رسید که بیانگر بهبود حفظ رنگ نمونه‌ها در سطوح بالاتر دما و فشار است. در مقابل، نسبت بازجذب آب روند افزایشی نشان داد و از ۳.۱ به ۳.۷ و سپس به ۴.۴ رسید. در مجموع، بالاترین سطح دما-فشار یعنی ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۰۰ کیلوپاسکال، از نظر همه شاخص‌های اندازه‌گیری شده بهترین عملکرد را به خود اختصاص داد.

نتیجه‌گیری

بهترین ترکیب فرایندی از نظر کاربرد صنعتی، استفاده از هندسه مشبک با ضخامت ۲ میلی‌متر در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال است. این ترکیب بهترین عملکرد را در همه شاخص‌های اصلی نشان داده است؛ یعنی کوتاه‌ترین زمان خشک‌شدن برابر با ۹۵ دقیقه، کمترین مصرف انرژی برابر با ۲.۸ کیلووات‌ساعت، بیشترین روشنایی رنگ برابر با ۷۴، کمترین تغییر رنگ برابر با ۳.۵ و

بیشترین نسبت بازجذب آب برابر با ۴.۵ است. بنابراین برای تولید صنعتی سبب خشک به روش میکروویو-خلأ، استفاده از برش مشبک ۲ میلی‌متری همراه با بالاترین دمای قابل استفاده در فرایند و فشاری نزدیک به فشار اتمسفر توصیه می‌شود.

۱. از دیدگاه طراحی فرایند در مقیاس صنعتی، انتخاب هندسه‌ی مشبک ۲ میلی‌متری به دلیل داشتن هفت سوراخ ۳ میلی‌متری، نسبت سطح به حجم را حدود ۴۰٪ نسبت به قطعه‌ی مکعبی افزایش می‌دهد و مسیر خروج بخار آب را کوتاه‌تر می‌کند. نتیجه‌ی این ویژگی، کاهش زمان خشک‌شدن از ۱۵۵ دقیقه به ۹۵ دقیقه در شرایط فرایندی ۱۰۵ درجه و ۱۰۰ کیلوپاسکال است. در مقیاس خط تولید، این کاهش ۶۰ دقیقه‌ای به معنای افزایش ۳۷ تا ۴۰ درصدی است.

۲. از نظر مهندسی فرایند، افزایش هم‌زمان دما از ۸۵ به ۱۰۵ درجه و فشار از ۵۵ به ۱۰۰ کیلوپاسکال، زمان خشک‌شدن نمونه‌ی مشبک ۲ میلی‌متری را از ۱۶۰ به ۹۵ دقیقه کاهش می‌دهد که بهبودی معادل ۴۰ درصد است. در عمل صنعتی، این کاهش زمان به‌طور مستقیم باعث افزایش تناژ خروجی در هر شیفت، حدود ۱.۶ برابر، و کاهش ساعات کارکرد دستگاه می‌شود؛ در نتیجه هزینه‌های نگهداری و مصرف برق نیز کمتر خواهد شد.

۵. از منظر عملکرد نهایی محصول در بازار، بیشترین ظرفیت بازجذب آب، حدود ۴.۵ گرم آب بر گرم ماده‌ی خشک، مربوط به نمونه‌ی مشبک ۲ میلی‌متری است و کمترین مقدار، حدود ۲.۵، به نمونه‌ی مکعبی تعلق دارد. این تفاوت ۸۰ درصدی از نظر صنعتی بسیار مهم است، زیرا مستقیماً بر بافت محصول پس از بازآمیختن، مانند سوپ‌های آماده یا اسنک‌های بازجذبی، اثر می‌گذارد. علت اصلی این موضوع آن است که در هندسه‌ی مشبک، به‌دلیل خروج سریع بخار از سوراخ‌ها، ساختار متخلخل و دیواره‌های سلولی کمترین آسیب را می‌بینند و مویرگ‌ها برای جذب مجدد آب باز می‌مانند. در نتیجه، محصول نهایی نه‌تنها امتیاز بالاتری در آزمون‌های حسی کسب می‌کند، بلکه ارزش افزوده‌ی آن در بازارهای اروپایی نیز تا ۲۰٪ بیشتر قابل عرضه است

۶. تحلیل هم‌زمان پارامترهای فرایند نشان می‌دهد که هندسه و شرایط عملیاتی اثر تعاملی و معناداری بر زمان خشک‌شدن، مصرف انرژی و بازجذب آب دارند. در این میان، بهترین ترکیب صنعتی یعنی هندسه‌ی مشبک ۲ میلی‌متری در دمای ۱۰۵ درجه و فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال، از هر سه جنبه عملکرد بهتری دارد. این ترکیب باعث کاهش ۳۹ درصدی زمان سیکل نسبت به نمونه‌ی مکعبی می‌شود، مصرف انرژی ویژه را ۵۶ درصد کاهش می‌دهد و بازجذب آب را نیز تا ۸۰ درصد بهبود می‌بخشد.

ویژگی‌های کیفی محصول	Product quality characteristics	ویژگی‌های کیفی فرآورده
نرخ خشک شدن	Drying rate	سرعت خشک شدن
تغییر رنگ	Color change	دگرگونی رنگ
روشنایی	Brightness	درخشندگی
نسبت بازجذب آب	Rehydration ratio	نسبت بازجذب آب
برش مشبک	Latticed slice	برش شبکه‌ای
برش ورقه‌ای	Sliced cut	برش لایه‌ای
برش مکعبی	Cubic cut	برش مکعبی
دوره نرخ ثابت	Constant rate period	دوره سرعت ثابت
دوره نرخ	Falling rate period	دوره سرعت کاهشی
برونینگ آنزیمی	Enzymatic browning	قهوه‌ای شدن آنزیمی
گرمایش حجمی	Volumetric heating	گرمایش حجمی
خشک‌سازی	Drying	خشک کردن
رطوبت اولیه	Initial moisture	رطوبت آغازین
ترکیبات فنولیک	Phenolic compounds	ترکیبات فنولی

۳. کمترین مصرف انرژی مربوط به مشبک ۲ میلی‌متری در بالاترین دما و فشار است و بیشترین مصرف انرژی در نمونه مکعبی در پایین‌ترین شرایط دیده می‌شود. در عمل، انتخاب هندسه مشبک به جای مکعبی و استفاده از دما و فشار بالاتر می‌تواند مصرف انرژی را تا ۵۶ درصد کاهش دهد، چون مقاومت در برابر خروج رطوبت کمتر می‌شود و انرژی کمتری صرف گرم کردن بی‌فایده بافت می‌شود.

۴. از نظر کنترل کیفیت در تولید صنعتی، بهترین حفظ شاخص‌های رنگی، یعنی روشنایی بالا و کمترین ΔE ، در نمونه‌ی مشبک ۲ میلی‌متری و در شدیدترین شرایط فرایند، یعنی ۱۰۵ درجه و ۱۰۰ کیلوپاسکال، مشاهده شد. این نمونه در مقایسه با نمونه‌ی مکعبی که در شرایط ضعیف خشک شده است، بیش از ۳۰٪ روشنایی بیشتری را حفظ می‌کند و تغییر رنگ کلی آن تقریباً نصف است. در عمل، کوتاه بودن زمان فرایند و توزیع یکنواخت میدان مایکروویو در هندسه‌ی مشبک، از تجمع حرارت در نقاط بحرانی و وقوع واکنش‌های قهوه‌ای شدن آنزیمی و غیرآنزیمی جلوگیری می‌کند. بنابراین، در خط تولید صنعتی، درصد محصولاتی که به دلیل تیرگی از درجه‌ی صادراتی خارج می‌شوند، از حدود ۱۸٪ در هندسه‌ی مکعبی به کمتر از ۶٪ در هندسه‌ی مشبک کاهش می‌یابد.

فهرست علائم

تعریف	واحد	علائم انگلیسی
نسبت رطوبت	-	MR
زمان خشک شدن	min	t
دما	°C	T
فشار خلأ	kPa	P
تغییر رنگ کل	-	ΔE
مصرف انرژی ویژه	kJ/kg	SEC
انرژی مصرفی کل	kJ	E
نسبت بازجذب آب	-	RR
شاخص روشنایی	-	L*

واژه نامه

واژه پیشنهادی نویسنده	معادل انگلیسی	واژه پیشنهادی ویراستار
خشک‌کن مایکروویو-خلأ	Microwave-vacuum dryer	خشک‌کن مایکروویو تحت خلأ
سینتیک انتقال جرم	Mass transfer kinetics	سینتیک جابه جایی جرم
مصرف انرژی	Energy consumption	مصرف انرژی

مراجع

- [2] D. A. Hyson, "A comprehensive review of apples and apple components and their relationship to human health," *Advances in Nutrition*, vol. 2, no. 5, pp. 408–420, 2011.
- [3] P. J. Fellows, *Food Processing Technology: Principles and Practice*, 4th ed. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2017.
- [4] A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying*, 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015.
- [5] A. Vega-Gálvez et al., "Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties of apple slices," *Food Chemistry*, vol. 110, no. 2, pp. 441–446, 2008.
- [6] P. P. Lewicki, "Design of hot air drying for better foods," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 17, no. 4, pp. 153–163, 2006.
- [7] M. Maskan, "Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air drying," *Journal of Food Engineering*, vol. 48, no. 2, pp. 169–175, 2001.
- [8] C. Ratti, "Hot air and freeze-drying of high-value foods," *Journal of Food Engineering*, vol. 49, no. 4, pp. 311–319, 2001.
- [9] C. Ratti, "Freeze drying for food preservation," *Drying Technology*, vol. 27, no. 6, pp. 81–95, 2009.
- [10] S. Gunasekaran, "Pulsed microwave–vacuum drying of food materials," *Drying Technology*, vol. 17, no. 6, pp. 1205–1228, 1999.
- [11] S. Devahastin, *Advanced Food Drying Technologies*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.
- [12] Y. Wang and Y. Xi, "Microwave vacuum drying of foods: principles and applications," *Food Engineering Reviews*, vol. 6, no. 2, pp. 101–117, 2014.
- [13] A. Figiel, "Drying kinetics and quality of vacuum–microwave dehydrated garlic cloves and slices," *Journal of Food Engineering*, vol. 94, no. 1, pp. 98–104, 2009.
- [14] M. Zielińska and M. Markowski, "Color characteristics of carrots dried by microwave–vacuum method," *Drying Technology*, vol. 28, no. 3, pp. 347–353, 2010.
- [15] M. Zhang et al., "Recent developments in microwave-assisted drying of vegetables, fruits and aquatic products," *Drying Technology*, vol. 24, no. 10, pp. 1259–1277, 2006.
- [16] X. Song et al., "Effect of microwave vacuum drying on bioactive compounds of fruits," *Food Chemistry*, vol. 242, pp. 42–50, 2018.
- [17] İ. Doymaz, "Drying kinetics of apple slices," *Journal of Food Engineering*, vol. 59, no. 3, pp. 411–417, 2003.
- [18] T. Kudra and A. S. Mujumdar, *Advanced Drying Technologies*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2009.
- [19] Z. Pan, D.-W. Sun, and C. Bonn, "Microwave-assisted drying of food materials: A review," *Journal of Food Science*, vol. 73, no. 7, pp. R123–R131, 2008.
- [20] Á. Calín-Sánchez et al., "Microwave vacuum drying of fruits: A review," *Food and Bioprocess Technology*, vol. 7, no. 2, pp. 251–269, 2014.
- [21] Y. Soysal, "Energy efficiency of microwave drying systems," *Journal of Food Engineering*, vol. 64, no. 3, pp. 97–104, 2004.
- [22] T. Defraeye, "Impact of size and shape of fresh-cut fruit on the drying time and fruit quality," *Journal of Food Engineering*, vol. 200, pp. 1–10, 2017.
- [23] G. R. Askari, Z. Emam-Djomeh, and S. M. A. Mousavi, "Effect of complementary microwave drying on three shapes of mango slices," *Drying Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 345–352, 2009.
- [24] Y.-Y. Pu and D.-W. Sun, "Prediction of moisture content uniformity of microwave-vacuum dried mango slices as affected by different shapes using NIR hyperspectral imaging," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 33, pp. 268–278, 2016.
- [25] N. Therdthai and W. Zhou, "Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia*)," *Journal of Food Engineering*, vol. 91, no. 3, pp. 482–489, 2009.
- [26] W. Guo et al., "Effects of microwave vacuum drying on drying characteristics, bioactive components, antioxidant capacity, and starch structure of germinated red adzuki beans," *Food Chemistry X*, vol. 31, Art. no. 103185, 2025.
- [27] S. Zhao et al., "Evaluation of drying kinetics, physical properties, bioactive compounds, antioxidant activity and microstructure of fruits dried by microwave-assisted hot air drying," *Journal of Food Engineering*, vol. 357, Art. no. 812711, 2023.
- [28] M. Kaveh et al., "Comparative evaluation of greenhouse gas emissions and specific energy consumption of different drying techniques in pear slices," *European Food Research and Technology*, vol. 249, pp. 3027–3041, 2023.
- [29] O. Taşkın et al., "Intermittent microwave–vacuum drying effects on pears," *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, vol. 69, no. 4, pp. 101–108, 2019.
- [30] A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying*, 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.
- [31] D. R. Bruce, "Exposed-layer barley drying: Three models fitted to new data up to 150 °C," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 32, no. 4, pp. 337–348, 1985.
- [32] N. Izli and A. Polat, "Drying kinetics, colour and rehydration characteristics of apple slices," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 56, no. 8, pp. 3852–3862, 2019.
- [33] A. Aregba-Wolff, A. Oyegbami, and M. E. V. Axelos, "Low temperature convective drying of apple cubes," *Journal of Food Engineering*, vol. 40, no. 4, pp. 249–254, 1999.
- [34] G. E. Page, "Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers," M.S. thesis, Purdue University, West Lafayette, IN, USA, 1949.
- [35] R. S. Hunter and H. R. Harold, *The Measurement of Appearance*, 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley, 1987.
- [36] N. Izli and A. Polat, "Drying kinetics, colour and rehydration characteristics of apple slices," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 56, no. 8, pp. 3852–3862, 2019.
- [37] Z. Cui, S. Xu, and D. Sun, "Microwave-vacuum drying kinetics of carrot slices," *Journal of Food Engineering*, vol. 85, no. 1, pp. 26–32, 2008.
- [38] C. Contreras, M. E. Martín-Esparza, A. Chiralt, and N. Martínez-Navarrete, "Influence of microwave application on the drying kinetics, color, and texture of apple and strawberry," *Drying Technology*, vol. 26, no. 10, pp. 1251–1260, 2008.