

Optimisation of Energy and Thermal Parameters in the Drying Process of Modified Starch with Cold Plasma Pretreatment

A. Taghavi¹, A. Ranjbar Nedamani^{1*} , A. Motevali¹ , S. J. Hashemi¹ 

1- Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran

(*- Corresponding Author Email: a.ranjbar@sanru.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2025.94207.1405>

Introduction

Drying is one of the important steps in starch modification, after applying the modification treatments. Starch is obtained from the seeds and fruits of various plants and used in a dried state to achieve a longer shelf life, potentially saving on transportation and storage costs for commercial purposes. Drying is the final necessary step in starch modification, often performed using a conventional oven, a freeze dryer, or an organic solvent (typically ethanol or acetone). In food drying processes, energy consumption is considered a key parameter. The method used to dry pre-gelatinised starch is crucial, as drying is one of the most important steps in the production of modified starch powder. On the other hand, considering the global tendency to use renewable energies, especially in food drying, to reduce thermal damage, energy consumption and drying time, it is of great importance to investigate drying with reflectance window systems, which are environmentally friendly, have high efficiency and cause less damage to the food product components. The effect of drying modified starch with cold plasma by a reflectance window system at a temperature of 50 °C was investigated, and its results were compared with data from the traditional oven drying system.

Materials and Methods

Potato starch powder was obtained from Zamen Food Products Manufacturing Company, located in Mashhad Industrial City, Iran, in plastic packs. A laboratory-scale cold plasma generator device available at the Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources Growth Centre was used. This device consists of two main parts: the cold plasma generation section and the sample storage section. The device generated cold plasma through direct contact of the sample with the resulting ionised air. Cold plasma was applied to the sample produced by a plasma reactor with copper and steel electrodes at a voltage of 20 kV, a current of 3 mA, and a frequency of 50 Hz, using atmospheric air. A randomised complete factorial design was implemented with the factors of pre-gelatinisation temperature (55 and 60 °C), cold plasma treatment time (0, 15, and 30 min), and starch drying temperature in the oven (60, 70, and 80 °C). To prepare pre-gelatinised samples, 10 g of starch was dissolved in 90 g of distilled water to prepare a 10% (w/w) solution. The energy analysis included calculations of drying efficiency, energy efficiency, thermal efficiency, and specific heat consumption. The resulting data were optimized using Design-Expert software.

Results and Discussion

The results showed that the pre-gelatinisation temperature had a significant effect on all the studied parameters (energy, drying, and temperature efficiency), with a confidence level of $p < 0.05$. Drying temperature did not significantly affect energy efficiency, but it had a significant impact on both drying efficiency and temperature efficiency. Plasma treatment had a substantial effect on energy efficiency and drying efficiency, but no significant effect was observed on temperature efficiency. Based on regression models, the linear model has the best fit to the experimental data and was able to accurately predict the responses, which indicates the importance of the factors under study in process optimisation. Based on optimisation analysis, the optimal conditions indicate a temperature of 60 °C for pre-gelatinisation, 70 °C for oven-drying, and 30 min for cold plasma treatment time. This combination results in maximum efficiency and reduced energy consumption.

Conclusion

This analysis shows that the studied temperature changes and different treatments have distinct effects on drying processes and energy consumption, which can be considered in optimising these processes. The results of this research can help improve starch production processes and increase their efficiency in related industries. This

research simultaneously investigates two new methods for modifying and drying starch, which can result in practical improvements to starch quality.

Funding Sources: This research was funded by the Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University in the form of a Master's thesis with registration number 6490/1403/D and registration date 16/9/2024 from the research budget related to the thesis grant.

Conflict of Interest: No conflict of interest has been declared by the authors.

Acknowledgements: We would like to thank Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University for their financial and moral support in conducting this research.

Keywords: Cold Plasma, Drying, Energy Consumption, Starch Modification

بهینه‌سازی فراسنجه‌های انرژی و حرارتی در فرآیند خشک‌کردن نشاسته اصلاح‌شده با پیش‌تیمار

پلاسمای سرد

علی تقوی^۱، آزاده رنجبر ندامانی^{۱*}، علی متولی^۱، سید جعفر هاشمی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸

چکیده

یکی از مراحل مهم اصلاح نشاسته، بعد از اعمال تیمارهای اصلاحی، خشک‌کردن آن است. در فرآیندهای خشک‌کردن مواد غذایی، مصرف انرژی به‌عنوان یکی از فراسنجه‌های کلیدی و مهم موردتوجه قرار می‌گیرند. در این مطالعه اثر تیمارهای مختلف اصلاح نشاسته بر فراسنجه‌های انرژی و حرارتی فرآیند خشک‌کردن آن بررسی شد. پلاسمای سرد با استفاده از یک راکتور پلاسما با الکترودهایی از جنس مس و فولاد، در ولتاژ ۲۰ کیلوولت، جریان ۳ میلی‌آمپر و بسامد ۵۰ هرتز و با بهره‌گیری از هوای اتمسفر تولیدشده و بر روی نمونه اعمال شد. در تهیه نمونه‌های نشاسته، آزمایش چندعامله در قالب طرح کاملاً تصادفی با عوامل دمایی پیش‌ژلاتینه (۵۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد)، زمان تیمار با پلاسمای سرد (۳۰، ۱۵ و ۰ دقیقه)، و دمایی خشک‌کردن نشاسته در آن (۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد) اجرا شد. محاسبه فراسنجه‌های انرژی و حرارتی در خشک‌کن جریان هوای گرم، بازده خشک‌شدن و انرژی حرارتی و گرمای مخصوص مصرفی به‌عنوان پاسخ‌ها محاسبه و بهینه‌سازی نتایج توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت انجام شد. نتایج نشان داد دمایی پیش‌ژلاتینه با سطح اطمینان ($P < 0.05$) تأثیر قابل‌توجهی بر تمامی فراسنجه‌های موردنظر، یعنی بازده انرژی، بازده خشک‌کردن و بازده حرارتی داشت. در مقابل، دمایی خشک‌کردن تأثیر معناداری بر بازده انرژی نشان نداد؛ اما اثرات آن بر بازده خشک‌کردن و حرارتی معنادار ارزیابی شد. از سوی دیگر، تیمار پلاسما اثر کاملاً معناداری بر بازده انرژی و خشک‌کردن داشت؛ اما در مورد بازده حرارتی تأثیر قابل‌توجهی مشاهده نشد. این تحلیل نشان می‌دهد که تغییرات دمایی و تیمارهای مختلف بر فرآیندهای خشک‌کردن و مصرف انرژی اثرات تفکیک‌شده‌ای دارند که می‌تواند در بهینه‌سازی این فرآیندها موردتوجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: اصلاح نشاسته، پلاسمای سرد، خشک‌کردن، مصرف انرژی

مقدمه

نشاسته‌ای طبیعی به دلیل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاص خود، از جمله گرانبازی بالا در شرایط حرارت‌دهی، پایداری محدود در برابر حرارت، تنش مکانیکی و محیط‌های اسیدی، و همچنین حساسیت زیاد به فرآیندهای برگشت نشاسته^۲ و پس‌دادن آب^۳، کاربردهای صنعتی محدودی دارد. این خواص چالش‌هایی را در استفاده از نشاسته در فرآیندهای مختلف ایجاد کرده و نیاز به اصلاح آن را برای بهبود عملکرد در صنایع غذایی و غیرغذایی برجسته کرده است. با بهره‌گیری از روش‌های اصلاح فیزیکی، شیمیایی، آنزیمی و ژنتیکی، می‌توان ویژگی‌های مطلوب نشاسته را تقویت کرده و محدودیت‌های آن را کاهش داد که این امر نقش مهمی در گسترش کاربردهای صنعتی آن

دارد (Huber & BeMiller, 2010; Singh, Kaur, & McCarthy, 2007).

با تغییر ساختار فیزیکوشیمیایی پلیمرهای آمیلوز و آمیلوپکتین، اصلاح نشاسته موجب بهبود ویژگی‌های عملکردی آن می‌شود. این تغییرات نه تنها خواص مطلوب را افزایش می‌دهند، بلکه محدودیت‌های ذاتی نشاسته‌ای طبیعی را کاهش داده و امکان استفاده‌ی گسترده‌تر از آن را در صنایع غذایی و غیرغذایی فراهم می‌آورند (Ashogbon & Akintayo, 2014; Huber & BeMiller, 2010; Kaur, Ariffin, Bhat, & Karim, 2012). در صنعت غذا، نشاسته‌ای اصلاح‌شده نقش کلیدی در بهبود کیفیت و عملکرد محصولات ایفا می‌کند. این نوع نشاسته با ایجاد بافت مطلوب و افزایش غلظت، موجب ارتقای ساختار مواد غذایی می‌شود. همچنین، حفظ استحکام و شفافیت ژل، تولید پوشش‌های خوراکی، کاهش برگشت نشاسته و تثبیت

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری،

ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: a.ranjbar@sanru.ac.ir

شیمیایی، کاهش کیفیت، بازآب‌پذیری ضعیف، فروپاشی ساختاری، از دست رفتن مواد مغذی و مصرف بالای انرژی مواجه شوند (Bassey, Cheng, & Sun, 2021). برای ارتقای بیشتر عملکرد خشک کردن مواد غذایی، لازم است کاربرد فناوری‌های نوین در فرآیند خشک کردن مورد بررسی قرار گیرد (Bassey et al., 2021). به‌عنوان یک فناوری نوظهور در فرآیندهای خشک کردن، پلاسماي سرد (CP) به‌طور گسترده در کاربردهای ضدباکتریایی (Zhou et al., 2020)، اصلاح ترکیب‌بندی مواد غذایی و فیلم‌های بسته‌بندی (Bahrami et al., 2022; Taghavi, Nedamani, Motevali, & Hashemi, 2025; Wu, Cheng, K. Zhang et al., 2019)، تیمار آلاینده‌های غذایی (Katsigiannis, Bayliss, & Walsh, 2021) و موارد دیگر مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین گزارش‌های اخیر نشان می‌دهند که تیمار پلاسماي سرد بر روی محصولات غذایی قبل یا حین فرآیند خشک کردن، قابلیت قابل توجهی برای بهبود کارایی خشک کردن و ارتقای کیفیت دارد (Du, Yang, Yu, Xie, & Yao, 2022). پیش‌تیمار خشک کردن با پلاسماي سرد یک روش بسیار کارآمد از نظر مصرف انرژی است؛ زیرا با کاهش نیاز به انرژی، موجب صرفه‌جویی قابل توجهی در فرآیند خشک کردن می‌شود. علاوه بر این، این روش جایگزین پاک‌تر و مؤثرتری نسبت به پیش‌تیمارهای شیمیایی مانند استفاده از اسید و قلیا است. پلاسماي سرد معمولاً تنها به هوای محیط متکی است و نیازی به مواد شیمیایی یا آب اضافی ندارد که این ویژگی آن را به یک راهکار پایدار و دوستدار محیط‌زیست تبدیل می‌کند (Thirumdas, Sarangapani, & Annappure, 2015). این فناوری با سایر روش‌های خشک کردن، به‌ویژه سامانه‌های صنعتی، کاملاً سازگار است (Gavahian & Khaneghah, 2020). همچنین مشخص شده است فرآیند تیمار با پلاسماي سرد می‌تواند اصلاحاتی در ساختار نشاسته ایجاد کند که بر ویژگی‌های عملکردی آن تأثیر بگذارد. این تغییرات موجب بهبود کارایی نشاسته در نقش یک افزودنی غذایی شده و امکان استفاده بهینه‌تر از آن را در مراحل مختلف آماده‌سازی غذا فراهم می‌آورد (Thirumdas, Kadam, & Annappure, 2017). پیش‌تیمار پلاسماي سرد به‌طور قابل توجهی زمان خشک کردن را کاهش داده و بازده فرآیند خشک کردن را بهبود می‌بخشد (Li et al., 2019; Ranjbar Nedamani & Hashemi, 2022). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که تیمار پلاسماي سرد قبل یا در حین خشک کردن مواد غذایی، قابلیت بالایی در بهبود کارایی خشک کردن و کیفیت دارد؛ به‌عنوان مثال ژو و همکاران (Zhou et al., 2020) گوجی بری را به مدت ۳۰ ثانیه با پلاسماي سرد تیمار کردند که منجر به کاهش ۵۰٪ در زمان خشک کردن شد. آشتیانی و همکاران (Ashtiani et al., 2020) با

امولسیون‌ها از دیگر کاربردهای آن است. علاوه بر این، نشاسته‌ای اصلاح‌شده قابلیت بهبود پایداری در فرآیندهای انجماد-ذوب، جایگزینی چربی، کپسوله‌سازی ترکیبات آروماتیک و افزایش مقدار نشاسته‌ای مقاوم را دارا می‌باشد که این ویژگی‌ها نقش مهمی در افزایش کیفیت و پایداری مواد غذایی ایفا می‌کنند (Almaei, Nassiri, Nematollahi, Zare, & Khorram, 2024; Belitz, Grosch, & Schieberle, 2009; Bertolini, 2009).

یکی از مراحل مهم اصلاح نشاسته، بعد از تیمارهای اصلاحی، خشک کردن آن است. نشاسته از دانه‌ها و میوه‌های متفاوت گیاهان به‌دست می‌آید و برای ماندگاری طولانی‌تر و صرفه‌جویی بالقوه در هزینه‌های حمل و نقل و ذخیره‌سازی تجاری، به حالت خشک مورد استفاده قرار می‌گیرد. خشک کردن آخرین مرحله ضروری در طول اصلاح نشاسته است که اغلب با استفاده از آون معمولی، خشک‌کن انجمادی و حلال آلی (اغلب اتانول یا استون) انجام می‌شود. گزارش شده است که روش‌های خشک کردن می‌تواند ساختار نشاسته را تغییر دهد، مانند آسیب به ساختار سطحی و داخلی گرانول‌های نشاسته که به نوبه خود بر خواص عملکردی و واکنش شیمیایی نشاسته تأثیر می‌گذارد (Apinan et al., 2007).

نتایج پژوهش‌های متولی و همکاران (Motevali, Minaei, Banakar, Ghobadian, & Khoshtaghaza, 2014; Motevali, Minaei, & Khoshtaghaza, 2011) در خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی با استفاده از فناوری‌های مختلف خشک کردن (جریان هوای گرم، مایکروویو، مایکروویو-جریان هوای گرم، فروسرخ، فروسرخ-جریان هوای گرم، تحت خلا، مایکروویو-تحت خلا) نشان داد که استفاده از خشک کردن جریان هوای گرم بالاترین مصرف انرژی در بین تمامی روش‌های خشک کردن را دارد با این حال، همان‌گونه که ذکر شد، خشک کردن با هوای گرم یک عملیات پرمصرف از نظر انرژی است که منجر به تغییرات شیمیایی و فیزیکی نامطلوب در ماده غذایی نیز می‌شود. بنابراین، بهبود کارایی خشک کردن و حفظ کیفیت محصول از نتایج اصلی تحقیقات در زمینه خشک کردن مواد غذایی است (Misra & Martynenko, 2021; Ranjbar Nedamani & Hashemi, 2021). در فرآیند خشک کردن با هوای گرم، ضریب انتقال حرارت پایین مواد غذایی و وجود یک لایه بر سطح محصولات کشاورزی، مانع حذف رطوبت شده و در نتیجه زمان خشک شدن طولانی‌تر شده و کیفیت کلی محصول کاهش می‌یابد (Ashtiani et al., 2020; Zhou et al., 2020). بنابراین، برای رفع این نقص، روش‌های تیمار کمکی برای خشک کردن با هوای گرم، مانند بلانچینگ با آب داغ و بخار، تیمار اسیدی یا قلیایی، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. اگرچه این روش‌ها تأثیر مثبتی بر فرآیند خشک کردن دارند؛ اما همچنان ممکن است با مشکلاتی مانند جذب

مصرف انرژی کمتر و هم بهره‌وری حرارتی بهتری داشته باشد.

مواد و روش‌ها

پودر نشاسته سیب‌زمینی از شرکت تولیدی محصولات غذایی ضامن واقع در شهرک صنعتی مشهد، ایران، در بسته‌بندی پلاستیکی بدون آن‌که با هوای بیرون در تماس باشد، تهیه شد.

تیمار با پلاسمای سرد

برای انجام تیمار پلاسمای سرد بر روی نشاسته، از یک مولد پلاسمای سرد دست‌ساز (شکل ۱) در مرکز رشد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، استفاده شد. این وسیله از دو بخش اصلی تشکیل شده است: بخش تولید پلاسمای سرد (نوع تخلیه الکتریکی با مانع^۱ (DBD)) و بخش نگهداری نمونه. طراحی این وسیله به‌گونه‌ای است که امکان تولید پلاسمای سرد و تماس مستقیم نمونه با هوای یونیزه‌شده حاصل از آن را فراهم می‌آورد. پلاسمای سرد با استفاده از یک راکتور پلاسما با الکترودهایی از جنس مس و فولاد، در ولتاژ ۲۰ کیلوولت، جریان ۳ میلی‌آمپر و بسامد ۵۰ هرتز و با بهره‌گیری از هوای اتمسفر تولیدشده و بر روی نمونه اعمال شد.

کمک تیمار پلاسمای سرد، زمان خشک‌کردن و مصرف انرژی را به ترتیب ۲۶/۲۷٪ و ۲۶/۳۰٪ کاهش دادند. این کار سبب حفظ ترکیبات فنولی و ویتامین C نیز شد. گوپتا و همکاران (Gupta, Guha, & Srivastav, 2023) به بررسی اثر پلاسمای سرد دی‌الکتریک (BDB) بر نشاسته تارو پرداختند و نتایج نشان داد که پلاسما شفافیت خمیر، حلالیت، پایداری انجماد-ذوب (درصد پس دادن آب)، خواص رنگی، شاخص سفیدی و قابلیت هضم آزمایشگاه را تغییر می‌دهد بنابراین نشاسته تارو تیمار شده با پلاسمای سرد می‌تواند در زمینه مواد بسته‌بندی مواد غذایی، محصولات غذایی کاربردی و دارویی مورد استفاده قرار گیرد.

باتوجه به توضیحات ذکر شده، نحوه خشک‌کردن نشاسته پیش‌ژلاتینه بسیار مهم بوده و خشک‌کردن یکی از مراحل بسیار مهم در تولید پودر نشاسته اصلاح شده است. هدف اصلی از این تحقیق، بررسی و بهینه‌سازی فراسنجه‌های انرژی و حرارتی در فرآیند خشک‌کردن نشاسته اصلاح شده با پیش‌تیمارهای ژلاتینه شدن و پلاسمای سرد است. این مطالعه به دنبال یافتن شرایط بهینه‌ای است که منجر به کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی فرآیند خشک‌کردن در اثر تیمار پلاسمای سرد شود. به این ترتیب می‌توان خشک‌کردن نشاسته اصلاح شده را به‌گونه‌ای بهبود بخشید که هم



شکل ۱- مولد پلاسمای سرد

Fig. 1. The cold plasma generator device

تصادفی با عوامل دمای پیش‌ژلاتینه (۶۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد)، زمان تیمار با پلاسمای سرد (۳۰، ۱۵ و ۰ دقیقه)، و دمای خشک‌کردن نشاسته (۸۰، ۷۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد) در یک آون جریان هوای

آماده‌سازی نمونه‌ها

در تهیه نمونه‌های نشاسته، آزمایش چندعامله در قالب طرح کاملاً

بازده خشک‌شدن

بازده فرآیند خشک‌شدن از طریق نسبت مجموع انرژی موردنیاز برای گرم‌کردن محصول و انرژی لازم جهت تبخیر رطوبت، به کل انرژی مصرف‌شده طی فرآیند خشک‌کردن تعیین می‌شود. این معیار نشان‌دهنده کارایی انرژی طی این فرآیند است (رابطه (۴)) (Vieira, Estrella, & Rocha, 2007).

$$\text{Drying Efficiency} = \frac{E_{\text{Heating+evaporation}}}{E_{\text{total}}} \quad (4)$$

در این رابطه، Drying efficiency بازده خشک‌شدن (%)، E_{Heating} انرژی لازم برای افزایش دمای محصول در حال خشک‌شدن (kJ)، $E_{\text{evaporation}}$ انرژی لازم برای تبخیر رطوبت (kJ) و E_{total} کل انرژی مصرفی (kJ) است.

انرژی مصرفی برای تبخیر رطوبت در مواد و محصولات دارای رطوبت زیاد از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد (Vieira et al., 2007).

$$E_{\text{evaporation}} = h_{fg} \cdot M_w \quad (5)$$

در رابطه (۵) h_{fg} از رابطه‌های (۶) و (۷) به دست می‌آید.

$$h_{fg} = 2.503 \times 10^6 - 2.386 \times 10^3 (T - 273.16) \quad 273.16 \leq T(K) \leq 338.72 \quad (6)$$

$$h_{fg} = (7.33 \times 10^{12} - 1.60 \times 10^7 T^2)^{0.5} \quad 338.72 \leq T(K) \leq 533.16 \quad (7)$$

همچنین E_{heating} مقدار انرژی لازم برای بالا بردن دمای محصول در حال خشک‌شدن می‌باشد و مقدار آن از طریق رابطه (۸) محاسبه می‌گردد.

$$E_{\text{heating}} = W_d \cdot C_m (T_{m2} - T_{m1}) \quad (8)$$

مقدار انرژی لازم برای افزایش دمای نمونه‌ها به شدت تحت تأثیر C_m (گرمای ویژه محصول) می‌باشد. گرمای ویژه محصولات کشاورزی که رابطه عمیقی با میزان رطوبت اولیه آن‌ها دارد از طریق رابطه (۹) و (۱۰) به دست می‌آید (Motevali et al., 2014).

$$C_m = 1465.0 + 3560.0 \left(\frac{M_p}{1 + M_p} \right) \quad (9)$$

$$M_p = \left(\frac{W_w - W_d}{W_d} \right) \quad (10)$$

در روابط بالا C_m انرژی لازم برای افزایش دمای محصول (کیلوژول)، W_d وزن ماده خشک (کیلوگرم)، C_m گرمای ویژه محصول (کیلوژول بر کیلوگرم درجه کلوین)، T_{m1} دمای اولیه محصول (کلوین)، T_{m2} دمای نهایی محصول (کلوین)، M_p محتوای رطوبتی محصول بر پایه خشک (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده جامد)، W_w وزن اولیه محصول (کیلوگرم) می‌باشد.

گرم اجرا شد. برای تهیه نمونه‌های پیش‌ژلاتینه‌شده، مقدار ۱۰ گرم نشاسته در ۹۰ گرم آب مقطر ریخته و یک محلول ۱۰٪ (W/W) تهیه شد. نمونه‌هایی که باید تیمار پیش‌ژلاتینه‌شدن دریافت می‌کردند، تا دمای موردنظر گرمادهی شده و بعد از تغییر رنگ و گرانی، برای انجام تیمار پلاسما سرد در وسیله قرار داده شدند. در نهایت تمام نمونه‌ها در دمای مورد آون گرم افجی فن‌دار مدل BM55E تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند. در طول آزمایش‌های خشک‌کردن، محدوده میانگین تغییرات دمای محیط 25°C و رطوبت نسبی هوا ۳۵٪ بود و فرآیند خشک‌کردن در سرعت جریان هوای ثابت ۰/۵ متر بر ثانیه انجام شد. یک نمونه نشاسته بدون تیمار پیش‌ژلاتینه و بدون تیمار با پلاسما نیز به عنوان شاهد تهیه و جهت مقایسه نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

محاسبه فراسنجه‌های انرژی در خشک‌کن جریان هوای گرم

انرژی مصرفی توسط خشک‌کن جریان هوای گرم برای خشک‌کردن در دماهای مختلف و سرعت جریان هوای ثابت با استفاده از رابطه (۱) به دست آمد (Aghbashlo & Samimi-Akhijahani, 2008; Motevali, Minaei, Khoshtaghaza, & Amirjagat, 2011).

$$E_{\text{ter}} = A \cdot v \cdot \rho_a \cdot C_a \cdot \Delta T \quad (1)$$

E_{ter} نمایانگر مقدار کل انرژی حرارتی مصرفی در یک دوره خشک‌شدن (kWh)، A بیانگر مساحت ظرفی که نمونه آزمایش در آن قرار می‌گیرد (m^2)، v نشان‌دهنده سرعت باد (m s^{-1})، ρ_a چگالی هوا (kg m^{-3})، t مجموع زمان لازم برای خشک‌شدن هر نمونه (h)، ΔT اختلاف دما ($^\circ\text{C}$) و C_a گرمای ویژه هوا ($\text{kJ kg}^{-1}^\circ\text{C}^{-1}$) هستند. انرژی مکانیکی مصرفی توسط دمنده در خشک‌کن در طول فرآیند خشک‌کردن از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$E_{\text{mec}} = \Delta P \cdot W_{\text{air}} \cdot t \quad (2)$$

E_{mec} کل انرژی مکانیکی در هر دوره (kJ)، ΔP افت فشار (Pa)، جریان هوا (m s^{-1})، t زمان خشک‌شدن (h) است (Motevali, Hashemi, & Keyani, 2023).

انرژی مخصوص موردنیاز به‌ازای خروج یک کیلوگرم رطوبت از محصول در حال خشک‌شدن با استفاده از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$S.E.C = \frac{Eu_{\text{(total)}}}{M_w} = \frac{Eu_{\text{(per+mec+ter)}}}{M_w} \quad (3)$$

$S.E.C$ انرژی مخصوص مورد نیاز (kWh kg^{-1})، $E.U_{\text{total}}$ مقدار کل انرژی مصرفی در طول فرآیند خشک‌شدن (kwh) و M_w میزان رطوبت حذف‌شده از محصول (kg) و E_{pr} میزان انرژی مصرفی پیش‌تیمار هستند (Motevali et al., 2023).

بازده انرژی

بازده انرژی از تقسیم انرژی لازم برای تبخیر رطوبت از محصول در حال خشک‌شدن، به کل انرژی مصرفی در طول فرآیند خشک‌شدن طبق رابطه (۱۱) به‌دست می‌آید (Motevali et al., 2023):

$$Energy\ Efficiency = \frac{E_{evaporation}}{E_{total}} \quad (11)$$

در این رابطه، Energy efficiency بازده انرژی، $E_{evaporation}$ انرژی لازم برای تبخیر رطوبت (kJ) و E_{total} کل انرژی مصرفی (kJ) است.

بازده حرارتی

بازده حرارتی عبارت است از تقسیم میزان رطوبت تبخیر شده از محصول به میزان گرمای مصرفی که از رابطه (۱۲) به‌دست می‌آید (Motevali et al., 2023):

$$Thermal\ Efficiency = \frac{M_{evaporation}}{H_{total}} \quad (12)$$

در این رابطه، Thermal efficiency بازده حرارتی ($kg\ kJ^{-1}$)، $M_{evaporation}$ وزن رطوبت تبخیر شده از محصول (kg)، H_{total} کل گرمای مصرفی (kJ) است.

گرمای مخصوص مصرفی

گرمای مصرفی مخصوص عبارت است از تقسیم کل گرمای مصرفی در طول فرآیند خشک‌شدن به وزن کل رطوبت خارج شده از محصول که عکس بازده حرارتی است و از رابطه (۱۳) به‌دست می‌آید (Motevali et al., 2023):

$$Specific\ Heat\ Consumption = \frac{H_{total}}{M_{evaporation}} \quad (13)$$

در این رابطه، Specific heat consumption گرمای مصرفی مخصوص ($kJ\ kg^{-1}$)، $M_{evaporation}$ وزن رطوبت تبخیر شده از محصول (kg)، H_{total} کل گرمای مصرفی (kJ) است.

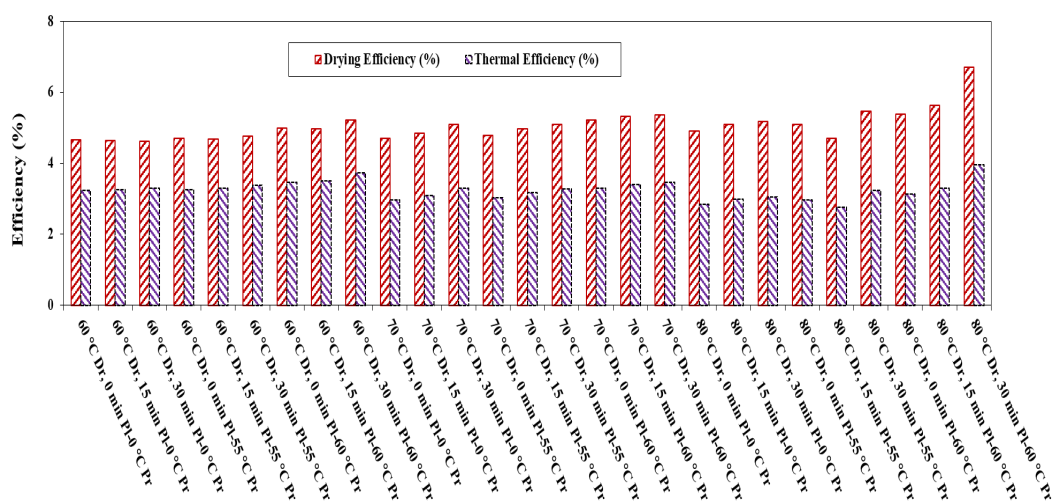
تحلیل آماری و بهینه‌سازی مدل

در این پژوهش، فرآیند طراحی تیمارها با استفاده از نرم‌افزار Design Expert نسخه ۱۲ انجام شد. بهینه‌سازی شرایط تیمار در سطح اطمینان ($p < 0.05$) صورت گرفت. نمودارهای مرتبط توسط نرم‌افزار Excel ترسیم و تمامی آزمون‌ها در دو تکرار اجرا شدند. جهت انتخاب مدل برتر، معیارهایی نظیر بالاترین ضریب تبیین (R^2) و کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) مدنظر قرار گرفتند. جهت پیش‌بینی رفتار فراسنجه‌های انرژی، از جعبه پیش‌بینی نرم‌افزار Design Expert نسخه ۱۲ استفاده شد.

نتایج و بحث

بازده خشک‌کردن و بازده حرارتی

مطابق شکل ۲، بالاترین بازده حرارتی و خشک‌کردن در دمای $80^{\circ}C$ با دمای پیش‌ژلاتینه $60^{\circ}C$ و زمان پلاسما ۳۰ دقیقه که $6/07\%$ می‌باشد اتفاق افتاد. در مقابل، کمترین میزان بازده حرارتی و خشک‌کردن در دمای $80^{\circ}C$ و دمای پیش‌ژلاتینه $55^{\circ}C$ و ۱۵ دقیقه پیش‌تیمار با پلاسما سرد و $2/75\%$ بود و اختلاف این دو $3/32\%$ می‌باشد. این امر نشان‌دهنده آن است که با افزایش تیمار پلاسما، دمای خشک و دمای پیش‌ژلاتینه شدن میزان بازده حرارتی و بازده خشک‌کردن افزایش می‌یابد. به‌طور کل افزایش زمان پلاسما و دمای پیش‌ژلاتینه به کاهش زمان خشک‌کردن نمونه‌ها کمک می‌کند بررسی‌ها نشان داد که با افزایش دمای خشک‌کردن از $60^{\circ}C$ به $90^{\circ}C$ ، بازده حرارتی و خشک‌کردن روند صعودی داشت. همچنین مقایسه میزان اثرگذاری پیش‌تیمارهای مختلف نشان داد که استفاده از پیش‌تیمار پلاسما سرد با مدت زمان ۳۰ دقیقه و پیش‌ژلاتینه با دمای $60^{\circ}C$ ، توانست بهترین عملکرد را در بین تمامی پیش‌تیمارها و همچنین در تمامی دماهای خشک‌کردن داشته باشد. یکی از دلایل نتایج به‌دست‌آمده این بود که وقتی نشاسته تحت پیش‌ژلاتینه $60^{\circ}C$ و تیمار پلاسمایی به مدت ۳۰ دقیقه قرار می‌گیرد، ساختار مولکولی آن دست‌خوش تغییر شده و زنجیره‌های آن شکسته می‌شوند. این امر منجر به افزایش سرعت خشک‌شدن ماده می‌گردد. همان‌طور که ژانگ و همکاران (X. Zhang et al., 2019) اشاره کرده‌اند، تیمار پلاسما تأثیر چشمگیری بر میزان رطوبت دارد، به‌گونه‌ای که رطوبت موجود در نشاسته نقشی تعیین‌کننده در فرآیند دلیمریزاسیون ایفا می‌کند. در این فرآیند، الکترون‌های ثانویه با مولکول‌های آب واکنش داده و موجب تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل فعال و الکترون‌های آزاد می‌شوند. این واکنش‌ها در نهایت موجب تخریب ساختار پلی‌ساکاریدی نشاسته می‌گردد (Phillips, 1962; Sokhey & Hanna, 1993). تیمار پلاسما موجب ایجاد اسپینگ (حکاکی) در سطح ماده می‌شود. این فرآیند می‌تواند دیواره‌های نمونه را تخریب کرده، آب‌دوستی آن را افزایش داده و باعث ایجاد ترک‌هایی شود. در نهایت، این تغییرات منجر به تسریع خروج آب و در نتیجه فرآیند خشک‌شدن می‌شوند (X. Zhang et al., 2019). و به دنبال آن میزان انرژی کمتری در فرآیند خشک‌کردن مصرف می‌شود (Du et al., 2022) در پژوهشی که میسرا و مارتیننکو (Misra & Martynenko, 2021) انجام دادند، مشخص شد که انرژی مصرفی در فرآیند تیمار پلاسما در مقایسه با کل انرژی مورد نیاز برای فرآیند خشک‌کردن، مقدار ناچیزی است. با این حال، استفاده از تیمار پلاسما می‌تواند به طور قابل توجهی هزینه‌های مربوط به انرژی در فرآیند خشک‌کردن را کاهش دهد.



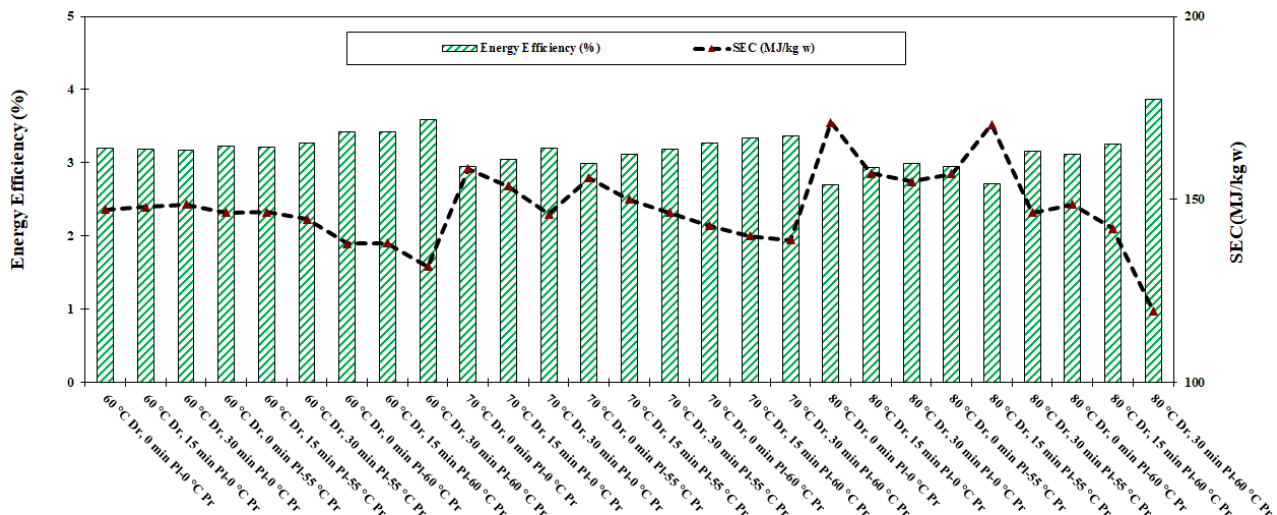
شکل ۲- روند تغییرات بازده انرژی و خشک شدن با تغییرات دما و پیش تیمار خشک شدن (Dr نماد دمای خشک کردن، Pl نماد زمان پیش تیمار با پلاسمای سرد، و Pr نماد دمای پیش ژلاتینه)

Fig. 2. Energy efficiency and drying efficiency changes with temperature and drying pretreatment (*Dr* is the symbol of Drying temperature, *Pl* is the symbol of cold plasma pretreatment, and *Pr* is the symbol of pregelatinisation temperature)

بازده انرژی

همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، با افزایش مدت زمان اعمال پلاسما و بالا رفتن دمای پیش ژلاتینه، میزان انرژی مخصوص و گرمای مصرفی نسبت به نمونه شاهد افزایش می یابد. نکته قابل توجه این است که انرژی مخصوص با بالا رفتن دما از ۶۰°C و دمای پیش ژلاتینه ۶۰°C و زمان پیش تیمار پلاسمای سرد ۳۰ دقیقه، به دمای ۷۰°C با همین شرایط افزایش پیدا می کند؛ اما با افزایش دما از ۷۰°C به ۸۰°C، انرژی مخصوص کاهش می یابد. همچنین، گرمای مصرفی با افزایش دما از ۶۰°C به ۷۰°C کاهش پیدا کرده و با رسیدن دما به ۸۰°C افزایش می یابد. کمترین مقدار انرژی مخصوص مصرفی در دمای خشک کردن ۸۰°C، دمای پیش ژلاتینه ۵۵°C، پیش تیمار ۱۵ دقیقه پلاسمای سرد و ۲/۷۱٪ مشاهده شده، در حالی که بیشترین مقدار مربوط به دمای خشک کردن ۸۰°C، دمای پیش ژلاتینه ۶۰°C، ۳۰ دقیقه پیش تیمار با پلاسمای سرد و ۳/۶۶٪ است که اختلاف کمترین و بیشترین گرمای مصرفی برابر است با ۰/۹۵ از سوی دیگر، کمترین میزان گرمای مخصوص دمای خشک کردن ۸۰°C، دمای پیش ژلاتینه ۶۰°C، ۳۰ دقیقه پلاسما و ۳/۶۶٪ و بیشترین میزان گرمای مخصوص در دمای خشک کردن

۸۰°C، دمای پیش ژلاتینه ۵۵°C، ۱۵ دقیقه پیش تیمار پلاسمای سرد و ۲/۷۱٪ مشاهده شده است که این امر نشان دهنده آن است که هرچه میزان دمای پیش ژلاتینه و زمان پلاسما بالاتر رود سرعت خشک کردن و همچنین میزان انرژی مصرفی کاهش پیدا می کند و به طور کلی باعث کاهش میزان مصرف انرژی می شود. این افزایش سرعت خشک شدن می تواند ناشی از تشکیل منافذ میکروسکوپی طی تیمار پلاسما باشد که انتقال آب در طول فرآیند خشک شدن را تسهیل می کند. افزایش مدت مواجهه با پلاسما موجب کاهش تدریجی زمان خشک شدن شد که احتمالاً به دلیل افزایش اندازه منافذ میکروسکوپی است (Ashtiani et al., 2020). نتایج نشان می دهد که استفاده مناسب از پیش تیمار پلاسما در خشک کردن همرفتی می تواند کاهش چشمگیری در مصرف انرژی ایجاد کند. این یافته ها نقش مؤثر پلاسما را در بهبود کارایی خشک کردن و کاهش هزینه های انرژی برجسته می کنند که با تحقیق مورد مطالعه آشتیانی و همکاران (Ashtiani et al., 2020) که در مورد تأثیر پیش تیمار پلاسما و خشک کردن بر روی انگور بوده است مطابقت دارد که در این تحقیق تیمار پلاسما باعث کاهش مصرف انرژی و افزایش سرعت خشک شدن انگور شده است.



شکل ۳- روند تغییرات انرژی مخصوص و گرمای مخصوص نسبت به تغییرات دما و پیش تیمار در خشک کردن نشاسته (Dr نماد دمای خشک کردن، Pl نماد زمان پیش تیمار با پلاسمای سرد و Pr نماد دمای پیش ژلاتینه)

Fig. 3. Specific energy and specific heat changes with respect to changes in temperature and pretreatment in starch drying (*Dr* is the symbol of Drying temperature, *Pl* is the symbol of cold plasma pretreatment, and *Pr* is the symbol of pregelatinisation temperature)

بهترین مدل رگرسیونی برای هر سه پاسخ، مدل خطی بوده و این مدل‌ها قادرند با ضریب تبیین بیش از ۰/۸۶ در تمامی شاخص‌ها (جدول ۱ و شکل ۳) پاسخ‌های موردنظر را پیش‌بینی کنند. در مورد بازده انرژی، مدل رگرسیونی نشان داد که اثر دمای پیش‌ژلاتینه کردن بیش‌ترین میزان تغییرات آن را توجیه می‌کند به‌طوری‌که هر واحد افزایش در این فاکتور، باعث افزایش تقریباً ۰/۱۳ واحدی در میزان بازده انرژی می‌شود. از طرفی، دمای خشک کردن و مدت‌زمان تیمار با پلاسمای سرد نیز به‌ترتیب اثرات مثبت و منفی بر بازده انرژی داشته و نشان‌دهنده نقش متقابل دما و زمان در تنظیم مصرف انرژی است.

در بررسی بازده خشک کردن نشاسته اصلاح‌شده، اثر فاکتورها از نظر آماری بسیار قوی‌تر بوده هر سه عامل اثر معنادار بر پاسخ داشتند. به‌طوری‌که دمای خشک کردن ضریب تأثیر تقریباً ۰/۳ از خود نشان داد. یعنی افزایش این فاکتور باعث افزایش قابل‌توجه در مقدار بازده خشک کردن خواهد شد. این نشان می‌دهد کنترل دقیق دمای خشک کردن نشاسته اصلاح‌شده، نقش مهمی در بهبود کارایی خشک کردن آن و در نتیجه کاهش اتلاف انرژی و کوتاه کردن زمان خشک کردن خواهد شد.

در بررسی بازده دمایی نیز اثر هر سه فاکتور معنادار بود. با این تفاوت که اثرات آن‌ها کمی کمتر از شاخص‌های دیگر است؛ اما ضریب معناداری و مقدار *p* کم نشان‌دهنده توانایی مدل در توضیح و

مدل‌سازی و بهینه‌سازی بازده انرژی، بازده خشک کردن و بازده دمایی

در تحلیل اثرات متغیرهای مختلف بر بازده‌های انرژی، خشک کردن و دمایی، بررسی نتایج جدول ۱، شکل ۴ و معادله خطی مرتبط نشان می‌دهد که دمای پیش‌ژلاتینه با سطح اطمینان ($p < 0.05$) تأثیر قابل‌توجهی بر تمامی فراسنجه‌های موردنظر، یعنی بازده انرژی، بازده خشک کردن و بازده دمایی، داشته است. در مقابل، دمای خشک کردن تأثیر معناداری بر بازده انرژی نشان نداد؛ اما اثرات آن بر بازده خشک کردن و بازده دمایی معنادار ارزیابی شده‌اند. از سوی دیگر، تیمار پلاسما اثر کاملاً معناداری بر بازده انرژی و بازده خشک کردن داشته؛ اما در مورد بازده دمایی تأثیر قابل‌توجهی مشاهده نشده است. این تحلیل نشان می‌دهد که تغییرات دمایی و تیمارهای مختلف بر فرآیندهای خشک کردن و مصرف انرژی اثرات تفکیک‌شده‌ای دارند که می‌تواند در بهینه‌سازی این فرآیندها موردتوجه قرار گیرد.

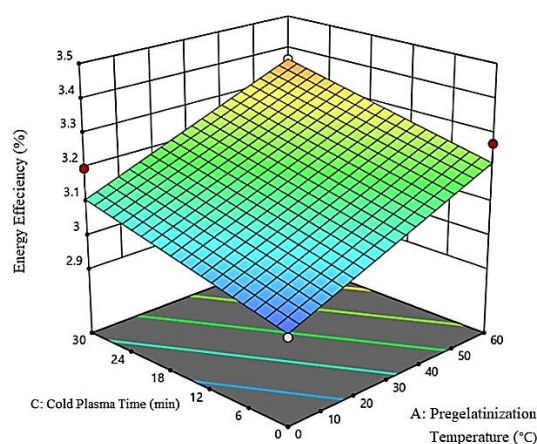
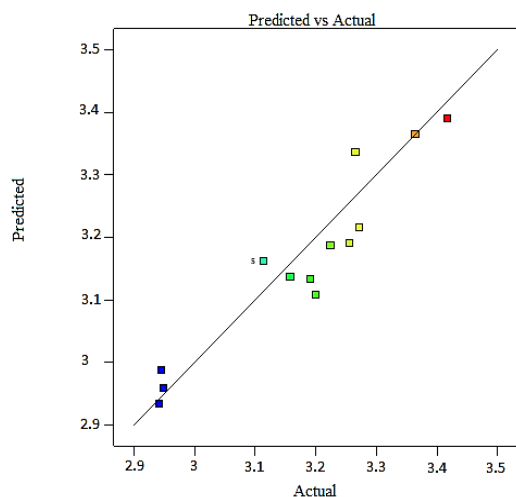
جدول ۱ معناداری فاکتورهای مورد مطالعه بر پاسخ‌های مورد بررسی در این تحقیق و همچنین معناداری مدل رگرسیونی پیش‌بینی‌شده برای داده‌های تجربی را نشان می‌دهد. مطابق با این جدول، هر سه فاکتور دمای پیش‌ژلاتینه کردن، دمای خشک شدن و زمان تیمار پلاسما بر بازده انرژی، بازده خشک کردن و بازده دمایی اثر معنادار داشتند. همچنین برازش داده‌های آزمایشگاهی نشان داد

پیش‌بینی فرآیند است. این نتیجه نشان می‌دهد کنترل بهینه دما و زمان تیمار با پلاسما ی سرد، باعث بهبود بازده دمایی خواهد شد.

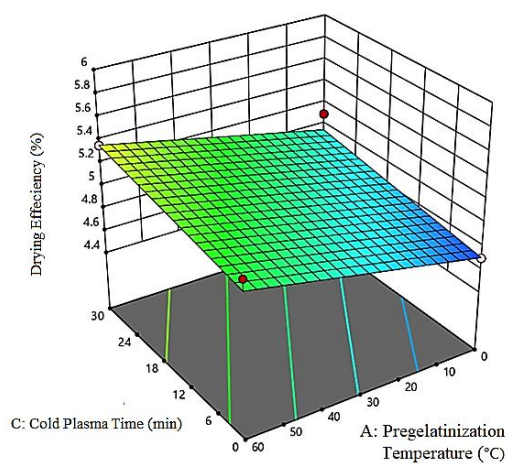
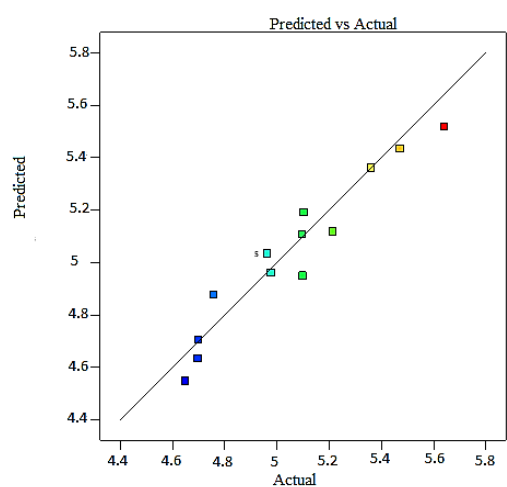
جدول ۱- اثر پاسخ فاکتورهای دمای پیش‌ژلاتینه کردن، دمای خشک‌شدن و زمان تیمار پلاسما بر بازده انرژی، بازده خشک‌کردن و بازده دمایی

Table 1- Effect of response factors of pregelatinisation temperature, drying temperature, and plasma treatment time on energy efficiency, drying efficiency, and temperature efficiency

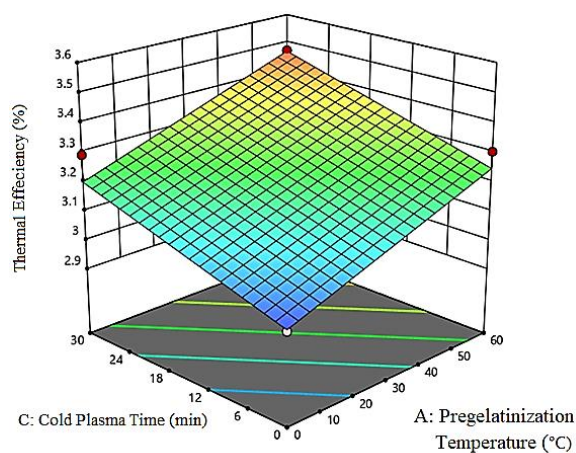
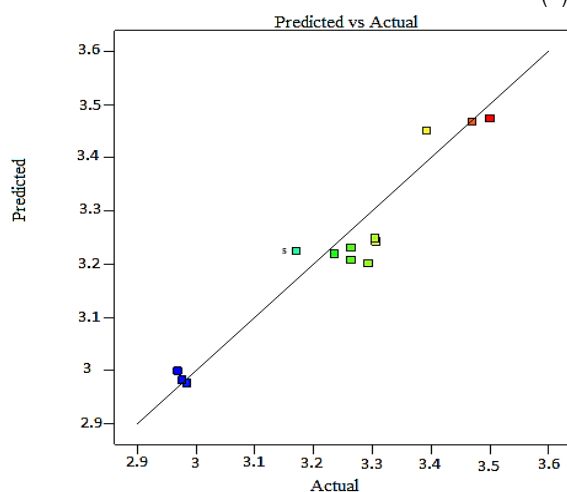
Energy Efficiency							
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	R ²	Adjusted R ²
Model	0.2555	3	0.0852	27.75	< 0.0001	0.86	0.83
A-PregelTemp	0.1317	1	0.1317	42.91	< 0.0001		
B-Drying Temp	0.0794	1	0.0794	25.86	0.0002		
C-CPtime	0.0444	1	0.0444	14.46	0.0022		
Residual	0.0399	13	0.0031				
Lack of Fit	0.0399	9	0.0044				
Pure Error	0.0000	4	0.0000				
Cor Total	0.2955	16					
Linear Model	Coefficient						
Intercept	3.16						
A-PregelTemp	0.1283						
B-Drying Temp	-0.0996						
C-CPtime	0.0745						
Drying Efficiency							
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	R ²	Adjusted R ²
Model	1.08	3	0.3603	42.80	< 0.0001	0.90	0.88
A-PregelTemp	0.3397	1	0.3397	40.36	< 0.0001		
B-Drying Temp	0.6227	1	0.6227	73.97	< 0.0001		
C-CPtime	0.1185	1	0.1185	14.08	0.0024		
Residual	0.1094	13	0.0084				
Lack of Fit	0.1094	9	0.0122				
Pure Error	0.0000	4	0.0000				
Cor Total	1.19	16					
Linear Model	Coefficient						
Intercept	5.03						
A-PregelTemp	0.2061						
B-Drying Temp	0.2790						
C-CPtime	0.1217						
Thermal Efficiency							
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	R ²	Adjusted R ²
Model	0.3446	3	0.1149	37.55	< 0.0001	0.89	0.87
A-PregelTemp	0.1414	1	0.1414	46.21	< 0.0001		
B-Drying Temp	0.1070	1	0.1070	34.99	< 0.0001		
C-CPtime	0.0962	1	0.0962	31.44	< 0.0001		
Residual	0.0398	13	0.0031				
Lack of Fit	0.0398	9	0.0044				
Pure Error	0.0000	4	0.0000				
Cor Total	0.3844	16					
Linear Model	Coefficient						
Intercept	3.22						
A-PregelTemp	0.1329						
B-Drying Temp	-0.1157						
C-CPtime	0.1096						



(الف) - (a)



(ب) - (b)



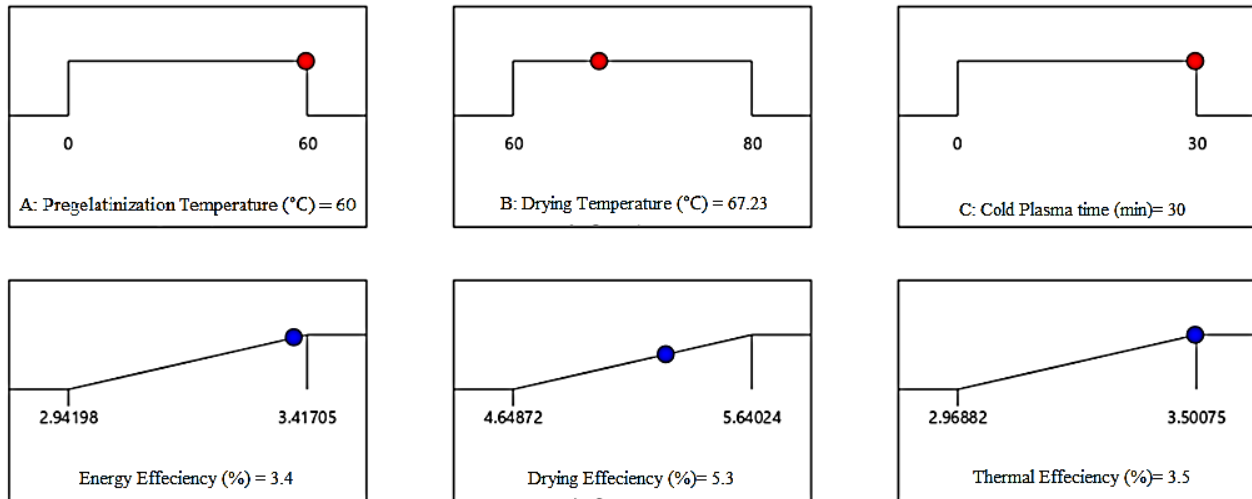
(ج) - (c)

شکل ۳- اثر پاسخ فاکتورهای مورد مطالعه بر (الف) بازده انرژی، (ب) بازده خشک کردن و (ج) بازده دمایی

Fig. 3. Effect of the response of the studied factors on (a) energy efficiency, (b) drying efficiency, (c) and temperature efficiency

۷۰°C و زمان اعمال پلاسما ۳۰ دقیقه بهینه‌ترین شرایط را برای نمونه فراهم می‌کنند. بنابراین، جهت دستیابی به بهترین عملکرد در این فرآیند، توصیه می‌شود از ترکیب دمای ۶۰°C برای پیش‌ژلاتینه کردن، دمای ۶۷/۲°C برای خشک کردن و مدت زمان ۳۰ دقیقه برای تیمار با پلاسما سرد استفاده شود که موجب افزایش کارایی و بهینه‌سازی انرژی خواهد شد.

باتوجه به تأثیر متغیرهای مختلف بر میزان مصرف انرژی، تعیین شرایط بهینه برای ارزیابی این اثرات چندگانه ضروری است. در این راستا، فراسنجه‌های مرتبط با انرژی، گرما و دما مورد بهینه‌سازی قرار گرفته‌اند تا شرایط مطلوب برای کاهش یا افزایش مصرف انرژی مشخص شود. نتایج حاصل از این بهینه‌سازی عددی در شکل ۴ ارائه شده‌اند که نشان می‌دهد دمای پیش تیمار ۶۰°C، دمای خشک کردن



شکل ۴- شرایط بهینه‌سازی اندیس بازده‌های انرژی، گرما و دما در دیسپرسیون^۱ نشاسته اصلاح شده با تیمارهای مورد مطالعه

Fig. 4. Optimisation conditions for the energy, heat, and temperature efficiency indices in modified starch dispersion with the studied treatments

حاصل شد. این یافته‌ها می‌توانند در بهبود فرآیندهای تولید نشاسته اصلاح شده در صنایع تبدیلی مورد استفاده قرار گیرند و منجر به توسعه روش‌های پایدارتر تولید نشاسته شوند.

منابع تأمین مالی

بودجه این پژوهش توسط دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در قالب پایان نامه دانشجوی کارشناسی ارشد به شماره ثبت ۱۴۰۳/۶۴۹۰ و تاریخ ثبت ۱۴۰۳/۶/۲۶ از بودجه پژوهشی مربوط به گرنت پایان نامه‌ها تأمین شده است.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

سپاسگزاری

نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های غیرحرارتی و نوین که تأثیر قابل توجهی دارد، استفاده از پلاسما سرد به عنوان پیش تیمار در فرآیند خشک کردن است. این تکنیک نه تنها سرعت خشک کردن را افزایش داده و کیفیت محصول نهایی را بهبود می‌بخشد، بلکه موجب کاهش مصرف انرژی و جلوگیری از افت کیفیت می‌شود. در این مطالعه، نتایج نشان داد که تغییرات دمای خشک کردن و نوع پیش تیمارها اثرات متفاوتی بر فراسنجه‌های کارایی انرژی، حرارتی و خشک کردن داشتند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش زمان تیمار پلاسما، دمای پیش‌ژلاتینه و دمای خشک کردن، میزان انرژی مصرفی کاهش یافته و در نتیجه سرعت خشک شدن افزایش پیدا می‌کند که کارایی بالایی این روش را در بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن اثبات می‌کند. به طوری که بیشترین بهره‌وری و کمترین مصرف انرژی در شرایط بهینه دمای ۶۰°C برای پیش‌ژلاتینه کردن، دمای ۶۷/۲°C برای خشک کردن و مدت زمان ۳۰ دقیقه برای تیمار با پلاسما سرد

تأمین مالی، تحقیق و بررسی، روش‌شناسی، مدیریت پروژه، منابع، نرم‌افزار، نظارت، اعتبارسنجی، تجسم، نوشتن - پیش‌نویس اصلی، نوشتن - بررسی و ویرایش

علی متولی: مفهوم‌سازی، تحقیق و بررسی، روش‌شناسی، مدیریت پروژه، منابع، نظارت
سیدجعفر هاشمی: مفهوم‌سازی، مدیریت داده‌ها، تحلیل رسمی، روش‌شناسی، مدیریت پروژه، نظارت

از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری بابت حمایت مادی و معنوی از انجام این پژوهش سپاسگزاری می‌شود.

مشارکت نویسندگان

علی تقوی: مفهوم‌سازی، مدیریت داده‌ها، تحلیل رسمی، تحقیق و بررسی، روش‌شناسی، منابع، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، نوشتن - بررسی و ویرایش
آزاده رنجبر ندامانی: مفهوم‌سازی، مدیریت داده‌ها، تحلیل رسمی،

References

1. Aghbashlo, M., & Samimi-Akhijahani, H. (2008). Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). *Energy Conversion and Management*, 49(10), 2865-2871. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.03.009>
2. Almaei, M., Nassiri, S. M., Nematollahi, M. A., Zare, D., & Khorram, M. (2024). Study on Drying Process of Farmed Shrimp Meat in a Hot Air Convective Dryer and Variation of Some Related Parameters. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(3), 253-269. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2023.80905.1145>
3. Apinan, S., Yujiro, I., Hidefumi, Y., Takeshi, F., Myllärinen, P., Forssell, P., & Poutanen, K. (2007). Visual observation of hydrolyzed potato starch granules by α -amylase with confocal laser scanning microscopy. *Starch-Stärke*, 59(11), 543-548. <https://doi.org/10.1002/star.200700630>
4. Ashogbon, A. O., & Akintayo, E. T. (2014). Recent trend in the physical and chemical modification of starches from different botanical sources: A review. *Starch-Stärke*, 66(1-2), 41-57. <https://doi.org/10.1002/star.201300106>
5. Ashtiani, S. H. M., Rafiee, M., Morad, M. M., Khojastehpour, M., Khani, M. R., Rohani, A., ..., & Martynenko, A. (2020). Impact of gliding arc plasma pretreatment on drying efficiency and physicochemical properties of grape. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 63, 102381. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102381>
6. Bahrami, R., Zibaei, R., Hashami, Z., Hasanvand, S., Garavand, F., Rouhi, M., ..., & Mohammadi, R. (2022). Modification and improvement of biodegradable packaging films by cold plasma; a critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 62 (7), 1936- 1950. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1848790>
7. Bassey, E. J., Cheng, J. H., & Sun, D. W. (2021). Novel nonthermal and thermal pretreatments for enhancing drying performance and improving quality of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 112, 137-148. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.045>
8. Belitz, H. D., Grosch, W., & Schieberle, P. (2009). Coffee, tea, cocoa. *Food Chemistry*, 938-970.
9. Bertolini, A. (2009). *Starches: characterization, properties, and applications*: CRC Press.
10. Du, Y., Yang, F., Yu, H., Xie, Y., & Yao, W. (2022). Improving food drying performance by cold plasma pretreatment: A systematic review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(5), 4402-4421. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13027>
11. Gavahian, M., & Khaneghah, A. M. (2020). Cold plasma as a tool for the elimination of food contaminants: Recent advances and future trends. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(9), 1581-1592. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1584600>
12. Gupta, R. K., Guha, P., & Srivastav, P. P. (2023). Effect of high voltage dielectric barrier discharge (DBD) atmospheric cold plasma treatment on physicochemical and functional properties of taro (*Colocasia esculenta*) starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 126772. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126772>
13. Huber, K., & BeMiller, J. (2010). Modified starch: Chemistry and properties. En: *Starches: characterization, properties and applications*, (AC Bertolini ed.) Pp 145-204. In: CRC Press, Boca Raton, FL.
14. Katsigiannis, A. S., Bayliss, D. L., & Walsh, J. L. (2022). Cold plasma for the disinfection of industrial food-contact surfaces: An overview of current status and opportunities. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(2), 1086-1124. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12885>
15. Kaur, B., Ariffin, F., Bhat, R., & Karim, A. A. (2012). Progress in starch modification in the last decade. *Food Hydrocolloids*, 26(2), 398-404. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.02.016>
16. Li, S., Chen, S., Han, F., Xv, Y., Sun, H., Ma, Z., ..., & Wu, W. (2019). Development and optimization of cold plasma pretreatment for drying on corn kernels. *Journal of Food Science*, 84(8), 2181-2189. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14708>

17. Misra, N., & Martynenko, A. (2021). Multipin dielectric barrier discharge for drying of foods and biomaterials. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 70, 102672. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102672>
18. Motevali, A., Hashemi, S. J., & Keyani, R. (2023). Investigation of Thermodynamic Parameters and Essential Oil Content in Drying of Rosemary by Applying a Microwave Pulsed Pretreatment. *Energy Engineering and Management*, 7(2), 42-51. Retrieved from https://energy.kashanu.ac.ir/article_113413_49278afa381bdf6ff048e6d6c0b46d2a.pdf
19. Motevali, A., Minaei, S., Banakar, A., Ghobadian, B., & Khoshtaghaza, M. H. (2014). Comparison of energy parameters in various dryers. *Energy Conversion and Management*, 87, 711-725. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.012>
20. Motevali, A., Minaei, S., & Khoshtaghaza, M. H. (2011). Evaluation of energy consumption in different drying methods. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1192-1199. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.014>
21. Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M. H., & Amirnejat, H. (2011). Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices. *Energy*, 36(11), 6433-6441. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.09.024>
22. Phillips, G. O. (1962). Radiation chemistry of carbohydrates. In *Advances in Carbohydrate Chemistry* (Vol. 16, pp. 13-58): Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0096-5332\(08\)60258-1](https://doi.org/10.1016/S0096-5332(08)60258-1)
23. Ranjbar Nedamani, A., & Hashemi, S. J. (2021). RSM-CFD modeling for optimizing the apricot water evaporation. *Journal of Food and Bioprocess Engineering*, 4(2), 112-119. <https://doi.org/10.22059/jfabe.2021.320809.1088>
24. Ranjbar Nedamani, A., & Hashemi, S. J. (2022). Energy consumption computing of cold plasma-assisted drying of apple slices (Yellow Delicious) by numerical simulation. *Journal of Food Process Engineering*, 45(5), e14019. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14019>
25. Singh, J., Kaur, L., & McCarthy, O. (2007). Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications—A review. *Food Hydrocolloids*, 21(1), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.02.006>
26. Sokhey, A., & Hanna, M. (1993). Properties of irradiated starches. *Food Structure*, 12(4), 2.
27. Taghavi, A., Nedamani, A. R., Motevali, A., & Hashemi, S. J. (2025). Expanding the Application of Potato Starch in Diverse Food Products by Modifying Its Water Absorption, Swelling, and Solubility Through Pregelatinization–Cold Plasma Treatments. *Journal of Food Biochemistry*, 2025(1), 6809100. <https://doi.org/10.1155/jfbc/6809100>
28. Thirumdas, R., Kadam, D., & Annapure, U. (2017). Cold plasma: An alternative technology for the starch modification. *Food Biophysics*, 12, 129-139.
29. Thirumdas, R., Sarangapani, C., & Annapure, U. S. (2015). Cold plasma: a novel non-thermal technology for food processing. *Food Biophysics*, 10, 1-11.
30. Vieira, M., Estrella, L., & Rocha, S. (2007). Energy efficiency and drying kinetics of recycled paper pulp. *Drying Technology*, 25(10), 1639-1648. <https://doi.org/10.1080/07373930701590806>
31. Wu, Y., Cheng, J. H., & Sun, D. W. (2021). Blocking and degradation of aflatoxins by cold plasma treatments: Applications and mechanisms. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 647-661. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.053>
32. Zhang, K., Perussello, C. A., Milosavljević, V., Cullen, P., Sun, D.-W., & Tiwari, B. K. (2019). Diagnostics of plasma reactive species and induced chemistry of plasma treated foods. *Critical reviews in food science and nutrition*, 59(5), 812-825. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1564731>
33. Zhang, X.-L., Zhong, C.-S., Mujumdar, A. S., Yang, X.-H., Deng, L.-Z., Wang, J., & Xiao, H.-W. (2019). Cold plasma pretreatment enhances drying kinetics and quality attributes of chili pepper (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Food Engineering*, 241, 51-57. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.08.002>
34. Zhou, Y.-H., Vidyarthi, S. K., Zhong, C.-S., Zheng, Z.-A., An, Y., Wang, J., ..., & Xiao, H.-W. (2020). Cold plasma enhances drying and color, rehydration ratio and polyphenols of wolfberry via microstructure and ultrastructure alteration. *Lwt*, 134, 110173. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110173>