

Research Article

Vol. 22, No. 2, May-June, 2026, p. 175-192

Application of Ultrasound as Pretreatment to Improve the Functionality of Whey Protein Powder during Spray Drying

M. Aram Nabi Nia¹, H. Karazhiyan^{2*} 

1- Department of Food Science and Technology, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

2- Department of Food Science and Technology, ToH.C., Islamic Azad University, Torbat Heydarieh, Iran

(*- Corresponding Author Email: hojjat.karazhiyan@iau.ac.ir)

Received: 05.02.2026

Revised: 15.04.2026

Accepted: 21.04.2026

Available Online: 09.05.2026

How to cite this article:

Aram Nabi Nia, M., & Karazhiyan, H. (2026). Application of ultrasound as pretreatment to improve the functionality of Whey protein powder during spray drying. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 22(2), 175-192. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.97587.1550>

Introduction

Whey proteins are among the most valuable functional ingredients derived from dairy industry. Whey proteins possess high nutritional quality, rapid digestibility, and multifunctional techno-functional properties such as solubility, emulsifying capacity, foaming ability, and fat-binding potential. The major whey protein fractions, including β -lactoglobulin, α -lactalbumin, immunoglobulins, lactoferrin, and bovine serum albumin, play a crucial role in improving texture, stability, and sensory quality of food formulations. Consequently, whey protein powders are extensively utilized in dairy products, functional foods, beverages, sports nutrition, and pharmaceutical formulations. Drying is a critical step in whey protein powder production, directly influencing product quality and functionality. Spray drying is the most widely used industrial method due to its cost-effectiveness and scalability; however, thermal stress during the process may induce protein denaturation, aggregation, reduced solubility, and wall deposition, ultimately decreasing powder yield and functional performance. Freeze drying, although effective in preserving protein structure, is limited by high energy consumption, long processing time, and low economic feasibility. Therefore, improving spray drying efficiency while maintaining or enhancing whey protein functionality remains a major industrial challenge. In recent years, ultrasound has gained attention as a non-thermal and environmentally friendly processing technology capable of modifying protein structures through cavitation-induced mechanical effects. High-intensity ultrasound can disrupt protein aggregates, alter secondary and tertiary structures, reduce particle size, and improve dispersion stability. Despite numerous studies reporting the positive effects of ultrasound on dairy proteins, comprehensive investigations on the combined effects of ultrasound pretreatment and drying methods on whey protein powder characteristics are still limited. Accordingly, the present study aimed to evaluate the influence of ultrasound pretreatment and to compare its effects with conventional spray drying and freeze drying on the physicochemical, structural, and functional properties of whey protein powder.

Materials and Methods

Pasteurized low-fat milk (1.5% fat) was used for whey protein extraction using an acid precipitation method. The obtained whey was subjected to ultrasound pretreatment using an ultrasonic bath operating at 20 kHz. Treatments were applied at power levels of 100, 200, and 300 W for durations of 5, 15, and 25 min. The treatment temperature was maintained below 30 °C using an ice-water bath to prevent thermal denaturation. Ultrasound-treated samples were dried using a spray dryer under controlled conditions (inlet temperature 170 °C, outlet temperature 70 °C, feed solids 20%). Control samples were produced without ultrasound pretreatment and dried either by spray drying or freeze drying. Freeze drying was performed at -80 °C followed by sublimation under vacuum (0.01 mbar). Powder yield, protein solubility, fat absorption capacity, emulsifying activity index,



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.97587.1550>

and foaming capacity were determined using standard methods. Structural and physicochemical properties were analyzed using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), particle size analysis, and zeta potential measurements. All experiments were conducted in triplicate. Statistical analysis was performed using ANOVA, and optimization of ultrasound conditions was carried out using response surface methodology.

Results and Discussion

Ultrasound pretreatment significantly improved spray drying performance and functional properties of whey protein powder ($p < 0.05$). Powder yield increased from 46.29% in the control spray-dried sample to a maximum of 72.27% in ultrasound-treated samples, primarily due to improved atomization, reduced feed viscosity, and decreased wall deposition. Protein solubility showed a substantial increase, reaching up to 98.11% after ultrasound pretreatment, which was attributed to protein unfolding, exposure of hydrophilic groups, and reduced aggregation. Although fat absorption capacity decreased in ultrasound-treated samples compared to freeze-dried controls, extended ultrasound treatment partially restored this property, indicating a balance between structural unfolding and reorganization. Emulsifying activity and foaming capacity were markedly enhanced in the optimized ultrasound-assisted spray-dried sample, correlating with reduced particle size, higher surface charge, and improved colloidal stability. FTIR analysis revealed changes in amide I and II bands, suggesting alterations in secondary protein structure without affecting the primary structure. XRD patterns indicated an amorphous structure for all samples, with ultrasound-treated powders exhibiting a more compact amorphous arrangement. SEM images confirmed that ultrasound-assisted spray drying produced smoother, more uniform particles with fewer surface irregularities. Optimization results identified ultrasound treatment at approximately 273.5 W for 25 min as the optimal condition for maximizing yield and functional performance.

Conclusion

This study demonstrates that ultrasound pretreatment prior to spray drying is an effective and practical strategy for enhancing the quality and functionality of whey protein powder. The synergistic combination of ultrasound and spray drying significantly improved powder yield, solubility, emulsifying activity, and foaming capacity while promoting favorable structural modifications such as reduced particle size, improved surface uniformity, and increased colloidal stability. Compared to conventional spray drying and freeze drying, ultrasound-assisted spray drying offered superior overall performance with higher industrial feasibility. From an application perspective, this approach provides a cost-effective, non-thermal, and environmentally friendly solution for producing high-quality whey protein powders suitable for use in functional foods, beverages, and protein-enriched formulations. The findings support the industrial potential of ultrasound technology as pretreatment step for optimizing whey protein powder production.

Keywords: Freeze drying, Functional properties, Spray drying, Structural modification, Ultrasound pretreatment, Whey protein powder

مقاله پژوهشی

جلد ۲۲، شماره ۲، خرداد- تیر ۱۴۰۵، ص. ۱۷۵-۱۹۲

کاربرد امواج فراصوت به عنوان پیش تیمار در بهبود عملکرد پودر پروتئین آب پنیر طی خشک کردن پاششی

مجید آرام نبی^۱ - حجت کاراژیان^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۱

چکیده

پروتئین های آب پنیر به دلیل ارزش تغذیه ای بالا و ویژگی های عملکردی مطلوب، کاربرد گسترده ای در صنایع غذایی دارند؛ با این حال، فرآیندهای خشک کردن متداول می توانند منجر به کاهش کیفیت عملکردی این ترکیبات شوند. هدف از این پژوهش، بررسی اثر پیش تیمار غیرحرارتی امواج فراصوت و مقایسه روش های خشک کردن پاششی و انجمادی بر ویژگی های فیزیکوشیمیایی، ساختاری و عملکردی پودر پروتئین آب پنیر بود. بدین منظور، از روش سطح پاسخ (RSM) جهت بررسی اثر توان های فراصوت (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ وات) و زمان های تیمار (۵، ۱۵ و ۲۵ دقیقه) استفاده شد. بازده تولید پودر، حلالیت در آب، ظرفیت جذب چربی، شاخص فعالیت امولسیون، ظرفیت کف کنندگی، ویژگی های ریزساختاری (SEM)، ساختار کریستالی (XRD)، طیف سنجی FTIR، پتانسیل زتا و اندازه ذرات مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که اعمال پیش تیمار فراصوت تأثیر معنی داری بر بهبود ویژگی های عملکردی دارد. بر اساس بهینه سازی مدل های ریاضی، شرایط بهینه در توان ۲۷۳/۴۷ وات و زمان ۲۴/۸ دقیقه تعیین گردید. در این شرایط، بازده تولید پودر به ۷۱/۴۲ درصد و حلالیت در آب به ۹۸/۱۱ درصد رسید که به ترتیب نشان دهنده افزایش ۵۴/۲۸ و ۱۷/۸۹ درصد نسبت به نمونه شاهد (بدون تیمار) بود. همچنین در نقطه بهینه، ظرفیت جذب چربی ۱۲۹/۸ درصد و مطلوبیت نهایی مدل ۰/۹۵۶ برآورد شد. نتایج نشان داد که زمان تیمار نقش برجسته تری نسبت به توان در بهبود ویژگی ها دارد. تحلیل های ساختاری (FTIR و XRD) و تصاویر SEM بیانگر اصلاح ریزساختار، کاهش تجمعات پروتئینی و ایجاد ذرات یکنواخت تر در نمونه های تیمار شده با امواج فراصوت بودند. همچنین، کاهش اندازه ذرات و افزایش قدر مطلق پتانسیل زتا در نمونه بهینه، پایداری کلوئیدی بالاتری را نشان داد. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می دهد که ترکیب پیش تیمار امواج فراصوت و خشک کن پاششی، روشی کارآمد، کم هزینه و سازگار با محیط زیست برای بهبود کیفیت و عملکرد پودر پروتئین آب پنیر بوده و قابلیت کاربرد صنعتی بالایی دارد.

واژه های کلیدی: پودر پروتئین آب پنیر، پیش تیمار امواج فراصوت، خشک کن پاششی، خشک کن انجمادی، خصوصیات عملکردی

مقدمه

پروتئین های آب پنیر شامل بتا-لاکتوگلوبولین، آلفا-لاکتالبومین، ایمونوگلوبولین ها، لاکتوفیرین و سرم آلبومین هستند که هر کدام دارای

ویژگی های خاصی مانند افزایش حلالیت، بهبود امولسیون کنندگی، خاصیت آنتی اکسیدانی و اثرات ایمنی زا هستند. این ترکیبات به دلیل داشتن ارزش بیولوژیکی بالا و جذب سریع، در صنایع غذایی، دارویی و ورزشی به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند (Kilara, & Vaghela, 2018; Xiong, Li, Boeren, Vervoort, & Hettinga, 2020). با توجه به اهمیت عملکردی پروتئین های آب پنیر، تولید این محصول با کیفیت بالا نقش مهمی در بهبود ویژگی های تغذیه ای و فیزیکی محصولات غذایی دارد. عواملی مانند حلالیت بالا، پایداری حرارتی، قابلیت ژل سازی، اندازه ذرات مناسب و

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران
۲- گروه علوم و صنایع غذایی، واحد تربت حیدریه، دانشگاه آزاد اسلامی، تربت حیدریه، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: hojjat.karazhiyan@iaui.ac.ir
<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.97587.1550>

فرآیند خشک کردن نسبت به روش‌های دیگر اشاره کرد (Marín, Alemán, Montero, & Gómez-Guillén, 2018; Kabeer, & Ledari, Milani, Shahidi, & Nagamanniammai, 2023; Golkar, 2024). به منظور بهبود کیفیت پودر پروتئین آب پنیر و افزایش کارایی فرآیند خشک کردن پاششی، می‌توان از روش‌های پیش‌تیمار مانند امواج فراصوت، تغییر در شرایط عملیاتی خشک‌کن و استفاده از حامل‌های پایدارکننده بهره برد. امواج فراصوت به عنوان یک روش غیرحرارتی، با کاهش اندازه ذرات و بهبود حلالیت پروتئین‌ها، می‌تواند کیفیت نهایی پودر را بهبود ببخشد و اثرات منفی دما را کاهش دهد. خشک کردن پاششی در تولید پودر پروتئین آب پنیر کاربرد اساسی دارد، اما چالش‌های مرتبط با افت کیفیت پروتئین، چسبندگی و کاهش بازده، بهینه‌سازی شرایط فرآیند را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد (Song et Prabhuzantye, Khaire, & Gogate, 2019; al., 2022).

پراپهوزانتی و همکاران (Prabhuzantye et al., 2019) بهبود فرآیند جداسازی غشایی آب پنیر و خشک‌کن پاششی پس از آن، به منظور بازیافت کنسانتره پروتئین آب پنیر را مورد بررسی قرار دادند. مطالعات انجام‌شده روی اولترافیلتراسیون همراه با فراصوت نشان داد که استفاده از امواج فراصوت باعث کاهش گرفتگی غشا و افزایش میزان شار تراوش می‌شود.

سرانبندی و همکاران (Sarabandi et al., 2022) کنسانتره پروتئین آب پنیر را تحت تیمار امواج فراصوت یا هیدرولیز نسبی با آنزیم آلکالاز قرار دادند. تیمارهای اصلاحی باعث افزایش محتوای اسیدهای آمینه آزاد و فعالیت آنتی‌اکسیدانی شدند و همچنین حلالیت، فعالیت امولسیفایری و توانایی کف‌زایی کنسانتره پروتئین آب پنیر را بهبود بخشیدند.

التایبانی و همکاران (Al-Thaibani et al., 2024) کنسانتره پروتئین آب پنیر شتر را در دماهای مختلف به روش خشک‌کن پاششی خشک نمودند و در زمان‌های مختلف تحت تیمار امواج فراصوت قرار دادند و سپس با استفاده از خشک‌کن انجمادی به پودر ریز تبدیل نمودند. مشاهده شد که تیمار فراصوت به طور قابل توجهی باعث افزایش تجزیه پروتئین در مقایسه با تیمار خشک‌کن پاششی می‌شود. هر دو تیمار روش خشک‌کن پاششی و فراصوت به میزان کمی فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌های کنسانتره پروتئین آب پنیر را افزایش دادند.

هدف از انجام این مطالعه، بررسی و مقایسه اثر دو روش فرآوری شامل خشک کردن پاششی (به عنوان روش حرارتی متداول) و فراصوت دهی (به عنوان روش غیرحرارتی) بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی (مانند اندازه ذرات، توزیع بار سطحی و بازده تولید پودر)، تکنولوژیکی (نظیر حلالیت و قابلیت جذب روغن) و عملکردی

توانایی تشکیل کف از جمله ویژگی‌های مهمی هستند که می‌توانند کیفیت و کاربرد آب پنیر را در محصولات مختلف افزایش دهند. تولید پودر پروتئین آب پنیر با کیفیت می‌تواند تأثیر بسزایی در بهبود بهره‌وری صنعت لبنیات و افزایش ارزش اقتصادی این محصول داشته باشد (Kumar, Chauhan, Shinde, Subramanian, & Nadanasabapathi, 2018; Kandasamy et al., 2021).

بنابراین، با توجه به ارزش تغذیه‌ای و کاربردهای گسترده پروتئین‌های آب پنیر، انجام فرآیندهای تولید و بهبود خصوصیات عملکردی آن‌ها از طریق فناوری‌های نوین می‌تواند نقش کلیدی در ارتقای کیفیت محصولات غذایی و افزایش بهره‌وری صنعت لبنیات ایفا کند.

تکنولوژی‌های مختلفی برای اصلاح ویژگی‌های ساختاری و فیزیکوشیمیایی پروتئین‌ها به کار گرفته شده‌اند. در میان این فناوری‌ها، امواج فراصوت به عنوان یک تکنیک غیرحرارتی به طور گسترده برای اصلاح پروتئین‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (Jambrak, Mason, Lelas, Paniwnyk, & Herceg, 2014).

فراصوت به طور گسترده در صنایع غذایی در عملیات‌های مختلفی مانند همگن‌سازی، آب‌زدایی، امولسیون‌سازی، نرم کردن گوشت، غیرفعال‌سازی آنزیم‌ها، کاهش اندازه ذرات و بسیاری رویکردهای دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. فراصوت با فرکانس پایین معمولاً به عنوان تولیدکننده حفره‌زایی در محلول‌ها به کار می‌رود، در حالی که فرکانس‌های بالاتر (۵-۱۰ مگاهرتز) برای اهداف تحلیلی و کنترل فرآیند استفاده می‌شوند. این فناوری با ایجاد حباب‌های ریز و انفجار آنها، موجب تخریب دیواره سلولی و افزایش نفوذپذیری بافت مواد غذایی می‌شود. کاربرد امواج فراصوت به عنوان پیش‌تیمار در فرآیند خشک کردن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا با ایجاد ریزکانال‌هایی در ساختار ماده غذایی، مسیر خروج آب را هموار کرده و به طور چشمگیری زمان خشک شدن و مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. این پیش‌تیمار در نهایت منجر به تولید محصولی با بافت مطلوب‌تر، قابلیت جذب آب مجدد بالاتر و حفظ بهتر ویژگی‌های حسی و تغذیه‌ای می‌شود (Jambrak, Mason, Lelas, Paniwnyk, & Herceg, 2014).

خشک‌کن پاششی یکی از رایج‌ترین و کارآمدترین روش‌های حرارتی برای خشک کردن و فرآوری پروتئین آب پنیر است که در صنایع غذایی و لبنی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Both, Boom, & Haas, Kim, Atamer, Wu, & Dallas, Schutyser, 2020; 2024). خشک کردن انجمادی یا لیوفیلیزاسیون به دلیل حفظ ساختار و ترکیبات شیمیایی ماده، به ویژه برای مواد حساس به حرارت بسیار مؤثر است. این روش به ویژه برای محصولاتی که نیاز به حفظ ساختار و خواص خود دارند، مناسب است. از معایب این روش می‌توان به هزینه‌های بالای تجهیزات و مصرف انرژی زیاد و زمان طولانی‌تر

ظرفیت جذب چربی و شاخص فعالیت امولسیون بود برای انجام آزمون‌های بعدی انتخاب شدند.

تولید پودر پروتئین آب پنیر با روش خشک کن انجمادی/پاششی

پودر پروتئین آب پنیر شیر به دو روش خشک کن انجمادی (به عنوان کنترل خشک کن انجمادی) و خشک کن پاششی (به عنوان کنترل خشک کن پاششی) بدون پیش فرآیند تولید شد. به طور خلاصه، خشک کن انجمادی روی نمونه‌های از پیش منجمد شده در دمای -80°C درجه سانتی‌گراد با استفاده از خشک کن انجمادی (Telstar freeze-dryer, Terrassa, Spain) تحت فشار 0.1 میلی‌بار انجام شد (Al-Thaibani et al., 2024). فرآیند خشک کن پاششی با استفاده از یک خشک کن پاششی اجرا شد که در آن شرایط عملیاتی زیر اعمال شدند: دمای ورودی 170°C درجه سانتی‌گراد و دمای خروجی 70°C درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. نرخ تغذیه جامد 20% و رطوبت نسبی حدود $8/5\%$ تنظیم شد. نرخ جریان هوای خشک کن $7/5$ متر مکعب بر دقیقه بود. فشار پاشش 0.52 مگاپاسکال در کل فرآیند خشک کردن ثابت نگه داشته شد (Al-Thaibani et al., 2024).

بازده تولید پودر پروتئین آب پنیر

بازده تولید پودر پروتئین آب پنیر از طریق جمع‌آوری پودر آزاد در بخش مخروطی پایین محفظه خشک کن طبق رابطه ۱ محاسبه شد.

$$(1) \times 100 = \text{بازده خشک کردن } (\%) \text{ جرم آب پنیر ورودی/جرم پودر آب پنیر خشک جمع شده}$$

تعیین خواص عملکردی و تکنولوژیکی پودر پروتئین آب پنیر

حلالیت پروتئین طبق روش گزارش شده توسط الشمسی و همکاران (Al-Shamsi, Mudgil, Hassan, & Maqsood, 2018) اندازه‌گیری شد. برای این منظور، 200 میلی‌گرم از نمونه‌های پودر پروتئین آب پنیر در 20 میلی‌لیتر آب دیونیزه حل شد و به مدت 2 دقیقه ورتکس شد. سپس، محلول به مدت 15 دقیقه در دمای 25°C درجه سانتی‌گراد و با نیروی $7500 \times \text{g}$ سانتریفیوژ شد. میزان حلالیت پروتئین بر اساس مقدار پروتئین موجود در مایع رویی (mg پروتئین بر g نمونه) با استفاده از روش بیوره تعیین شد.

(از جمله خاصیت امولسیون‌کنندگی و کف‌کنندگی) پودر پروتئین آب پنیر است. اگرچه خشک کردن پاششی به طور گسترده در صنعت کاربرد دارد، اما چالش‌های مرتبط با تخریب حرارتی پروتئین‌ها و کاهش کیفیت محصول، ضرورت به کارگیری روش‌های مکمل یا جایگزین را ایجاد می‌کند. استفاده هم‌زمان و مقایسه‌ای دو رویکرد حرارتی و غیرحرارتی در فرآوری پودر پروتئین آب پنیر و بررسی اثرات افتراقی آن‌ها بر طیف وسیعی از ویژگی‌های کیفی، نوآوری این پژوهش است. با توجه به اینکه مطالعات محدودی به مقایسه سیستماتیک این دو روش پرداخته‌اند، یافته‌های این پژوهش می‌تواند زمینه‌ساز بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و دستیابی به محصولی با کیفیت برتر و کارایی عملکردی بالاتر گردد.

مواد و روش‌ها

مواد

شیر پاستوریزه کم‌چرب برند کاله ($1/5\%$ چربی و $9/7\%$ ماده خشک) تهیه شد. پس از انتقال به آزمایشگاه، در دمای 4°C درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند و ظرف 2 ساعت فرآوری شدند.

روش‌ها

استخراج پروتئین‌های آب پنیر

پروتئین‌های آب پنیر از شیر طبق روش جعفر و همکاران (Jafar, Kamal, Mudgil, Hassan, & Maqsood, 2018) استخراج شد.

پیش تیمار آب پنیر با امواج فراصوت

پیش تیمار امواج فراصوت بر روی آب پنیر با استفاده از فراصوت نوع حمام (bath-type EGS5HD, Enge Solutions, São Paulo-SP, Brazil) و بر اساس روش احمدی و همکاران (Ahmadi, Razavi, & Varidi, 2017) انجام شد. به طور خلاصه، آب پنیر تحت تیمار امواج فراصوت حمام با فرکانس 20 کیلوهرتز به مدت 5 ، 15 و 25 دقیقه در توان‌های 100 ، 200 و 300 وات قرار گرفت. در طول فرآیند، دمای نمونه‌ها با استفاده از حمام یخ-آب زیر 30°C درجه سانتی‌گراد حفظ شدند. نمونه‌های تیمار شده با امواج فراصوت سپس با استفاده از دستگاه خشک کن پاششی (Armfield, UK) خشک شدند تا پودر پروتئین آب پنیر ریزدانه تولید شود و تا زمان انجام آزمایش‌های بعدی در دمای 18°C درجه سانتی‌گراد ذخیره شدند. **جدول ۱** طراحی آزمون‌ها را نشان می‌دهد. بازده تولید پودر، حلالیت پروتئین در آب و ظرفیت جذب چربی به عنوان پاسخ جهت بهینه‌سازی شرایط امواج فراصوت در نظر گرفته شدند. یک نمونه بهینه که دارای بالاترین بازده تولید پودر، حلالیت پروتئین در آب،

جدول ۱- طراحی آزمون‌ها
Table 1- Method's design

اجرا	توان-وات	زمان-دقیقه
Run	Power (wat)	Time (min)
1	100	5
2	200	5
3	300	5
4	100	15
5	200	15
6	300	15
7	100	25
8	200	25
9	300	25

ظرفیت جذب چربی

ظرفیت جذب چربی مطابق روش توصیف شده توسط مقصود و همکاران (Maqsood et al., 2019) طبق رابطه (۲) بررسی شد. ۱۰۰ میلی گرم از نمونه‌های پودر پروتئین آب پنیر با ۱۰۰۰ میکرولیتر روغن آفتابگردان مخلوط شد و به مدت ۱ دقیقه ورتکس شد. سپس تعلیق پروتئین در روغن با سرعت $13600 \times g$ به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. مایع رویی جدا شده و لوله‌ها در زاویه ۴۵ درجه به مدت ۱ تا ۲ دقیقه تخلیه شدند.

(۲) $(\%) \text{ ظرفیت جذب چربی} = (\text{وزن روغن جذب شده}) / (\text{وزن نمونه پروتئین}) \times 100$

تحلیل ساختاری مادون قرمز

طیف‌های جذب مادون قرمز نمونه‌های پودر پروتئین آب پنیر با استفاده از طیف‌سنج تبدیل فوریه مادون قرمز اندازه‌گیری شدند. این اندازه‌گیری در بازه فرکانسی ۴۰۰ تا 4000 cm^{-1} انجام شد. برای هر طیف، ۳۲ اسکن از اینترفروگرام‌ها ثبت شدند و وضوح طیفی برابر با 4 cm^{-1} در نظر گرفته شد (Al-Shamsi et al., 2018).

تحلیل ساختاری کریستالی

با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس ساختار کریستالی نمونه‌ها بررسی شد. شرایط عملیاتی این آزمون شامل طول موج پرتو ایکس (۸) برابر با $1/5418$ آنگستروم، ولتاژ ۴۰ کیلوولت و دقت ۳۰ میلی آمپر بود. نمونه‌های پودری درون یک صفحه آلومینیومی قرار گرفتند و پروفایل پراش اشعه ایکس برای زاویه 2θ در محدوده ۱۰ تا ۵۰ درجه با نرخ اسکن $0.2^\circ/\text{s}$ درجه بر دقیقه ثبت شد.

ریزساختار نمونه‌های آب پنیر

ویژگی‌های ریزساختاری نمونه‌های آب پنیر تیمارشده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بزرگنمایی ۱۵۰۰ برابر بررسی شدند (Razavi, Kenari, Farmani, & Jahanshahi, 2020).

شاخص فعالیت امولسیون

شاخص فعالیت امولسیون نمونه‌های مختلف پودر پروتئین آب پنیر مطابق روش توصیف شده توسط الشمسی و همکاران (Al-Shamsi et al., 2018) طبق رابطه (۳) اندازه‌گیری شد. ۳۰۰ میلی گرم از نمونه‌های مختلف با ۳۰ میلی لیتر آب دیونیزه (۱٪ وزنی/حجمی) مخلوط و pH روی ۷ تنظیم شد. سپس ۱۰ میلی لیتر روغن آفتابگردان اضافه شد. مخلوط‌ها با استفاده از هموژنایزر در سرعت ۲۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱ دقیقه هموژن شدند. پس از آن، ۵۰ میکرولیتر از امولسیون از پایین ظرف در ۰ و ۱۰ دقیقه نمونه‌برداری و با ۵ میلی لیتر محلول ۰/۱٪ سدیم دودسیل سولفات (SDS) مخلوط شد. جذب نوری محلول رقیق شده در ۵۰۰ نانومتر با استفاده از طیف‌سنج اندازه‌گیری شد.

(۳) $\text{وزن پروتئین} \times 25 / (2 \times 2.303 \times A_0) = \text{شاخص فعالیت امولسیون} (\%)$
که در آن A_0 جذب نمونه بلافاصله پس از همگن سازی است.

ظرفیت کف‌کنندگی

ظرفیت کف‌کنندگی نمونه‌های پودر پروتئین آب پنیر طبق روش گزارش شده توسط مقصود و همکاران (Maqsood et al., 2019)

اندازه ذرات و توزیع بار سطحی

پتانسیل زتا و توزیع اندازه ذرات بر اساس روش توصیف شده توسط احمد و همکاران (Ahmad et al., 2019) و با استفاده از دستگاه زتاسایزر ارزیابی شد. برای اندازه گیری پتانسیل زتا، نمونه های آب پنیر با غلظت ۰/۱ درصد در ۰/۱ میلی مولار KCl حل شدند، pH محلول روی ۶ تنظیم شد، سپس نمونه ها به مدت یک شب برای تعادل سازی نگهداری شدند و پس از آن سنجش انجام شد.

تجزیه و تحلیل آماری و بهینه یابی

در این پژوهش، جهت بررسی اثرات تیمار فراصوت و بهینه یابی شرایط فرآیند، از روش سطح پاسخ (RSM) در قالب طرح مرکب مرکزی وجه مرکز (Face-Centered CCD) استفاده شد. متغیرهای مستقل شامل توان فراصوت (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ وات) و زمان فراصوت (۵، ۱۵ و ۲۵ دقیقه) بودند که در مجموع ۹ ترکیب تیماری توسط نرم افزار Design-Expert (نسخه ۱۱) ارائه و به صورت تصادفی اجرا گردید. جهت تعیین مدل ریاضی حاکم بر هر پاسخ، از آنالیز واریانس (ANOVA) و شاخص های آماری نظیر ضریب تبیین (R^2) و آزمون عدم برازش (Lack of Fit) استفاده شد. برای پارامترهایی که رفتار غیرخطی داشتند (نظیر حلالیت)، مدل درجه دوم (Quadratic) و برای سایر پارامترها، مدل خطی (Linear) جهت ترسیم سطوح پاسخ و تعیین نقطه بهینه مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، جهت مقایسه میانگین تیمارها در موارد لازم، از آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح اطمینان ۹۵٪ با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۰ استفاده شد.

نتایج و بحث

بازده خشک کردن

در این پژوهش از دو روش خشک کن انجمادی و پاششی و پیش تیمار امواج فراصوت جهت خشک کردن آب پنیر استفاده شد. نتایج مربوط به بازده خشک کردن نمونه های مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است. در روش خشک کن انجمادی ۳۳/۲۵٪ و در روش پاششی ۴۶/۲۹٪ بود. پرابهوزانتی و همکاران (Prabhuzantye et al., 2019) بازده پودر آب-پنیر اسیدی بدون پیش تیمار که با روش خشک کن پاششی تهیه شده بود را حدود ۳۱ درصد گزارش نمودند. در پژوهش دیگر پیرس و همکاران (Pierce, Skonberg, Dumas, & Jin, 2024; Calder, ۲۰۲۴) بازده بازیابی پروتئین را حدود ۵۷٪ اعلام نمودند. آنها بازده را به صورت جرم لخته حاصل بعد از خشک کن انجمادی نسبت به جرم آغازین آب پنیر محاسبه نمودند و بازیابی پروتئین از مایع قبل از خشک سازی را به صورت لیوفیلیز انجام دادند

(Pierce et al., 2024). مطالعات پیشین گزارش کرده اند که خشک کن پاششی معمولاً بیشترین بازده را می دهد (زیرا تلفات چسبندگی/رسوب روی دیواره وجود ندارد) ولی بسته به نمونه می تواند به مقادیر مشابه نزدیک شود. به ویژه زمانی که غلظت سازی و سیستم های بازیابی سیکلون مناسب برقرار باشد (Wang et al., 2020; Singh, Pandey, Singh, & Dar, 2024).

جدول ۲ مقادیر بازده تولید پودر پروتئین آب پنیر خشک شده به روش خشک کردن پاششی پس از اعمال پیش تیمار فراصوت را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، بازده تولید پودر در تمام تیمارهای امواج فراصوت به طور معنی داری ($p < 0.05$) بالاتر از شاهد بوده است. در تیمار شاهد، بازده خشک کن انجمادی و پاششی به ترتیب برابر با ۳۳/۲۵ و ۴۶/۲۹ درصد به دست آمد، در حالی که اعمال پیش تیمار فراصوت موجب افزایش بازده تا دامنه ای بین ۵۳/۱۷ تا ۷۲/۲۷ درصد گردید. بیشترین بازده در شرایط توان ۳۰۰ وات و زمان ۲۵ دقیقه (ران ۹) به مقدار ۷۲/۲۷ درصد ثبت شد. به طور کلی، افزایش توان و زمان فراصوت تأثیر مثبتی بر بازده تولید داشت؛ به گونه ای که با افزایش توان از ۱۰۰ به ۳۰۰ وات و زمان از ۵ به ۲۵ دقیقه، روندی صعودی در بازده مشاهده گردید. این موضوع می تواند به اثرات مکانیکی و کاویتاسیونی امواج امواج فراصوت نسبت داده شود که منجر به تغییر در ساختار پروتئین ها، کاهش ویسکوزیته محلول و بهبود خصوصیات رئولوژیکی می شود. این تغییرات در نهایت سبب بهبود پاشش محلول در محفظه خشک کن پاششی، کاهش چسبندگی ذرات به دیواره محفظه و افزایش جمع آوری پودر در بخش مخروطی دستگاه می گردد (Prabhuzantye et al., 2019; Haas et al., 2024). می توان نتیجه گرفت که فراصوت نه تنها به عنوان یک پیش تیمار مؤثر در بهبود بازده فرآیند خشک کردن پاششی عمل می کند، بلکه می تواند محدودیت های ذاتی این روش از جمله چسبندگی و تجمع ذرات را تا حد زیادی برطرف نماید. به طور کلی، یافته های این تحقیق نشان می دهند که استفاده از امواج فراصوت پیش از خشک کردن، یک راهکار کارآمد برای افزایش راندمان تولید پودر پروتئین آب پنیر است. این امر از دیدگاه صنعتی حائز اهمیت بوده و می تواند علاوه بر کاهش ضایعات و هزینه های تولید، امکان بهره برداری اقتصادی تر از پروتئین های با ارزش تغذیه ای آب پنیر را فراهم سازد.

مطالعه ای در حوزه مسیل کازئین نشان داد که امواج فراصوت قبل از خشک کن پاششی باعث بهبود جریان پذیری پودر و رفتار جذب رطوبت آن می شود (Song et al., 2022). مقایسه تجاری بین خشک کن پاششی و انجمادی برای کنسانتره پروتئینی آب پنیر توسط هس و همکاران (Haas et al., 2024) انجام شد که تفاوت

معنی‌داری در حفظ پروتئین‌های زیست فعال بین دو روش وجود نداشت. همچنین خشک‌کن انجمادی در شرایط پس از چند مرحله پاستوریزاسیون، مزیت قابل‌توجهی بر خشک‌کن پاششی نداشت (Haas et al., 2024).

حلالیت در آب پروتئین

جدول ۲ مقادیر حلالیت پودر پروتئین آب‌پنیر تحت شرایط مختلف تیمار امواج فراصوت و دو روش خشک‌کردن پاششی و انجمادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اعمال پیش‌تیمار فراصوت اثر معنی‌داری بر افزایش حلالیت داشته است ($p < 0.05$). در نمونه شاهد که تنها با روش خشک‌کردن پاششی بدون تیمار امواج فراصوت تهیه شد، حلالیت ۸۳/۲۲٪ اندازه‌گیری شد که به‌طور معناداری پایین‌تر از سایر تیمارها بود. در حالی که در روش خشک‌کردن انجمادی، میزان حلالیت به ۹۰/۶۸٪ رسید که نسبت به شاهد افزایش داشت، اما همچنان کمتر از تیمارهای امواج فراصوت بود. با افزایش توان و زمان فراصوت، روندی صعودی در حلالیت پروتئین‌ها مشاهده شد. در توان ۱۰۰ وات و زمان ۵ دقیقه، مقدار حلالیت ۹۲/۱۷٪ به‌دست آمد، در حالی که در توان ۳۰۰ وات و زمان ۱۵ دقیقه، این مقدار به ۹۸/۰۵٪ افزایش یافت. بیشترین مقدار حلالیت نیز در توان ۳۰۰ وات و زمان ۲۵ دقیقه ثبت شد (۹۸/۱۱٪). از نظر آماری، این تیمار با تیمار ران ۶ (توان ۳۰۰ وات و زمان ۱۵ دقیقه) در یک گروه قرار گرفت و اختلاف معنی‌داری نشان نداد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که اعمال فراصوت با شدت بالا و زمان متوسط تا طولانی می‌تواند حلالیت پروتئین وی را به حداکثر برساند، اما افزایش بیشتر زمان پس از نقطه بهینه، اثر افزایشی محسوسی نخواهد داشت. امواج امواج فراصوت منجر به تشکیل و انفجار حباب‌های میکروسکوپی در محلول می‌شوند که اثرات مکانیکی و حرارتی شدیدی ایجاد کرده و موجب باز شدن ساختارهای دوم و سوم پروتئین‌ها، آشکار شدن گروه‌های آب‌دوست و در نتیجه افزایش برهم‌کنش پروتئین‌ها با مولکول‌های آب می‌گردد. همچنین، فراصوت باعث کاهش تجمعات پروتئینی و توزیع یکنواخت‌تر ذرات شده که در نهایت حلالیت را بهبود می‌بخشد.

مطالعات پیشین نیز یافته‌های حاضر را تأیید می‌کنند. در مطالعه کلاسیک ماوروپولو و کسکوسکی (Mavropoulou, & Kosikowski, 1973) حلالیت پروتئین‌های وی در محدوده ۹۱/۴ تا ۹۹/۷٪ گزارش شد که با مقادیر به‌دست‌آمده در این تحقیق مطابقت دارد. در پژوهشی جدیدتر، التایبانی و همکاران (Al-Thaibani et al., 2024) بر روی پروتئین شیر شتر نشان دادند که تیمار امواج فراصوت به‌مدت ۱۵ دقیقه موجب افزایش حلالیت تا ۱۰۰٪ شد، در

حالی که نمونه خشک‌شده با خشک‌کن پاششی در دمای بالا (۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) تنها حلالیت ۹۲/۷٪ داشت. این نتایج بیانگر اثر مثبت امواج فراصوت بر ساختارپذیری پروتئین‌ها و کاهش حساسیت آن‌ها به فرآیند خشک کردن است. همچنین، مینج و اناند (Minj, & Anand, 2022) و جین و همکاران (Jin et al., 2022) گزارش کردند که اعمال امواج فراصوت علاوه بر افزایش بازده فرآیند خشک‌کن پاششی، موجب بهبود ویژگی‌های عملکردی پودرهای پروتئینی شامل جریان‌پذیری، حلالیت و پایداری امولسیون می‌شود. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق در کنار شواهد علمی موجود نشان می‌دهد که امواج فراصوت پیش از خشک‌کن پاششی نه تنها بازده تولید را افزایش می‌دهد بلکه نقش مهمی در افزایش حلالیت پروتئین آب پنیر دارد. در حالی که روش خشک‌کردن انجمادی علی‌رغم حفظ نسبی ساختار پروتئین‌ها، حلالیت کمتری نشان داد (حدود ۹۰/۶۸٪)، اعمال امواج فراصوت موجب ارتقای این ویژگی تا مقادیر نزدیک به ۹۸٪ گردید.

ظرفیت جذب چربی

ظرفیت جذب چربی به‌عنوان یکی از ویژگی‌های کلیدی عملکردی پروتئین‌های شیر، توانایی پروتئین را در برهم‌کنش با ترکیبات چربی و نگهداری روغن در ماتریس پودری نشان می‌دهد. همان‌طور که در **جدول ۲** مشاهده می‌شود، ظرفیت جذب چربی نمونه‌های تیمار شده با امواج فراصوت و خشک‌کن پاششی (۱۱۹/۸ تا ۱۲۹/۸٪) به‌طور معنی‌داری ($p < 0.05$) پایین‌تر از نمونه‌های شاهد خشک شده به روش پاششی (۱۵۶٪) و انجمادی (۱۶۱/۲٪) بوده است. این کاهش ظرفیت در تیمارهای امواج فراصوت را می‌توان به تغییرات ساختاری پروتئین نسبت داد. امواج فراصوت با پدیده‌های کاویتاسیون، برشی و تولید رادیکال‌های آزاد سبب بازآرایی و دناتوراسیون جزئی پروتئین‌ها می‌شوند (Chandrapala, Zisu, Kenari, & Razavi, 2012; Ashokkumar, 2021). چنین تغییراتی معمولاً باعث بازشدگی بخشی از ساختار سوم پروتئین و برون‌نمایی گروه‌های قطبی می‌شود که منجر به کاهش در دسترس بودن گروه‌های آب‌گریز برای برهم‌کنش با مولکول‌های چربی می‌گردد (Jambrak et al., 2014). به همین دلیل در تیمارهای ۵ دقیقه‌ای، ظرفیت جذب چربی در کمترین مقدار (۱۱۹/۸-۱۲۳٪) قرار گرفت. با افزایش زمان تیمار به ۱۵ و ۲۵ دقیقه، افزایش نسبی در ظرفیت جذب چربی مشاهده شد (تا ۱۲۹/۸٪). این روند می‌تواند ناشی از دو پدیده متضاد باشد: از یک‌سو، افزایش زمان تیمار امواج فراصوت می‌تواند بازشدگی بیشتری در ساختار پروتئین و آشکار شدن بخش‌هایی از نواحی هیدروفوبیک را به همراه داشته باشد که موجب افزایش جذب چربی می‌شود؛ از سوی دیگر، اعمال بیش از حد

انرژی فراصوت می تواند منجر به تجمع و بازآرایی دوباره پروتئین ها و در نتیجه محدود شدن دسترسی گروه های هیدروفوبیک گردد. در نتایج حاضر، به نظر می رسد اثر غالب در زمان های بالاتر، همان باززدگی و افزایش سطح تماس پروتئین با روغن بوده است. در نمونه انجمادی، فرآیند خشک کردن در دمای پایین و بدون تنش حرارتی شدید انجام می شود، لذا ساختار پروتئین ها تقریباً دست نخورده باقی می ماند و گروه های هیدروفوبیک بیشتری برای برهم کنش با روغن در دسترس قرار دارند (O'Callaghan, & Hogan, 2013). در خشک کن پاششی اگرچه دمای بالا می تواند تا حدی دناتوراسیون ایجاد کند، اما ایجاد ذرات متخلخل تر نسبت به بکار گیری پیش تیمار فراصوت و سپس خشک کردن پاششی، به حفظ ظرفیت جذب چربی بیشتر کمک می کند (Schmitz-Schug, Kulozik, & Foerst, 2016). مطالعات مشابه نیز نتایج حاضر را تأیید می کنند. مقصود و همکاران (Maqsood et al., 2019) گزارش کردند که کاربرد امواج فراصوت قبل از خشک کن پاششی در پروتئین آب پنیر شتر، موجب کاهش معنی دار ظرفیت جذب چربی (۱۱۹-۱۲۵٪) در مقایسه با نمونه های شاهد خشک کن پاششی (۱۵۳-۱۶۰٪) و انجمادی (۱۶۱٪) می شود (Maqsood et al., 2019). همچنین چاندراپالا و همکاران (Chandrapala et al., 2012) و جامبارک (Jambrak et al.,)

(2014) اثر مشابهی را در پروتئین های شیر گزارش کردند که نشان دهنده کاهش توانایی نگهداری روغن به دلیل تغییرات ساختاری ناشی از کاویتاسیون فراصوت است. سونگ و همکاران (Song et al., 2022) در مطالعه ای بررسی نمودند که پیش تیمار فراصوت باعث بهبود قابل توجهی در ویژگی های جریان پذیری پودر و جذب رطوبت کنسانتره میسل کازئین می شود. با افزایش شدت انرژی امواج فراصوت، میانگین اندازه ذرات پودر (D_{50}) افزایش و چربی سطح کاهش یافت و افزایش آبدوستی سطحی مشاهده شد؛ همه این عوامل اثرات بهبوددهنده ای بر خصوصیات عملکردی پودر دارند. در پژوهش دیگر ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2018) نشان دادند که با افزایش زمان پیش تیمار فراصوت، ویژگی هایی نظیر حلالیت، خواص امولسیون و ساختار ثانویه کنسانتره میسل کازئین به طور معنی داری بهبود یافت. همچنین، افزایش هیدروفوبیسیتة سطح و کاهش اندازه ذرات تأیید شد. به طور کلی، می توان نتیجه گرفت که فرآیند امواج فراصوت پیش از خشک کن پاششی ظرفیت جذب چربی پودر پروتئین آب پنیر را کاهش می دهد، اما با افزایش زمان تیمار تا حدودی این ویژگی بهبود می یابد. بالاتر بودن ظرفیت جذب چربی در نمونه انجمادی نیز نشان دهنده مزیت این روش در حفظ ویژگی های عملکردی پروتئین است.

جدول ۲- مقادیر بازده تولید پودر پروتئین آب پنیر (%، حلالیت در آب (% و ظرفیت جذب چربی (%)

Table 2- Values of Whey Protein powder yield (%), water solubility (%), and oil absorption capacity (%)

اجرا	توان	زمان	بازده تولید	حلالیت در آب	ظرفیت جذب چربی
Run	Power (wat)	Time (min)	Product Yield (%)	Water solubility (%)	Oil absorption capacity (%)
1	100	5	53.17 ^h	92.17 ^g	119.80 ^h
2	200	5	58.69 ^f	93.37 ^f	121.50 ^g
3	300	5	64.92 ^d	94.25 ^e	123.00 ^f
4	100	15	57.88 ^g	95.19 ^d	124.20 ^e
5	200	15	63.19 ^e	96.44 ^c	124.70 ^e
6	300	15	66.66 ^c	98.05 ^a	127.10 ^d
7	100	25	63.47 ^e	96.48 ^c	127.30 ^d
8	200	25	68.93 ^b	97.53 ^b	129.00 ^c
9	300	25	72.27 ^a	98.11 ^a	129.80 ^c

* حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی دار بین نمونه ها می باشد (p<0.05)

(p<0.05) *Different letters the indicator Significant difference It is between samples

معادله نهایی حاصل از برازش مدل خطی به صورت زیر ارائه شد:

$$+63.24 + 4.89 * A + 4.65 * B$$

این معادله نشان می دهد که هم توان و هم زمان تیمار امواج فراصوت به صورت خطی و مثبت بر بازده خشک کردن اثرگذارند. به عبارت دیگر، با افزایش هر یک از این عوامل، بازده خشک کردن به شکل معنی داری افزایش می یابد. ضریب رگرسیون مربوط به توان (۴/۸۹) کمی بزرگتر از زمان (۴/۶۵) است، بنابراین می توان گفت

بهینه سازی و تعیین فرمولاسیون بهینه

بازده خشک کردن

به منظور بررسی اثر فاکتورهای توان فراصوت (P, Watt) و زمان تیمار (T, min) بر بازده خشک کردن، مدل های مختلف ریاضی شامل خطی (Linear)، دو فاکتور تعاملی (2FI)، درجه دوم (Quadratic) و مکعبی (Cubic) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مدل خطی (Linear) با توجه به مقادیر آماره های F و P، بهترین برازش را برای توصیف تغییرات بازده خشک کردن دارد.

افزایش توان اثر بیشتری بر بازده خشک کردن نسبت به افزایش زمان دارد.

به طور کلی، تحلیل‌ها نشان دادند که مدل خطی ساده‌ترین و در عین حال قوی‌ترین مدل برای پیش‌بینی بازده خشک کردن در شرایط این مطالعه است و می‌تواند به عنوان ابزاری کاربردی برای بهینه‌سازی شرایط فرآیند استفاده شود. این نتایج با مطالعات مشابهی که نشان داده‌اند افزایش توان و زمان تیمار امواج فراصوت سبب بهبود انتقال جرم و افزایش راندمان خشک کردن می‌شود، هم‌راستا است.

حلالیت در آب

نتایج نشان داد که مدل Quadratic بهترین برازش را برای پیش‌بینی تغییرات حلالیت دارد. معادله نهایی برازش مدل درجه دوم به صورت زیر است:

$$\text{Solubility} = +96.61 + 1.10 \cdot A + 2.05 \cdot B - 0.11 \cdot A \cdot B - 0.072 \cdot A^2 - 1.24 \cdot B^2$$

این معادله نشان می‌دهد که در شرایط پایه، مقدار حلالیت ۹۶/۶۱ درصد است. افزایش توان (A) و زمان (B) هر دو به طور مستقیم باعث افزایش حلالیت می‌شوند، اما اثر زمان (ضریب ۲/۰۵) بیش از توان (ضریب ۱/۱۰) است. با این حال، جمله‌های درجه دوم به‌ویژه $-1.24B^2$ - نشان می‌دهند که تیمار بیش از حد طولانی می‌تواند موجب کاهش حلالیت شود. این رفتار به دلیل تغییر ساختاری در پروتئین‌ها و احتمال دناتوراسیون یا تجمع پروتئینی در زمان‌های طولانی‌تر قابل توضیح است. به طور کلی، این نتایج نشان می‌دهند که تیمار فراصوت در بازه بهینه توان و زمان باعث افزایش معنی‌دار حلالیت پروتئین آب‌پنیر می‌شود. اما افزایش بیش از حد زمان به دلیل اثر منفی درجه دوم، می‌تواند موجب افت حلالیت گردد. بنابراین، انتخاب شرایط بهینه (توان متوسط و زمان کنترل‌شده) اهمیت زیادی در دستیابی به بیشترین حلالیت دارد.

ظرفیت جذب چربی

نتایج نشان داد که مدل خطی (Linear) بهترین برازش را دارد. معادله نهایی مدل خطی برازش‌شده برای پیش‌بینی ظرفیت جذب چربی به صورت زیر است:

$$\text{FAC} = +125.16 + 1.43 \cdot A + 3.63 \cdot B$$

این معادله نشان می‌دهد که مقدار پایه ظرفیت جذب چربی (در شرایط بدون تیمار) حدود ۱۲۵/۱۶ درصد است. هر واحد افزایش در توان، به طور متوسط ۱/۴۳ درصد و هر واحد افزایش در زمان، به طور متوسط ۳/۶۳ درصد باعث افزایش ظرفیت جذب چربی می‌شود. بنابراین زمان تیمار نسبت به توان، اثر قوی‌تری بر افزایش این ویژگی

دارد. از دیدگاه فیزیکوشیمیایی، افزایش ظرفیت جذب چربی پس از تیمار فراصوت را می‌توان به تغییرات ساختاری پروتئین‌ها نسبت داد. امواج فراصوت از طریق پدیده کاویتاسیون موجب باز شدن ساختار سوم و چهارم پروتئین، آشکارسازی گروه‌های هیدروفوب و افزایش سطح تماس پروتئین با چربی‌ها می‌شوند. در زمان‌های طولانی‌تر، این تغییرات ساختاری بیشتر تقویت می‌گردد و ظرفیت پروتئین برای برهم‌کنش با لیپیدها افزایش می‌یابد.

به طور کلی، نتایج به‌روشنی بیانگر آن است که تیمار فراصوت با افزایش زمان و توان (به‌ویژه زمان) می‌تواند ظرفیت جذب چربی پروتئین آب‌پنیر را به شکل معنی‌داری ارتقا دهد. این ویژگی از دیدگاه کاربردی اهمیت زیادی دارد، زیرا افزایش ظرفیت جذب چربی موجب بهبود بافت، طعم و خواص عملکردی پروتئین‌ها در محصولات غذایی غنی‌شده با چربی می‌شود.

انتخاب شرایط بهینه

در جدول ۳ نتایج بهینه‌سازی شرایط تیمار فراصوت برای دستیابی به بیشترین بازده خشک کردن، حلالیت و ظرفیت جذب چربی ارائه شده است. الگوریتم بهینه‌سازی بر اساس تابع مطلوبیت (Desirability) ترکیبی اجرا شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه شماره ۱ با توان ۲۷۳/۴۷ وات و زمان ۲۴/۸۸ دقیقه به عنوان شرایط بهینه انتخاب گردید. این شرایط سبب دستیابی به بازده خشک کردن ۷۱/۴۲٪، حلالیت بسیار بالا (۹۸/۱۱٪) و ظرفیت جذب چربی ۱۲۹/۸٪ گردید و بالاترین مقدار مطلوبیت (۰/۹۵۶) را در بین گزینه‌ها نشان داد. سایر نمونه‌ها نیز مقادیر نسبتاً بالایی داشتند، اما مطلوبیت آن‌ها پایین‌تر از نمونه منتخب بود. این نتایج نشان می‌دهد که با انتخاب شرایط بهینه توان و زمان تیمار فراصوت می‌توان به طور هم‌زمان چندین ویژگی عملکردی مهم پروتئین آب‌پنیر (بازده، حلالیت و ظرفیت جذب چربی) را در سطح مطلوب ارتقا داد. بنابراین توان ۲۷۳/۵ وات و زمان ۲۵ دقیقه به عنوان شرایط بهینه برای پیش تیمار فراصوت در نظر گرفته شد و سایر آزمون‌ها بر روی این نمونه انجام شد.

شاخص فعالیت امولسیون

شاخص فعالیت امولسیونی پودر پروتئین آب‌پنیر به طور معنی‌داری تحت تأثیر پیش‌تیمار فراصوت و روش خشک‌کردن قرار گرفت. بالاترین مقدار این شاخص در نمونه بهینه (فراصوت + خشک‌کن پاششی) به میزان $127.5 \text{ m}^2/\text{g}$ به دست آمد، در حالی که نمونه کنترل خشک‌کن پاششی (SPRY) مقدار $84.7 \text{ m}^2/\text{g}$ و نمونه کنترل خشک‌کن انجمادی (FRZD) کمترین فعالیت امولسیونی

۷۱/۲m²/g را نشان داد، که هر سه مقدار با هم اختلاف معنی داری نشان دادند. بهبود قابل توجه شاخص فعالیت امولسیون در نمونه بهینه را می توان به تغییرات ساختاری ناشی از پیش تیمار فراصوت نسبت داد. مطالعات متعدد نشان داده اند که فراصوت با شدت بالا

(HIU) قادر است تجمعات پروتئینی را تخریب کرده، ساختارهای فشرده را باز کند و گروه های هیدروفوبیک و واکنش پذیر بیشتری را در سطح پروتئین آشکار سازد.

جدول ۳- شرایط بهینه فرآیند تولید پودر پروتئین آب پنیر با پیش تیمار فراصوت

Table 3- Optimal process conditions for whey protein powder production using ultrasound pretreatment

شماره Number	توان Power (wat)	زمان Time (min)	بازده خشک کردن Drying efficiency (%)	حلالیت در آب Solubility in water (%)	ظرفیت جذب چربی Fat absorption capacity (%)	مطلوبیت Desirability
1	273.47	24.88	71.4283	98.11	129.8	0.95
2	270.48	24.22	70.97295	97.25	129.5155	0.93
3	300	18.07	69.55589	98.02	127.703	0.85
4	290.91	18.83	69.46757	96.25	127.851	0.85
5	287.42	19.17	69.4526	94.12	127.9225	0.85

این تغییرات سبب افزایش تمایل پروتئین ها به جذب در بین فاز روغن و آب و در نتیجه بهبود پایداری امولسیون می شوند (Shen, Albano, & Nicoletti, 2018; Fang, Gao, & Guo, 2017). در همین راستا، مقادیر شاخص فعالیت امولسیونی گزارش شده برای پروتئین های آب پنیر تیمار شده با فراصوت در دامنه ۹۰ تا ۱۳۰ m²/g قرار دارد که با نتایج حاضر مطابقت کامل دارد (Bulut, 2022). کاهش نسبی شاخص فعالیت امولسیونی در نمونه کنترل خشک کن پاششی نسبت به بهینه نشان می دهد که خشک کردن پاششی بدون اعمال پیش تیمار فراصوت قادر به حفظ کامل عملکرد امولسیونی پروتئین ها نیست. یافته های مشابه در پژوهش های پیشین نیز نشان داده اند که نمونه های خشک شده به روش انجمادی نسبت به نمونه های خشک شده پاششی، ویژگی های امولسیونی و کف کنندگی ضعیف تری دارند (Cais-Sokolińska, Zhao et al., 2013; Teichert, & Gawalek, 2023). به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب پیش تیمار فراصوت و خشک کن پاششی بهترین شرایط را برای بهبود فعالیت امولسیونی پروتئین آب پنیر فراهم می کند.

ظرفیت کف کنندگی

بیشترین ظرفیت کف کنندگی در نمونه بهینه با مقدار ۱۳۳/۵۱ % به دست آمد. این مقدار به طور معنی داری بالاتر از نمونه (۹۷/۴۴ %) کنترل خشک کن پاششی و نمونه (۸۲/۱۹ %) کنترل خشک کن انجمادی بود. افزایش قابل توجه ظرفیت کف کنندگی در نمونه بهینه را می توان ناشی از اثرات پیش تیمار فراصوت دانست. اعمال امواج

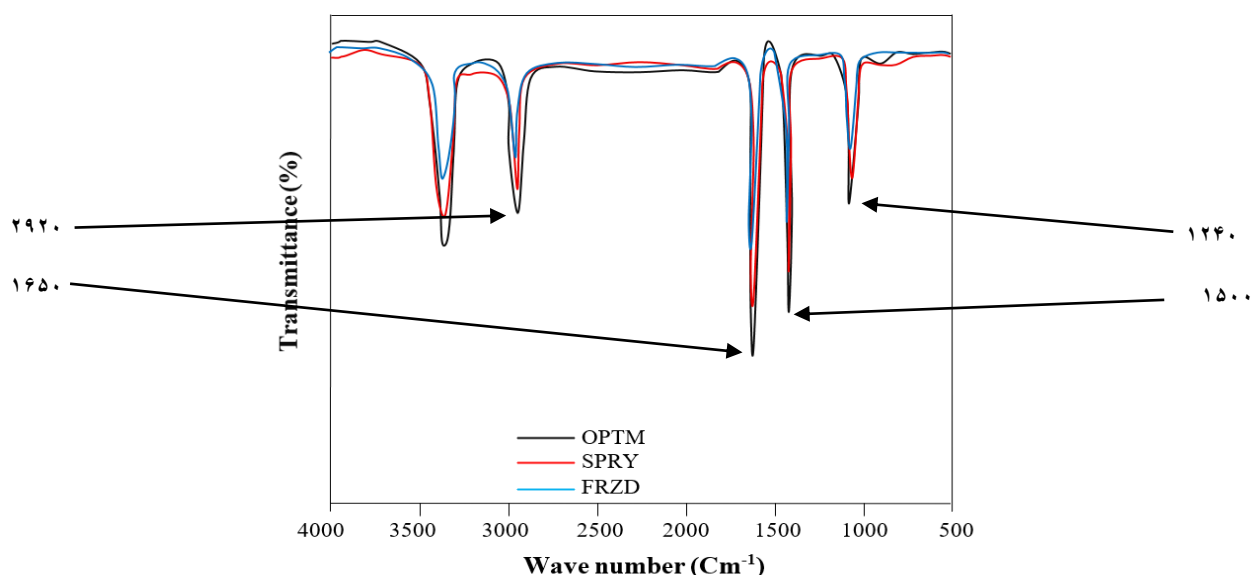
فراصوت با توان بالا منجر به ایجاد کایتاسیون، شکستن تجمعات پروتئینی و باز شدن ساختارهای فشرده می شود. این تغییرات باعث آشکار شدن گروه های هیدروفوبیک و باردار پروتئین و در نتیجه افزایش حلالیت و توانایی جذب سریع در سطح حباب های هوا می گردد. این موضوع منجر به تشکیل فیلم های پروتئینی پایدارتر در اطراف حباب ها و افزایش ظرفیت کف کنندگی می شود. نتایج مشابهی در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است؛ به طوری که جامبارک و همکاران (Jambrak et al., 2014) نشان دادند که تیمار فراصوت ظرفیت کف کنندگی پروتئین های آب پنیر را ۲۰ تا ۴۰ درصد افزایش می دهد. مقادیر به دست آمده در این پژوهش با بازه گزارش شده (حدود ۸۰-۱۰۰ %) برای نمونه های مشابه همخوانی دارد (Zhao et al., 2013). مطالعات پیشین گزارش کردند که نمونه های خشک شده به روش انجمادی معمولاً ظرفیت کف کنندگی پایین تری نسبت به نمونه های خشک شده پاششی دارند (Rajam, & Anandharamakrishnan, 2015; Haas et al., 2024). در مجموع، نتایج نشان داد که ترکیب پیش تیمار فراصوت و خشک کن پاششی، بهترین شرایط را برای ارتقای ظرفیت کف کنندگی پودر پروتئین آب پنیر فراهم می کند.

ساختار مادون قرمز فوریه

طیف FTIR نمونه های پودر پروتئین آب پنیر (بهینه، کنترل خشک کن پاششی و کنترل خشک کن انجمادی) در محدوده ۴۰۰۰ تا ۴۰۰ cm⁻¹ در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود الگوی کلی جذب در همه نمونه ها مشابه است، که

در اثر باز شدن ساختار پروتئین‌ها است. علاوه بر این، پیک Amide III در محدوده 1240 cm^{-1} مشاهده شد که مرتبط با ارتعاشات ترکیبی C-N و N-H است. شدت این پیک نیز در نمونه بهینه بیشتر از دو نمونه دیگر بود. در مقابل، در نمونه کنترل خشک‌کن انجمادی شدت جذب در این محدوده‌ها کاهش یافته بود که احتمالاً به دلیل تشکیل ساختارهای تجمع‌ی و کاهش تحرک گروه‌های عاملی رخ داده است. نتایج این مطالعه با یافته‌های الشمسی و همکاران (Al-Maqsood et al., 2018) و مقصود و همکاران (Shamsi et al., 2019) همخوانی دارد که گزارش کرده‌اند تیمار فراصوت با افزایش برهم‌کنش‌های غیراشتراکی و کاهش تجمعات پروتئینی منجر به افزایش شدت پیک‌های FTIR در محدوده‌های مرتبط با گروه‌های عاملی می‌شود. همچنین، خشک‌کن پاششی در مقایسه با خشک‌کن انجمادی به دلیل نرخ بالای خشک شدن، منجر به ساختارهای متخلخل‌تر و در نتیجه افزایش شدت پیک‌های مرتبط با گروه‌های عاملی شده است (Chen et al., 2021). به‌طور کلی، اگرچه موقعیت پیک‌ها در نمونه‌ها مشابه بود، اما تغییرات در شدت آن‌ها نشان داد که نوع فرآیند (فراصوت و نوع خشک‌کن) بر دسترسی و برهم‌کنش گروه‌های عاملی پروتئین‌ها اثرگذار است. بدین ترتیب، می‌توان نتیجه گرفت که پیش‌تیمار فراصوت به همراه خشک‌کن پاششی در مقایسه با سایر تیمارها بیشترین تغییرات مطلوب را در ساختار پروتئین آب‌پنیر ایجاد کرده است.

بیانگر عدم تغییر اساسی در ساختار اولیه پروتئین‌ها در اثر فرآیندهای اعمال‌شده است. با این حال، شدت جذب در برخی پیک‌های مشخص تفاوت معناداری داشت. پیک جذب پهن در حوالی $3300\text{--}3270\text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاشات کششی گروه‌های O-H و N-H است (Tavares, & Noreña, 2019). در نمونه بهینه (فراصوت+خشک‌کن پاششی) شدت این پیک بالاتر بود که می‌تواند ناشی از باز شدن زنجیره‌های پروتئینی و افزایش در دسترس بودن گروه‌های هیدروژنی برای برقراری پیوندهای هیدروژنی باشد. نمونه کنترل خشک‌کن انجمادی (خشک‌کن انجمادی) کمترین شدت را در این محدوده نشان داد که می‌تواند ناشی از باقی ماندن تجمعات پروتئینی و دسترسی کمتر گروه‌های عاملی باشد. در محدوده 2920 cm^{-1} پیک ضعیفی مشاهده شد که مربوط به ارتعاشات کششی C-H است و در تمام نمونه‌ها وجود داشت، اما شدت آن در بهینه کمی بالاتر از سایرین بود. مهم‌ترین پیک‌ها در محدوده Amide I ($1600\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$) و ($1500\text{--}1560\text{ cm}^{-1}$) مشاهده شدند. پیک Amide I در حوالی 1650 cm^{-1} به ارتعاشات کششی C=O مربوط است و شاخص مناسبی برای ارزیابی ساختار ثانویه پروتئین‌ها محسوب می‌شود (Andrade et al., 2019). شدت این پیک در بهینه بیشترین مقدار را داشت و نشان‌دهنده تغییر در نظم ساختاری و افزایش در دسترس بودن گروه‌های کربونیل پس از تیمار فراصوت بود. پیک Amide II در حوالی 1540 cm^{-1} نیز شدت بیشتری در بهینه داشت و بیانگر افزایش ارتعاش خمشی N-H و کششی C-N



شکل ۱- طیف تبدیل فوریه مادون قرمز نمونه‌های پودر پروتئین آب پنیر

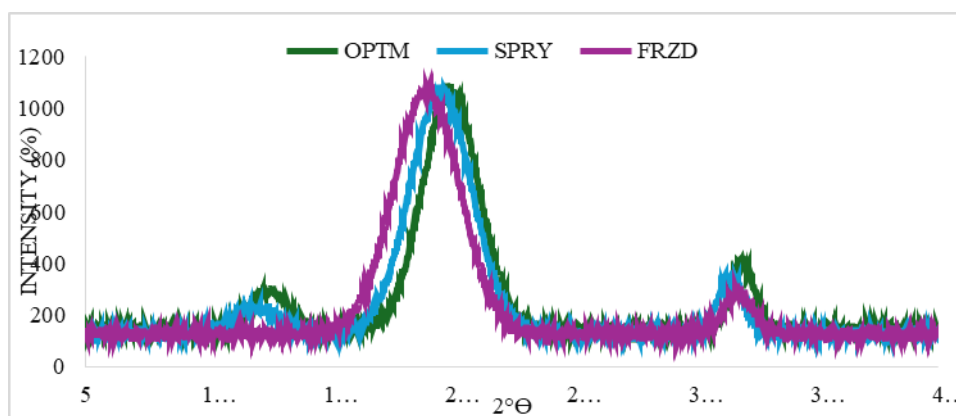
Fig. 1. FTIR Spectra of whey protein powder samples

ساختار کریستالی پراش پرتو ایکس

الگوهای پراش پرتو ایکس در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود که هر سه نمونه (بهینه، کنترل خشک کن پاششی و کنترل خشک کن انجمادی) دارای یک پهلوی پراش عریض در محدوده ۱۹-۲۰ 2θ درجه هستند که معرف ساختار آمورف یا شبه آمورف پروتئین آب پنیر است. وجود این پهلوی به جای پیک های باریک و تیز بیانگر عدم شکل گیری ساختار بلوری منظم و غالب بودن فاز آمورف در تمامی نمونه ها می باشد. با این حال مقایسه شدت و پهنای پیک ها بین نمونه ها تفاوت هایی را نشان داد، نمونه بهینه (فراصوت + خشک کن پاششی): نسبت به سایر نمونه ها شدت پراش در پیک اصلی کمی بالاتر و پهنای آن اندکی کمتر بود. این موضوع نشان دهنده آن است که تیمار فراصوت موجب تغییر در آرایش مولکولی پروتئین ها و کاهش بخشی از بی نظمی ساختاری شده و در نتیجه ساختار آمورف متراکم تری شکل گرفته است.

به طور کلی، نتایج XRD بیانگر آن است که تیمار فراصوت پیش از خشک کردن پاششی سبب کاهش نسبی بی نظمی و افزایش تراکم ساختار آمورف می شود، در حالی که در روش های بدون فراصوت (چه پاششی و چه انجمادی) تغییرات قابل توجهی در ساختار مولکولی

مشاهده نشد. این یافته ها نشان می دهد فراصوت می تواند نقش مؤثری در بهبود ویژگی های ساختاری و احتمالاً عملکردی پودر آب پنیر ایفا کند. حاوی و رز (Haque, & Roos, 2005) مطالعه ای انجام دادند و نشان دادند که در مخلوط های لاکتوز/پروتئین آب پنیر، حضور پروتئین وظیفه کند کردن کریستالی شدن لاکتوز را دارد. همچنین، نرخ کریستالیزاسیون در نمونه های خشک شده پاششی بیشتر از خشک شده انجمادی است، و با افزایش نسبت پروتئین کریستالیزاسیون کاهش می یابد. مطابق با نتایج پژوهش حاضر در نمونه های کنترل خشک کن پاششی و بهینه، وجود پروتئین و اثر تیمار فراصوت ممکن است مانع از کریستالیزاسیون واضح لاکتوز شده و فاز آمورف را حفظ کرده باشد (Haque et al., 2005). مطالعات نشان داده اند که تیمار فراصوت و خشک کن پاششی موجب افزایش آمورفیت و کاهش نظم کریستالی در پروتئین های آب پنیر می شود. این یافته ها کاملاً با نتایج XRD پژوهش حاضر هم خوانی دارند و نشان می دهند که تغییرات مشاهده شده در الگوی پراش، ناشی از اصلاح ساختار فوق مولکولی پروتئین بدون تخریب ساختار اولیه است (Zhang et al., 2020; Haas et Al-Thaibani et al., 2024; al., 2024; Ledari et al., 2024; Jin et al., 2022).



شکل ۲- الگوی پراش کریستالی پراش پرتو ایکس نمونه های پودر پروتئین آب پنیر
Fig. 2. X-ray diffraction (XRD) pattern of whey protein powder samples

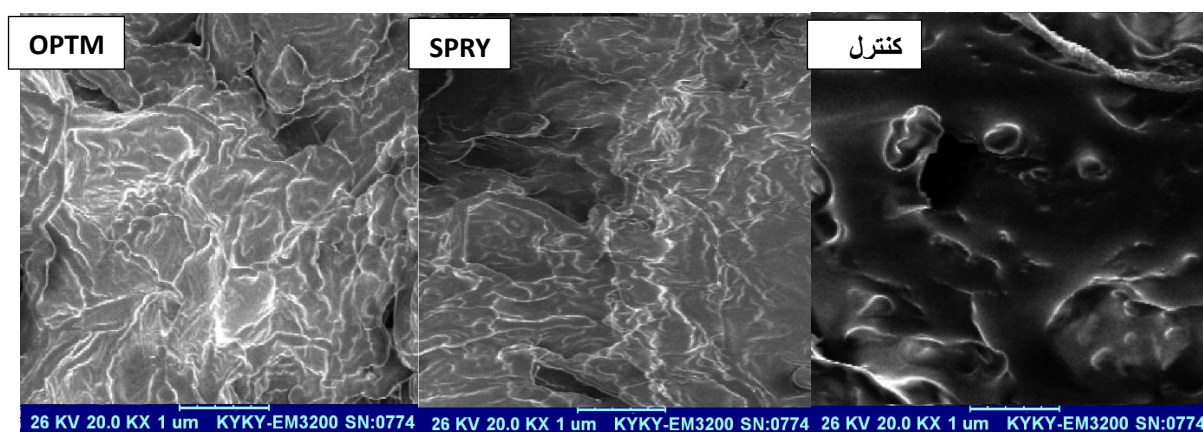
ریز ساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورفولوژی سطحی نمونه های پودر آب پنیر تهیه شده تحت شرایط مختلف فرآیند را نشان می دهند (شکل ۳). تفاوت های آشکاری در ساختار سطحی بین سه تیمار مشاهده شد. سطح ذرات در نمونه بهینه (فراصوت + خشک کن پاششی) نسبتاً صاف و یکنواخت بوده و حفره های ریز و فرورفتگی های منظم مشاهده می شود. اعمال پیش تیمار فراصوت پیش از خشک کردن پاششی احتمالاً موجب کاهش تجمع

پروتئینی، تجزیه ساختارهای بزرگ تر به ذرات ریز تر و در نهایت ایجاد سطحی همگن تر شده است. این نتایج همسو با گزارش های پیشین است که نشان داده اند فراصوت می تواند با القای برهم کنش تجمع پروتئین، یکنواختی ساختاری را بهبود بخشد و ذرات متراکم تر ایجاد کند. سطح ذرات در نمونه کنترل خشک کن پاششی (خشک کن پاششی بدون فراصوت) ناهموار و چروکیده بوده و خطوط یا لایه های موازی مشخصی قابل مشاهده است. چنین مورفولوژی ای ناشی از خشک شدن سریع در فرآیند پاششی بدون اعمال تغییرات ساختاری

ضعیف‌تر است. به‌طور کلی، تصاویر SEM نشان دادند که پیش‌تیمار فراصوت در نمونه بهینه منجر به اصلاح ریزساختار سطحی، ایجاد ذرات یکنواخت‌تر و کاهش بی‌نظمی‌های مورفولوژیک شده است. این تغییرات با نتایج حاصل از الگوهای XRD مطابقت دارد و نقش فراصوت را در بهبود ساختار و پایداری پودر آب‌پنیر تأیید می‌کند. این نتایج با آنچه در پژوهش‌های پیشین انجام شده است مطابقت دارد (Sarabandi et al.; Jin et al., 2022; Khaire, & Gogate, 2021; al., 2022).

پیشین بوده و بیانگر باقی‌ماندن بخشی از تجمعات پروتئینی و بی‌نظمی بالاتر در سطح ذرات است. وجود این ناهموازی‌ها می‌تواند بر خواص عملکردی نظیر انحلال‌پذیری اثر منفی بگذارد. ساختار ذرات در نمونه کنترل خشک‌کن انجمادی (خشک‌کن انجمادی بدون فراصوت) متخلخل و پوسته‌مانند بوده و لایه‌های نازک و توده‌ای به وضوح مشاهده می‌شوند. این ویژگی‌ها نتیجه رشد کریستال‌های یخ در طول فرآیند انجماد و حذف تدریجی آب طی خشک‌کردن می‌باشند. چنین ساختاری اگرچه موجب افزایش سطح ویژه ذرات می‌شود، اما از نظر تراکم و یکپارچگی در مقایسه با نمونه‌های پاششی



شکل ۳- ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های پودر پروتئین آب‌پنیر

Fig. 3. Microstructure of whey protein powder samples observed by scanning electron microscopy (SEM)

به‌طور کلی، روند تغییرات به‌خوبی بیانگر اثر مثبت تیمار فراصوت در افزایش بار سطحی و پایداری کلئیدی و اثر منفی نسبی خشک‌کردن انجمادی در مقایسه با خشک‌کردن پاششی است. این یافته‌ها با نتایج بخش‌های مربوط به ظرفیت کف‌کنندگی و شاخص فعالیت امولسیون‌نی نیز هم‌راستا هستند، زیرا هر دو ویژگی به‌طور مستقیم به میزان بار سطحی و دافعه بین‌ذره‌ای مرتبط‌اند (Zhang et O'Sullivan, Arellano, Pichot, & Norton, 2014; al., 2020).

اندازه ذرات

اندازه ذرات نمونه‌های مختلف پودر پروتئین آب‌پنیر به‌ترتیب ۱۷۶/۲ نانومتر بهینه، ۲۹۳/۷ نانومتر کنترل خشک‌کن پاششی و ۴۱۲/۶ نانومتر کنترل خشک‌کن انجمادی به‌دست آمد که با هم اختلاف معنی‌داری داشتند. به‌طور کلی، کاهش اندازه ذرات به‌عنوان یک شاخص کلیدی در بهبود ویژگی‌های عملکردی پروتئین‌ها به شمار می‌رود؛ زیرا ذرات کوچک‌تر سطح تماس بالاتری دارند که می‌تواند بر ویژگی‌های امولسیون‌نی و کف‌کنندگی اثر مثبت بگذارد (Razavi et al., 2020). نتایج نشان داد که تیمار فراصوت در نمونه

پتانسیل زتا

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مقادیر پتانسیل زتا برای نمونه‌های مختلف پودر پروتئین آب‌پنیر شامل بهینه (۲۸/۷۲- میلی ولت)، کنترل خشک‌کن پاششی (۲۰/۳۹- میلی‌ولت)، و کنترل خشک‌کن انجمادی (۱۷/۴۳- میلی‌ولت) بود. به‌طور کلی، هر چه مقدار پتانسیل زتا از نظر عددی منفی‌تر باشد، نیروی دافعه الکترواستاتیکی بین ذرات افزایش یافته و پایداری کلئیدی سیستم بیشتر می‌شود (McClements, McClements, Bai, & Chung, 2017; 2021). نتایج نشان داد که نمونه بهینه (پیش‌تیمار فراصوت + خشک‌کن پاششی) دارای بیشترین قدر مطلق پتانسیل زتا بود. این موضوع حاکی از آن است که اعمال فراصوت موجب بازآرایی ساختار پروتئین‌های آب‌پنیر، افزایش گروه‌های باردار در سطح و در نتیجه بهبود پایداری کلئیدی شده است. مطالعات پیشین نیز تأیید کرده‌اند که تیمار فراصوت سبب افزایش بار سطحی و کاهش تجمع پروتئین‌های آب‌پنیر می‌شود (Chandrapala et al., 2012; Rafiei, Soltanizadeh, & Kaykha, 2025).

توانست با کاهش چسبندگی ذرات، بهبود پاشش و افزایش پایداری کلوئیدی، محصولی با کیفیت بالاتر و ویژگی‌های عملکردی برتر تولید کند. از دیدگاه صنعتی، استفاده از امواج فراصوت به عنوان پیش تیمار، ضمن افزایش راندمان فرآیند و کاهش ضایعات، امکان تولید پودر پروتئین آب پنیر با قابلیت انحلال پذیری بالا و عملکرد مطلوب در سیستم‌های امولسیون و کفدار را فراهم می‌سازد. این ویژگی‌ها کاربرد این پودر را در تولید محصولات لبنی غنی شده، نوشیدنی‌های پروتئینی، فرمولاسیون‌های امولسیونی و فرآورده‌های غذایی عملکردی گسترش می‌دهد. به طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب امواج فراصوت و خشک‌کن پاششی می‌تواند به عنوان یک فناوری نوین، اقتصادی و سازگار با محیط زیست در صنایع غذایی مورد توجه قرار گیرد و زمینه ساز توسعه فرآیندهای بهینه در تولید محصولات پروتئینی با ارزش افزوده بالا باشد.

میزان مشارکت نویسندگان

مجید آرام نبی نیا: انجام آزمایشات، تحقیق و بررسی، مدیریت داده‌ها، نوشتن پیش نویس اصلی، **حجت کاراژیان:** مدیریت داده‌ها، مدیریت پروژه، نظارت، اعتبارسنجی، روش‌شناسی، نوشتن - بررسی و ویرایش.

منابع تأمین مالی

این تحقیق هیچ کمک مالی خاصی از سازمان‌های تأمین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیر انتفاعی دریافت نکرد.

بهینه منجر به کوچک‌ترین اندازه ذرات شد. این موضوع را می‌توان به پدیده کاویتاسیون فراصوت نسبت داد که با ایجاد برش‌های مکانیکی شدید، تجمعات پروتئینی را می‌شکند و ذرات ریزتر و یکنواخت‌تری ایجاد می‌کند (Yang et al., 2018). کاهش اندازه ذرات در این نمونه هم‌راستا با افزایش پتانسیل زتا و بهبود شاخص فعالیت امولسیونی و ظرفیت کف‌کنندگی مشاهده شده بود (Patel, Li, Woo, 2018; Metzger, & Selomulya, 2018).

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که به کارگیری پیش تیمار غیرحرارتی امواج فراصوت پیش از خشک‌کردن پاششی، راهکاری مؤثر و کاربردی برای بهبود کیفیت و عملکرد پودر پروتئین آب پنیر است. نتایج حاصل از ارزیابی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، عملکردی و ساختاری بیانگر آن بود که امواج فراصوت با ایجاد تغییرات هدفمند در ساختار پروتئین‌ها، موجب کاهش تجمعات، افزایش سطح تماس و اصلاح ریزساختار ذرات می‌شود؛ امری که مستقیماً به بهبود حلالیت، فعالیت امولسیونی و ظرفیت کف‌کنندگی منجر گردید. در شرایط بهینه (توان حدود ۲۷۳/۵ وات و زمان ۲۵ دقیقه)، بیشترین بازده تولید پودر همراه با عملکردهای تکنولوژیکی مطلوب حاصل شد که برتری این تیمار را نسبت به نمونه‌های شاهد خشک‌کن پاششی و انجمادی به خوبی نشان می‌دهد. مقایسه روش‌های خشک‌کردن نشان داد که اگرچه خشک‌کن انجمادی تا حدی در حفظ ساختار طبیعی پروتئین‌ها مؤثر است، اما از نظر بازده تولید و بهبود ویژگی‌های عملکردی، کارایی کمتری نسبت به ترکیب امواج فراصوت و خشک‌کن پاششی دارد. در مقابل، خشک‌کن پاششی در حضور پیش تیمار امواج فراصوت

References

- Ahmad, M., Mudgil, P., Gani, A., Hamed, F., Masoodi, F.A., & Maqsood, S. (2019). Nano-encapsulation of catechin in starch nanoparticles: Characterization, release behavior and bioactivity retention during simulated in-vitro digestion. *Food Chemistry*, 270, 104-95. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.024>
- Ahmadi, Z., Razavi, S.M.A., & Varidi, M. (2017). Sequential ultrasound and transglutaminase treatments improve functional, rheological, and textural properties of whey protein concentrate. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 43, 207-215. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.013>
- Al-Shamsi, K.A., Mudgil, P., Hassan, H.M., & Maqsood, S. (2018). Camel milk protein hydrolysates with improved technofunctional properties and enhanced antioxidant potential in in vitro and in food model systems. *Journal of Dairy Science*, 101(1), 47-60. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13194>
- Al-Thaibani, A., Mostafa, H., Alshamsi, O., Moin, A., Bansal, N., Mudgil, P., & Maqsood, S. (2024). Spray-drying and ultrasonication processing of camel whey protein concentrate: Characterization and impact on bioactive properties. *Journal of Dairy Science*, 107(11), 8824-8836. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-24900>
- Albano, K.M., & Nicoletti, V.R. (2018). Ultrasound impact on whey protein concentrate-pectin complexes and in the O/W emulsions with low oil soybean content stabilization. *Ultrasonics Sonochemistry*, 41, 562-571. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2017.10.018>
- Andrade, J., Pereira, C.G., de Almeida Junior, J.C., Viana, C.C.R., de Oliveira Neves, L.N., da Silva, P.H.F., dos Anjos, V.d.C. (2019). FTIR-ATR determination of protein content to evaluate whey protein concentrate adulteration. *LWT*, 99, 166-172. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.079>

7. Both, E., Boom, R., & Schutyser, M. (2020). Particle morphology and powder properties during spray drying of maltodextrin and whey protein mixtures. *Powder Technology*, 363, 519-524. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.001>
8. Bulut, M. (2022). The effects of ultrasound times and amplitudes on the particle size and emulsifying properties of whey protein concentrate. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(2), 323-329. <https://doi.org/10.53433/yyufbed1077700>
9. Cais-Sokolińska, D., Teichert, J., & Gawalek, J. (2023). Foaming and other functional properties of freeze-dried mare's milk. *Foods*, 12(11), 2274. <https://doi.org/10.3390/foods12112274>
10. Chandrapala, J., Zisu, B., Kentish, S., & Ashokkumar, M. (2012). The effects of high-intensity ultrasound on the structural and functional properties of α -Lactalbumin, β -Lactoglobulin and their mixtures. *Food Research International*, 48(2), 940-943. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.02.021>
11. Chen, W., Chao, C., Yu, J., Copeland, L., Wang, S., & Wang, S. (2021). Effect of protein-fatty acid interactions on the formation of starch-lipid-protein complexes. *Food Chemistry*, 364, 130390. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130390>
12. Haas, J., Kim, B.J., Atamer, Z., Wu, C., & Dallas, D.C. (2024). Effects of spray drying and freeze drying on the protein profile of whey protein concentrate. *Journal of Food Science*, 89(11), 7477-7493. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17349>
13. Haque, M.K., & Roos, Y.H. (2005). Crystallization and X-ray diffraction of crystals formed in water-plasticized amorphous spray-dried and freeze-dried lactose/protein mixtures. *Journal of Food Science*, 70(5), E359-E366. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb09977.x>
14. Jafar, S., Kamal, H., Mudgil, P., Hassan, H.M., & Maqsood, S. (2018). Camel whey protein hydrolysates displayed enhanced cholesteryl esterase and lipase inhibitory, anti-hypertensive and anti-haemolytic properties. *LWT*, 98, 212-218. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.08.024>
15. Jambrak, A.R., Mason, T.J., Lelas, V., Paniwnyk, L., & Herceg, Z. (2014). Effect of ultrasound treatment on particle size and molecular weight of whey proteins. *Journal of Food Engineering*, 121, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.012>
16. Jin, H., Sun, S., Sun, Z., Wang, Q., Jin, Y., & Sheng, L. (2022). Ultrasonic-assisted spray drying as a tool for improving the instant properties of egg white powder. *Food Structure*, 33, 100289. <https://doi.org/10.1016/j.foosr.2022.100289>
17. Kabeer, S., & Nagamanniammai, G. (2023). Effect of freeze and vacuum drying on the retention of nutrient content of brown rice (*Oryza sativa*) porridge. *International Journal of Nutrition, Pharmacology, Neurological Diseases*, 13(4), 234-239. https://doi.org/10.4103/ijnpnnd.ijnpnnd_31_23
18. Kandasamy, S., Yoo, J., Yun, J., Kang, H.-B., Seol, K.-H., Kim, H.-W., & Ham, J.-S. (2021). Application of whey protein-based edible films and coatings in food industries: An updated overview. *Coatings*, 11(9), 1056. <https://doi.org/10.3390/coatings11091056>
19. Kenari, R. E., & Razavi, R. (2021). Effect of sonication conditions: Time, temperature and amplitude on physicochemical, textural and sensory properties of yoghurt. *International Journal of Dairy Technology*, 74(2), 332-343. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12761>
20. Khaire, R. A., & Gogate, P. R. (2021). Novel approaches based on ultrasound for spray drying of food and bioactive compounds. *Drying Technology*, 39(12), 1832-1853. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1804926>
21. Kilara, A., & Vaghela, M. (2018). *Whey proteins*. pp. 93-126). In *Proteins in food processing* Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100722-8.00005-x>
22. Kumar, R., Chauhan, S. K., Shinde, G., Subramanian, V., & Nadasabapathi, S. (2018). Whey Proteins: A potential ingredient for food industry-A review. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 37(4), 283-290. <https://doi.org/10.18805/ajdfr.dr-1389>
23. Ledari, S. A., Milani, J. M., Shahidi, S.-A., & Golkar, A. (2024). Comparative analysis of freeze drying and spray drying methods for encapsulation of chlorophyll with maltodextrin and whey protein isolate. *Food Chemistry: X*, 21, 101156. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101156>
24. Li, K., Woo, M. W., Patel, H., Metzger, L., & Selomulya, C. (2018). Improvement of rheological and functional properties of milk protein concentrate by hydrodynamic cavitation. *Journal of Food Engineering*, 221, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.10.005>
25. Maqsood, S., Al-Dowaila, A., Mudgil, P., Kamal, H., Jobe, B., & Hassan, H. M. (2019). Comparative characterization of protein and lipid fractions from camel and cow milk, their functionality, antioxidant and antihypertensive properties upon simulated gastro-intestinal digestion. *Food Chemistry*, 279, 328-338. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.011>

26. Marín, D., Alemán, A., Montero, P., & Gómez-Guillén, M. (2018). Encapsulation of food waste compounds in soy phosphatidylcholine liposomes: Effect of freeze-drying, storage stability and functional aptitude. *Journal of Food Engineering*, 223, 132-143. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.009>
27. Mavropoulou, I., & Kosikowski, F. (1973). Composition, solubility, and stability of whey powders. *Journal of Dairy Science*, 56(9), 1128-1134. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(73\)85321-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(73)85321-4)
28. McClements, D. J. (2021). Food hydrocolloids: Application as functional ingredients to control lipid digestion and bioavailability. *Food Hydrocolloids*, 111, 106404. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106404>
29. McClements, D. J., Bai, L., & Chung, C. (2017). Recent advances in the utilization of natural emulsifiers to form and stabilize emulsions. *Annual review of food science and technology*, 8(1), 205-236. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030216-030154>
30. Minj, S., & Anand, S. (2022). Development of a spray-dried conjugated whey protein hydrolysate powder with entrapped probiotics. *Journal of Dairy Science*, 105(3), 2038-2048. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20978>
31. O'Sullivan, J., Arellano, M., Pichot, R., & Norton, I. (2014). The effect of ultrasound treatment on the structural , physical and emulsifying properties of dairy proteins. *Food Hydrocolloids*, 42, 386-396. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.05.011>
32. O'Callaghan, D., & Hogan, S. (2013). The physical nature of stickiness in the spray drying of dairy products—a review. *Dairy Science & Technology*, 93(4), 331-346. <https://doi.org/10.1007/s13594-013-0114-9>
33. Pierce, A., Skonberg, D., Calder, B., Dumas, R., & Jin, Q. (2024). Development of a Whey Protein Recovery Process Using Sugar Kelp (*Saccharina latissima*) Extracts. *Foods*, 13(22), 3663. <https://doi.org/10.3390/foods13223663>
34. Prabhuzantye, T., Khaire, R. A., & Gogate, P. R. (2019). Enhancing the recovery of whey proteins based on application of ultrasound in ultrafiltration and spray drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 55, 125-134. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.008>
35. Rafiei, M., Soltanizadeh, N., & Kaykha, M. E. H. (2025). Unlocking the potential of whey protein isolate: How ultrasonic treatment transforms functionality and structure. *Ultrasonics Sonochemistry*, 107486. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107486>
36. Rajam, R., & Anandharamakrishnan, C. (2015). Spray freeze drying method for microencapsulation of *Lactobacillus plantarum*. *Journal of Food Engineering*, 166, 95-103. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.029>
37. Razavi, R., Kenari, R. E., Farmani, J., & Jahanshahi, M. (2020). Fabrication of zein/alginate delivery system for nanofood model based on pumpkin. *International journal of biological macromolecules*, 165, 3123-3134. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.176>
38. Sarabandi, K., Tamjidi, F., Akbarbaglu, Z., Samborska, K., Gharehbeglou, P., Kharazmi, M. S., & Jafari, S. M. (2022). Modification of whey proteins by sonication and hydrolysis for the emulsification and spray drying encapsulation of grape seed oil. *Pharmaceutics*, 14(11), 2434. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14112434>
39. Schmitz-Schug, I., Kulozik, U., & Foerst, P. (2016). Modeling spray drying of dairy products—Impact of drying kinetics, reaction kinetics and spray drying conditions on lysine loss. *Chemical Engineering Science*, 141, 315-329. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.11.008>
40. Shen, X., Fang, T., Gao, F., & Guo, M. (2017). Effects of ultrasound treatment on physicochemical and emulsifying properties of whey proteins pre-and post-thermal aggregation. *Food Hydrocolloids*, 63, 668-676. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.10.003>
41. Singh, P., Pandey, V. K., Singh, R., & Dar, A. H. (2024). Spray-freeze-drying as emerging and substantial quality enhancement technique in food industry. *Food Science and Biotechnology*, 33(2), 231-243. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01409-8>
42. Song, B., Yao, P., Zhang, Y., Pang, X., Zhang, S., & Lv, J. (2022). Ultrasound pretreatment prior to spray drying improve the flowability and water sorption properties of micellar casein concentrate. *Ultrasonics Sonochemistry*, 87, 106049. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106049>
43. Tavares, L., & Noreña, C. P. Z. (2019). Encapsulation of garlic extract using complex coacervation with whey protein isolate and chitosan as wall materials followed by spray drying. *Food Hydrocolloids*, 89, 360-369. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.10.052>
44. Wang, H., Tong, X., Yuan, Y., Peng, X., Zhang, Q., Zhang, S., . . . Xu, J. (2020). Effect of spray-drying and freeze-drying on the properties of soybean hydrolysates. *Journal of Chemistry*, 2020(1), 9201457. <https://doi.org/10.1155/2020/9201457>
45. Xiong, L., Li, C., Boeren, S., Vervoort, J., & Hettinga, K. (2020). Effect of heat treatment on bacteriostatic activity and protein profile of bovine whey proteins. *Food Research International*, 127, 108688. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108688>

46. Yang, F., Liu, X., Ren, X. e., Huang, Y., Huang, C., & Zhang, K. (2018). Swirling cavitation improves the emulsifying properties of commercial soy protein isolate. *Ultrasonics Sonochemistry*, 42, 471-481. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.12.014>
47. Zhang, R., Pang, X., Lu, J., Liu, L., Zhang, S., & Lv, J. (2018). Effect of high intensity ultrasound pretreatment on functional and structural properties of micellar casein concentrates. *Ultrasonics Sonochemistry*, 47, 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.04.011>
48. Zhang, Z.-H., Peng, H., Woo, M. W., Zeng, X.-A., Brennan, M., & Brennan, C. S. (2020). Preparation and characterization of whey protein isolate-chlorophyll microcapsules by spray drying: Effect of WPI ratios on the physicochemical and antioxidant properties. *Journal of Food Engineering*, 267, 109729. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109729>
49. Zhao, Q., Xiong, H., Selomulya, C., Chen, X. D., Huang, S., Ruan, X., ... Sun, W. (2013). Effects of spray drying and freeze drying on the properties of protein isolate from rice dreg protein. *Food and Bioprocess Technology*, 6(7), 1759-1769. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0844-3>