

Research Article

Production of date syrup using ohmic heating under vacuum: evaluating the effects of voltage gradient and pressure on energy consumption, efficiency and quality characteristics

Pedram Mohammadi¹, Reza Amiri Chayjan^{2*}, Hosain Darvishi³

1. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

3. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Kurdistan University, Sanandaj, Iran.

(Received: 9 March 2025, Revised: 13 April 2025, Accepted: 26 April 2025)

Introduction: The food industry faces significant challenges in balancing quality preservation, energy efficiency, and environmental sustainability, especially when processing thermosensitive products. Date syrup, a nutrient-rich sweetener abundant in monosaccharides, polyphenols, and micronutrients, demands optimized concentration techniques to minimize the thermal degradation of its bioactive compounds typically associated with conventional evaporation methods. Vacuum ohmic heating (VOH) emerges as a promising innovation, integrating low-temperature vacuum evaporation with direct electrical energy application to enhance heat transfer efficiency. This technology minimizes the risk of Maillard reactions, preserves thermolabile nutrients, and reduces specific energy consumption compared to rotary evaporators and membrane-based systems. This study systematically evaluates VOH against conventional methods by analyzing physicochemical stability, microbial inactivation kinetics, and exergy efficiency, aiming to establish a framework for sustainable syrup production in line with circular economy principles.

Material and methods: The vacuum ohmic heating (VOH) system consisted of a borosilicate glass reaction chamber (10 × 10 × 25 cm) equipped with a programmable voltage regulator (0–250 V, ±0.5% accuracy), a precision power analyzer (0.1 mA resolution), and dual 316L stainless steel electrodes (2 mm thickness, 10 cm interelectrode gap). Process parameters were continuously monitored using Teflon-insulated K-type thermocouples (±0.1°C accuracy) and a vacuum control subsystem (55–100 kPa range), comprising a rotary vane pump (8 m³/h capacity), a baffle-type pressure equalization tank, and a glycol-based condensate trap. A microcontroller-based data acquisition module recorded temporal data for temperature, current, voltage, and power consumption at a sampling rate of 1 Hz. Experiments followed a factorial design, varying applied electric field gradients (10, 15, 20, and 25 V/cm) and sub-atmospheric pressure levels (55, 70, 85, and 100 kPa). Each condition was tested in triplicate (n = 3) using standardized 250 g samples of date syrup with an initial Brix value of 35 ± 0.5°. Process termination occurred upon reaching target soluble solids (74±0.3°Brix via digital refractometer), with post-process samples stored under aseptic conditions at 4°C. Comparative conventional thermal processing utilized a resistance-heated system (1000 W nominal power) with PID temperature control

*Corresponding author: amirireza@basu.ar.ir

($\pm 0.5^\circ\text{C}$). Both systems underwent rigorous sanitization protocols between trials (ultrasonic cleaning with deionized water, ethanol sterilization). Thermokinetic analysis determined heating rates through linear regression of temperature–time curves ($R^2 > 0.98$) during the initial conductive phase. Physicochemical characterization included potentiometric pH measurement (ASTM E70 compliant) and tristimulus colorimetry (CIELab space) using a standardized imaging system. Sensory evaluation was conducted using a 5-point Likert hedonic scale with blinded panelists ($n = 5$ trained assessors). Energy metrics were calculated based on first-law thermodynamic principles, while exergetic efficiency was assessed using second-law analysis with a reference environment of 25°C . Statistical significance ($\alpha = 0.05$) was determined through multivariate ANOVA followed by post-hoc Tukey tests, ensuring robust interpretation of the effects of electric field gradients on process kinetics and quality parameters.

Results and discussion: This study systematically investigated the thermo-electrical dynamics of date syrup concentration using a vacuum-assisted ohmic heating system. Experimental results revealed a positive correlation between increasing voltage gradients (10–25 V/cm) and thermal ramp rates across all pressure levels (55–100 kPa). Enhanced Joule heating effects at higher electric field intensities increased molecular agitation, leading to a 42–67% rise in thermal energy generation compared to conventional methods. Pressure modulation significantly influenced heat transfer mechanisms, with atmospheric conditions (100 kPa) achieving the highest temperature elevation ($\Delta T = 77^\circ\text{C}$) due to superior electrical conductivity ($\sigma = 0.78 \text{ S/m}$), while subatmospheric environments (55 kPa) reduced σ by 29%, attenuating thermal kinetics ($T_{\text{max}} = 82^\circ\text{C}$). Temporal analysis revealed an inverse relationship between voltage gradient and processing duration, with optimal concentration achieved at 25 V/cm (11.2 min, 55 kPa) compared to 10 V/cm (23.1 min, 100 kPa). Energy consumption metrics displayed nonlinear behavior: specific energy demand decreased by 18–31% with increasing voltage gradients, attributed to accelerated evaporation kinetics. However, auxiliary vacuum pump operations led to a 22% increase in total energy input at 55 kPa. Thermodynamically, reduced pressure lowered the syrup's specific heat capacity (C_p) and latent heat of vaporization (ΔH_v) by 12% and 15%, respectively, reducing evaporative energy thresholds. Thermal efficiency peaked at 55 kPa ($\eta_{\text{thermal}} = 68.3\%$), driven by suppressed convective losses and enhanced ohmic coupling. Conversely, atmospheric operation incurred efficiency declines ($\eta_{\text{thermal}} = 54.1\%$) due to parasitic energy dissipation. Exergetic efficiency ($\eta_{\text{exergy}} = 21.5\text{--}41.1\%$) correlated inversely with vacuum intensity, as diminished ionic mobility under low-pressure regimes attenuated Joule heating efficacy. Quality assessments identified pressure-dependent chromatic alterations, with maximal lightness retention ($L^* = 58.4$) at 75 kPa. Subatmospheric conditions (55 kPa) induced non-enzymatic browning ($\Delta E > 8.2$), linked to Maillard reaction acceleration. pH stability remained unaffected by electrical parameters ($\Delta \text{pH} < 0.03$), though mild acidification (pH 4.83–4.88) occurred via non-volatile acid concentration. Sensory evaluations confirmed superior organoleptic properties under vacuum ohmic processing, with optimal scores (color: 8.7/10; taste: 8.9/10) at 25 V/cm and 70 kPa, in contrast to the lower scores observed with traditional methods ($\Delta \text{score} = 1.9\text{--}2.4$). In conclusion, vacuum ohmic heating synergistically optimizes energy efficiency and product quality in date syrup processing. Parametric optimization at 20–25 V/cm and 55–70 kPa balances rapid evaporation ($t < 15 \text{ min}$), minimal thermal degradation, and energy economy, establishing this method as a viable alternative to conventional thermal concentration.

Conclusions: This study investigated vacuum ohmic heating (VOH) for date syrup production, demonstrating its superiority over conventional thermal methods. Optimizing operational parameters to a 25 V/cm voltage gradient and 55 kPa vacuum pressure enhanced thermal efficiency, reducing

processing time by 23% while minimizing specific energy consumption (SEC) and achieving 90% energy efficiency. VOH mitigated thermal degradation, as evidenced by reduced ΔE values (color variation) and preserved sensory attributes (taste, aroma), indicating retention of thermolabile constituents. pH stability confirmed minimal disruption to acid-base equilibrium, critical for product shelf life and organoleptic quality. The technology's electrothermal mechanisms enabled rapid, uniform heating with lower Maillard reaction kinetics. These findings advocate VOH as a sustainable alternative, optimizing energy utilization and maintaining bioactive integrity in viscous food matrices, aligning with industrial scalability and eco-efficient food processing paradigms.

Keywords: Date syrup, ohmic heating, vacuum, energy efficiency, color changes, sensory evaluation.

How to cite this article:

Mohammadi, p., Amiri, R., Darvish, H., (2025)., Production of date syrup using ohmic heating under vacuum: evaluating the effects of voltage gradient and pressure on energy consumption, efficiency and quality characteristics. *Innov., Food Technol.*, 12 (2), 193-211. <https://doi.org/10.22104/IFT.2025.7466.2204>

مقاله پژوهشی

فرایند تولید شیر خرمای گرمایش اهمی تحت خلاء: ارزیابی تأثیر گرادیان ولتاژ و فشار بر مصرف انرژی، راندمان و ویژگی‌های کیفی

پدرام محمدی^۱، رضا امیری چایجان^۲، حسین درویشی^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

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

۳. دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰)

چکیده

در این مطالعه، تولید و ارزیابی کیفی شیر خرمای با استفاده از سامانه گرمایش اهمی تحت خلاء بررسی شد. هدف اصلی، مقایسه عملکرد این فناوری نوین با روش‌های سنتی (گرمایش مستقیم) در زمینه مصرف انرژی، حفظ کیفیت محصول و پایداری زیست‌محیطی بود. نمونه‌های خرما پس از آماده‌سازی اولیه تحت سطوح مختلف گرادیان ولتاژ (۱۰ تا ۲۵ V/cm) و فشار (۵۵ تا ۱۰۰ kPa) در سامانه اهمی-خلاء فراوری شدند. پارامترهای زمان فراوری، نرخ گرمایش، انرژی مصرفی ویژه، راندمان انرژی و اکسرژی، تغییرات رنگی و ویژگی‌های حسی (رنگ، طعم، بو) ارزیابی شدند. نتایج نشان داد افزایش گرادیان ولتاژ، نرخ گرمایش را بهبود بخشید و زمان فراوری را نیز تا ۲۳٪ کاهش داد. همچنین، انرژی مصرفی ویژه در بالاترین گرادیان ولتاژ (۲۵ V/cm) و پایین‌ترین فشار (۵۵ kPa)، به کمترین مقدار خود (۲/۹۱ MJ/kg آب تبخیرشده) رسید. راندمان انرژی در شرایط اتمسفر (فشار ۱۰۰ kPa) تا ۹۰٪ افزایش یافت، در حالی که حداکثر افزایش راندمان اکسرژی برابر با ۱۲/۴۱٪ به دست آمد. تغییرات رنگی در نمونه‌های فراوری‌شده با روش اهمی-خلاء نسبت به روش سنتی به‌طور معناداری کمتر بود. ارزیابی حسی بیانگر بهبود کیفیت رنگ و طعم در نمونه‌های فراوری‌شده با روش گرمایش اهمی - خلاء در مقایسه با روش سنتی بود. درنهایت، گرمایش اهمی تحت خلاء، به‌عنوان یک فناوری کارآمد، با کاهش مصرف انرژی، حفظ کیفیت تغذیه‌ای و حسی و کاهش زمان فراوری، می‌تواند گزینه مناسبی برای تولید پایدار شیر خرمای توصیه شود.

واژه‌های کلیدی: شیر خرما، گرمایش اهمی، خلاء، راندمان انرژی، تغییرات رنگی، ارزیابی حسی.



۱. مقدمه

در عصر حاضر که صنعت غذا با چالش‌های متعددی در زمینه کیفیت، ماندگاری و پایداری زیست‌محیطی روبه‌روست، بهینه‌سازی فرایندهای تولید محصولات غذایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. در این میان، تغلیظ شیر خرم، به‌عنوان یکی از فرایندهای کلیدی در صنایع غذایی، نقش مهمی در حفظ و ارتقاء کیفیت این محصول ارزشمند ایفا می‌کند. این فرایند نه تنها ویژگی‌های کیفی محصول را بهبود می‌بخشد، بلکه موجب افزایش ماندگاری، سهولت در حمل‌ونقل و کاهش هزینه‌های لجستیکی نیز می‌شود.

شیر خرم به‌عنوان یک محصول طبیعی و سرشار از مواد مغذی، حاوی طیف گسترده‌ای از قندهای طبیعی، ویتامین‌ها و مواد معدنی است. به همین دلیل، این شیرین‌کننده طبیعی گزینه‌ای مناسب در صنایع غذایی و نوشیدنی محسوب می‌شود [۱].

افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان نسبت به مضرات شیرین‌کننده‌های مصنوعی و تمایل روزافزون به محصولات طبیعی، اهمیت بهینه‌سازی فرایند تولید شیر خرم را دوچندان کرده است. با این حال، روش‌های سنتی تغلیظ، مانند گرمایش با بخار و گرمایش مستقیم، با چالش‌های جدی روبه‌رو هستند. روش‌های یادشده که نیازمند دماهای بالا و زمان‌های طولانی هستند، می‌توانند به تخریب مواد مغذی، تغییر رنگ و ایجاد طعم نامطلوب در محصول نهایی منجر شوند [۲]. افزون‌بر این، مصرف بالای انرژی در این روش‌ها، هم از نظر اقتصادی و هم از منظر زیست‌محیطی، مطلوب نیست [۳].

در پاسخ به این چالش‌ها، فناوری گرمایش اهمی - خلاء به‌عنوان یک راهکار نوآورانه مطرح شده است. این روش که ترکیبی هوشمندانه از گرمایش الکتریکی و شرایط خلاء هست، می‌تواند ضمن حفظ کیفیت محصول، مصرف انرژی را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد [۴]. شرایط خلاء در این روش، علاوه بر جلوگیری از اکسیداسیون و تخریب مواد مغذی، امکان تغلیظ در دمای پایین‌تر را نیز فراهم می‌کند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از گرمایش اهمی - خلاء می‌تواند به بهبود چشمگیر کیفیت محصول نهایی منجر

شود [۵]، [۶]. این بهبود کیفیت نه تنها در حفظ ارزش تغذیه‌ای، بلکه در ویژگی‌های حسی محصول نیز مشهود است [۷]. گفتنی است که این فناوری با کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، گامی مهم در راستای تولید پایدار محسوب می‌شود [۸].

گرمایش اهمی یک فرایند حرارتی نوین است که با موفقیت برای فراوری انواع آب‌میوه‌ها به کار گرفته شده است. این روش نه تنها زمان پردازش را کاهش می‌دهد، بلکه دمای همگن پردازش حرارتی را نیز حفظ می‌کند و در نتیجه کیفیت آب‌میوه اصلی را به خوبی نگه می‌دارد. به همین دلیل، گرمایش اهمی به‌عنوان یک جایگزین مناسب در نظر گرفته می‌شود و با توجه به مزایای مرتبط با کیفیت، توجه صنایع غذایی را به خود جلب کرده است [۹].

پژوهش حاضر با هدف ارائه یک بررسی جامع و مقایسه‌ای میان روش‌های مختلف تغلیظ شیر خرم، به‌ویژه تمرکز بر مزایا و چالش‌های فناوری گرمایش اهمی - خلاء، انجام شده است. در این مطالعه، پارامترهای کلیدی شامل انرژی مصرفی، راندمان حرارتی، شاخص‌های کیفی محصول و ویژگی‌های حسی ارزیابی شده‌اند.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. تهیه و آماده‌سازی مواد اولیه

نمونه‌های تازه خرم رقم کبکاب از فروشگاه‌های معتبر سطح شهر کامیاران، استان کردستان تهیه شدند. در مرحله اول آماده‌سازی، بازرسی دقیق و جداسازی نمونه‌های آسیب‌دیده، فاسد و نامرغوب انجام شد تا از کیفیت مطلوب مواد اولیه اطمینان حاصل گردد. در مرحله بعد، نمونه‌های سالم انتخاب‌شده با آب شهری شست‌وشو داده شدند تا هرگونه آلودگی و گرد و غبار از سطح آن‌ها زدوده شود. پس از جداسازی هسته‌ها، خرم و آب به نسبت ۱ به ۳ وزنی با استفاده از یک دستگاه مخلوط‌کن خانگی (مدل بوش ساخت کشور آلمان) به مدت ۱۵ دقیقه مخلوط شدند.

در مرحله نهایی، به منظور جداسازی ذرات درشت و ناخالصی‌ها، مخلوط حاصل از صافی مناسب عبور داده شد تا

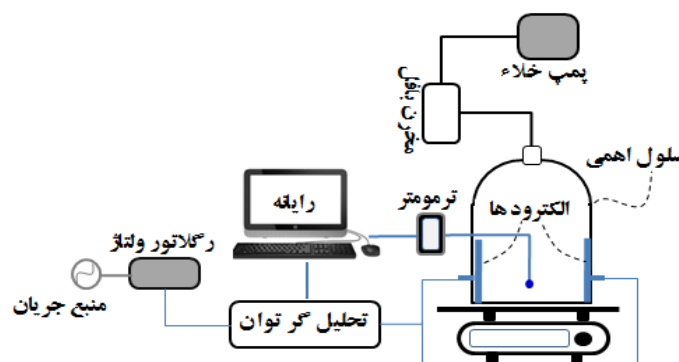
(DW-6090A, Lutron, Thailand) برای اندازه شدت جریان الکتریکی و توان مصرفی، دو عدد الکتروود از فولاد ضد زنگ 316L با ضخامت ۲ میلی‌متر (با فاصله ۱۰ سانتی‌متر)، دو عدد ترموکوپل دما با پوشش تفلونی برای اندازه‌گیری دمای محصول طی فرایند گرمایش، یک پمپ خلاء (365 W, value01 Model, China)، یک مخزن بافل به‌منظور ایجاد فشار یکنواخت بر سطح محصول طی فرایند، یک کندانسور (آب + یخ) به‌منظور جلوگیری از ورود بخارات محصول به داخل پمپ، یک میکروکنترلر به‌منظور انتقال داده‌های و ثبت آنها در محیط اکسل است.

عصاره‌ای صاف و عاری از مواد زائد به دست آید. تمامی مراحل فوق با رعایت اصول بهداشتی و در شرایط آزمایشگاهی استاندارد انجام شد.

۲.۲. سامانه گرمایش اهمی - خلاء

تصویر و شماتیک سامانه گرمایش اهمی - تحت خلاء در شکل (۱) نشان داده شده است.

سامانه گرمایش اهمی - خلاء شامل یک محفظه پیرکس با ابعاد $25 \times 10 \times 10$ cm، یک رگلاتور ولتاژ (1kW, Omega Korea) برای ایجاد سطوح مختلف ولتاژ، یک پاور آنالیزر



شکل ۱: شماتیک و تصویر سامانه گرمایش اهمی - خلاء

Fig 1. Schematic and image of a resistive heating vacuum system

۵.۲. تغییرات pH

pH نمونه‌ها با استفاده از دستگاه pH متر (اترون، ساخت ایران) در دمای اتاق $1 \pm 22^\circ\text{C}$ اندازه‌گیری شد. تغییرات pH نمونه با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد [۱۱]:

$$\Delta\text{pH} = \left(\frac{\text{pH}_f - \text{pH}_0}{\text{pH}_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

که در آن، pH_0 و pH_f به ترتیب بیانگر pH نمونه تازه و فراوری شده و ΔpH تغییرات pH نمونه (%) است.

۶.۲. تغییرات رنگ

پارامترهای رنگی L-a-b نمونه‌های تازه و تغلیظ شده با استفاده از یک سامانه پردازش تصویر کالیبره شده اندازه‌گیری شد. تغییرات رنگی کل با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد [۱۲]:

$$\Delta E = \sqrt{(L_p - L_f)^2 + (a_p - a_f)^2 + (b_p - b_f)^2} \quad (2)$$

که در آن، ΔE تغییرات رنگی کل نمونه و اندیس‌های F و P به ترتیب بیانگر محصول نهایی و محصول تازه است.

۷.۲. ارزیابی حسی

ارزیابی حسی محصول تغلیظ شده بر مبنای مقیاس امتیازدهی انجام شد. به این منظور، نمونه‌ها کدگذاری شدند و در اختیار پنج نفر پانلیست قرار گرفتند. از پانلیست‌ها خواسته شد که نمونه‌ها را از نظر رنگ، طعم و بو، بین ۱ تا ۵ (۱: غیرقابل قبول، ۲: قابل قبول، ۳: مطلوب، ۴: خیلی خوب، ۵: عالی) امتیازدهی کنند. هرچه امتیاز بالاتر باشد، بیانگر مطلوبیت بیشتر نمونه‌ها خواهد بود.

۸.۲. انرژی مصرفی ویژه

انرژی مصرفی ویژه سامانه گرمایش اهمی با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد [۱۳]:

$$\text{SEC} = \frac{\sum(VI \times \Delta t) + P_{vp} \times t}{m_w} \quad (3)$$

آزمایشات در سطوح گرادیان ولتاژ ۱۰، ۱۵، ۲۰ و 25 V/cm و فشار ۵۵، ۷۰، ۸۵ و 100 kPa در سه تکرار انجام شد. فرایند گرمایش تا رسیدن محصول به بریکس ۷۴ ادامه یافت. پمپ خلاء به مدت ۲ دقیقه قبل از شروع فرایند گرمایش روشن شد تا سطح فشار ثابتی بر روی ماده ایجاد کند. در هر فرایند، از 250°C گرم نمونه استفاده شد.

طی فرایند گرمایش، پارامترهای دمای محصول، جریان الکتریکی عبوری از محصول، ولتاژ و توان مصرفی با فواصل زمانی ۱ ثانیه اندازه‌گیری و ثبت شدند. پس از اتمام هر آزمایش، محفظه به همراه الکترودها، با استفاده از آب شهری کاملاً شست‌وشو داده و تمیز شدند. پس از اتمام فرایند گرمایش نمونه و سرد شدن آنها، نمونه‌های داخل بشرهای شیشه‌ای ۵۰ سی‌سی ذخیره و تا انجام آزمایشات کیفی، در دمای 4°C نگهداری شدند.

۳.۲. سامانه گرمایش رایج

سامانه گرمایش رایج شامل یک هیتر الکتریکی با توان مصرفی 1000 W ، یک محفظه شیشه‌ای پیرکس، سنسورهای دما جهت اندازه‌گیری دمای محصول طی فرایند گرمایش است. در هر آزمایش، از 250°C گرم نمونه اولیه استفاده شد. فرایند گرمایش با ۱۰۰٪ توان هیتر الکتریکی تا رسیدن محصول به بریکس ۷۴ ادامه یافت. پس از اتمام هر آزمایش، محفظه با استفاده از آب شهری کاملاً شست‌وشو داده و تمیز شد. پس از اتمام فرایند گرمایش نمونه و سرد شدن آنها، نمونه‌ها در داخل بشرهای شیشه‌ای ۵۰ سی‌سی ذخیره و تا انجام آزمایشات کیفی، در دمای 4°C نگهداری شدند.

۴.۲. نرخ گرمایش

برای به دست آوردن نرخ گرمایش، ابتدا نمودار تغییرات دما - زمان رسم شد. شیب نمودار دما - زمان در طی فرایند گرمایش اولیه (از ابتدای فرایند گرمایش تا شروع تبخیر آب ماده) به عنوان نرخ گرمایش در نظر گرفته شد [۱۰].

که در آن، η_{ex} راندمان اکسرژی (/)، EX_p مقدار اکسرژی محصول نهایی (J)، EX_{evp} مقدار اکسرژی بخار آب (J)، EX_f اکسرژی محصول ورودی (J)، EX_{OHV} اکسرژی سامانه گرمایش اهمی - خلاء (J) است.

مقدار اکسرژی محصول خروجی از رابطه زیر محاسبه شد [۱۴]:

$$EX_p = m_p C_p \left[T_p - T_{\infty} - T_{\infty} \ln \left(\frac{T_p}{T_{\infty}} \right) \right] \quad (۸)$$

که در آن، m_p جرم محصول نهایی (kg)، C_p ظرفیت گرمایی ویژه محصول نهایی (J/kg.K)، T_p دمای محصول (K)، T_{∞} دمای محصول (K) است.

مقدار اکسرژی آب بخار شده از ماده مطابق با رابطه زیر محاسبه شد [۱۵]:

$$EX_{evp} = m_w \left[1 - \frac{T_{\infty}}{T_p} \right] \times h_{fg} \quad (۹)$$

که در آن، m_w جرم آب بخار شده از ماده (kg) و h_{fg} گرمای نهان تبخیر (J/kg_{evp}) است.

مقدار اکسرژی محصول ورودی از رابطه زیر محاسبه شد [۱۵]:

$$EX_f = m_f C_p \left[T_f - T_{\infty} - T_{\infty} \ln \left(\frac{T_f}{T_{\infty}} \right) \right] \quad (۱۰)$$

که در آن، m_f جرم محصول اولیه (kg) و T_f دمای اولیه ماده محصول (K) است.

مقدار اکسرژی گرمایش اهمی از رابطه زیر محاسبه شد [۱۵]:

$$EX_{OH} = 0.99 \sum (VI \times \Delta t) \quad (۱۱)$$

مقدار اکسرژی مصرفی، توسط پمپ خلاء از رابطه زیر محاسبه شد [۱۴]:

$$EX_{OH} = 0.99 \sum (VI \times \Delta t) + P_{vp} \times t \quad (۱۲)$$

۱۱.۲. تحلیل آماری

آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد. نتایج به صورت مقادیر میانگین $\pm$ انحراف استاندارد گزارش شد. به منظور تحلیل آماری داده‌ها از نرم افزار SPSS. V18 استفاده شد. به منظور

که در آن، SCE بیانگر انرژی مصرفی ویژه برای سامانه گرمایش اهمی - خلاء (J/kg water evp.)، V ولتاژ اعمال - شده بر ماده (V)، I جریان الکتریکی عبوری از ماده (A)، Δt گام زمانی اندازه‌گیری داده‌های جریان و ولتاژ الکتریکی (S) و m_w جرم آب بخار شده از ماده (kg)، P_{vp} توان پمپ خلاء (W) و t مدت زمان روشن بودن پمپ خلاء (S) است.

انرژی مصرفی ویژه سامانه گرمایش استفاده شده با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$SEC = \frac{P_H \times t}{m_w} \quad (۴)$$

که در آن، SCE_v بیانگر انرژی مصرفی ویژه برای سامانه گرمایش رایج (J/kg water evp.)، P توان مصرفی هیتر الکتریکی (W)، t زمان فرایند حرارت‌دهی (S) و m_w جرم آب بخار شده از ماده (kg) است.

۹.۲. راندمان انرژی

راندمان انرژی فرایند تغلیظ شیر خرم از رابطه زیر محاسبه شد [۱۴]:

$$\eta_{en-OHV} = \left(\frac{m_0 C_p \Delta T + m_w h_{fg}}{\sum (VI \times \Delta t) + P_{vp} \times t} \right) \times 100 \quad (۵)$$

$$\eta_{en-CV} = \left(\frac{m_0 C_p \Delta T + m_w h_{fg}}{P \times t} \right) \times 100 \quad (۶)$$

که در آن، m_0 بیانگر جرم اولیه محصول (kg)، C_p ظرفیت گرمایی ویژه ماده (J/kg.K)، ΔT تغییرات دمایی ماده (K)، h_{fg} گرمای نهان تبخیر (J/kg water)، m_w جرم آب بخار شده از ماده (kg)، η_{en} راندمان انرژی (/) و اندیس‌های OHV و CV به ترتیب بیانگر روش‌های گرمایش اهمی - خلاء و گرمایش رایج است.

۱۰.۲. راندمان اکسرژی

راندمان اکسرژی کل سامانه گرمایش از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\eta_{ex} = \left(\frac{EX_p + EX_{evp}}{EX_f + EX_{OHV}} \right) \times 100 \quad (۷)$$

افزایش نرخ گرمایش با گرادیان ولتاژ، این است که وقتی محصول در ولتاژ بالاتری تحت تغلیظ قرار می‌گیرد، انرژی بالای ورودی به سلول، فعالیت مولکول‌های آب را افزایش داده و منجر به بالا رفتن سرعت حرارت‌دهی می‌شود [۱۶]، [۱۴].

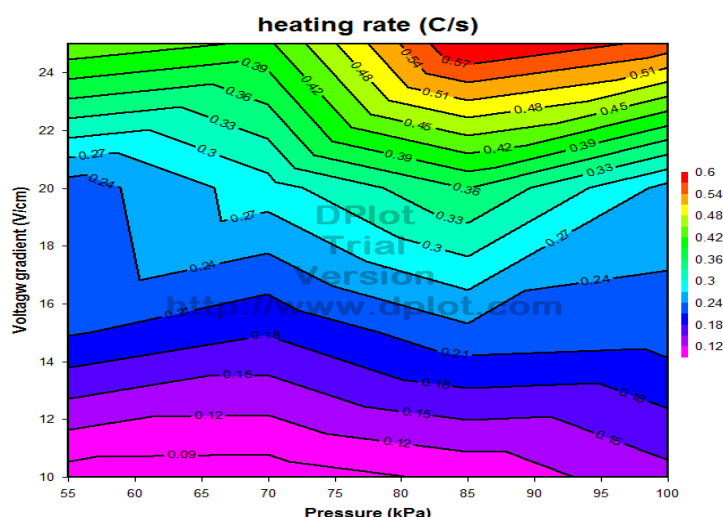
نرخ گرمایش در فشار اتمسفر بیشتر از شرایط خلاء بود، زیرا با کاهش فشار بر روی سطح ماده، هدایت الکتریکی محصول کاهش پیدا می‌کند [۱۷]. بنابراین نرخ انرژی گرمایی تولید شده در داخل محصول کاهش یافته و در نهایت منجر به کاهش نرخ گرمایش می‌شود [۱۸].

بررسی اثر متغیر مستقل (گرادیان ولتاژ) بر پاسخ‌های اندازه‌گیری شده از تحلیل آماری آنالیز واریانس و مقایسه میانگین دانکن در سطح آماری ۵٪ استفاده شد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. نرخ گرمایش و زمان فراوری

تأثیر گرادیان ولتاژ و فشار وارد شده بر سطح ماده بر روی نرخ گرمایش فرایند تغلیظ شیر خرم در شکل (۲) نشان داده شده است. طبق نتایج به دست آمده، در تمامی سطوح فشار، با افزایش گرادیان ولتاژ، نرخ گرمایش افزایش یافت. علت

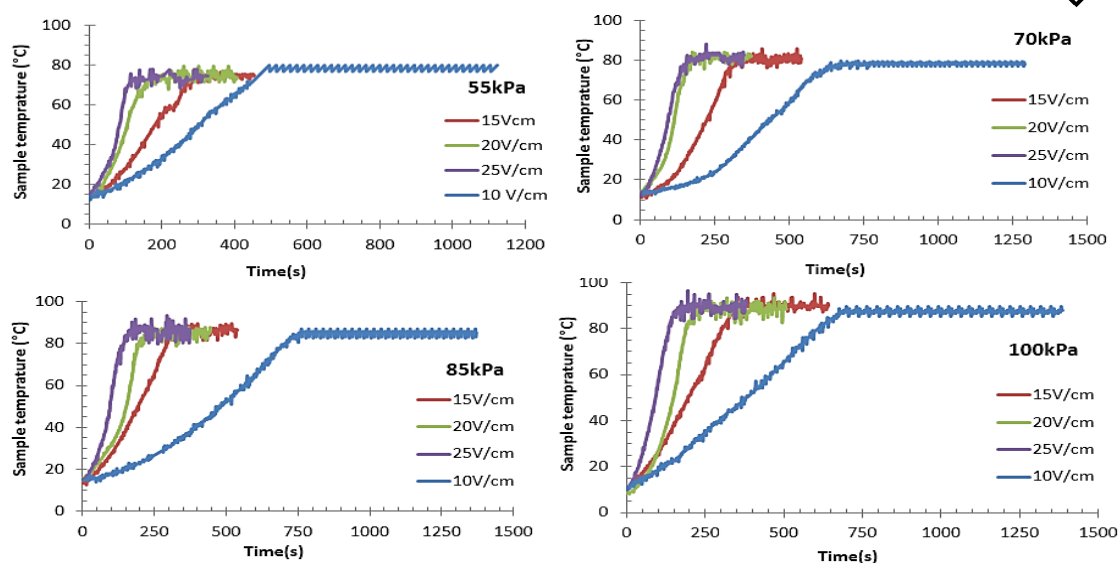


شکل ۲. تأثیر گرادیان ولتاژ و فشار بر نرخ گرمایش شیر خرم طی فرایند گرمایش اهمی - خلا

Fig 2. Effect of Voltage and Pressure Gradients on the Heating Rate of Date Syrup During the Resistive Heating Vacuum Process

شد. نتایج نشان دادند که در گرادیان ولتاژهای بالا، اثر فشار بر تغییرات لازم فراوری کاهش پیدا کرد. به این معنا که در گرادیان ولتاژ ۱۰ V/cm با کاهش فشار وارده بر سطح ماده، از ۱۰۰ kPa به ۵۵ kPa، زمان فراوری ۲۳٪ کاهش یافت، در حالی که در گرادیان ولتاژ ۲۵ V/cm، با کاهش فشار، زمان فراوری ۹٪ کاهش یافت. کمترین زمان لازم برای تغلیظ شیر خرم برابر با ۱۱/۲ min، تحت شرایط ۵۵ kPa و ۲۵ V/cm و بیشترین زمان فراوری، برابر با ۲۳/۱ min، تحت شرایط ۱۰۰ kPa و ۱۰ V/cm به دست آمد.

روند تغییرات دمای محصول طی فرایند حرارت‌دهی، برای هر یک از سطوح آزمایشی، در شکل (۳) نمایان است. دمای شیر خرم از ۱۵ °C به ۹۲ °C برای فشار ۱۰۰ kPa (فشار اتمسفر - بدون خلاء)، ۸۶ °C برای فشار ۸۵ kPa، ۸۰ °C برای فشار ۷۰ kPa و ۷۵ °C برای فشار ۵۵ kPa افزایش یافت. سپس تا انتهای فرایند تغلیظ ثابت ماند. شکل (۳) تأثیر دو پارامتر فشار وارد شده بر سطح ماده و گرادیان ولتاژ، بر زمان لازم برای تغلیظ شیر خرم در سامانه گرمایش اهمی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش گرادیان ولتاژ، حجم انرژی ورودی به داخل سلول اهمی به حد چشمگیری افزایش یافت. این افزایش انرژی ورودی، منجر به افزایش نرخ تبخیر و در نتیجه کاهش زمان فراوری



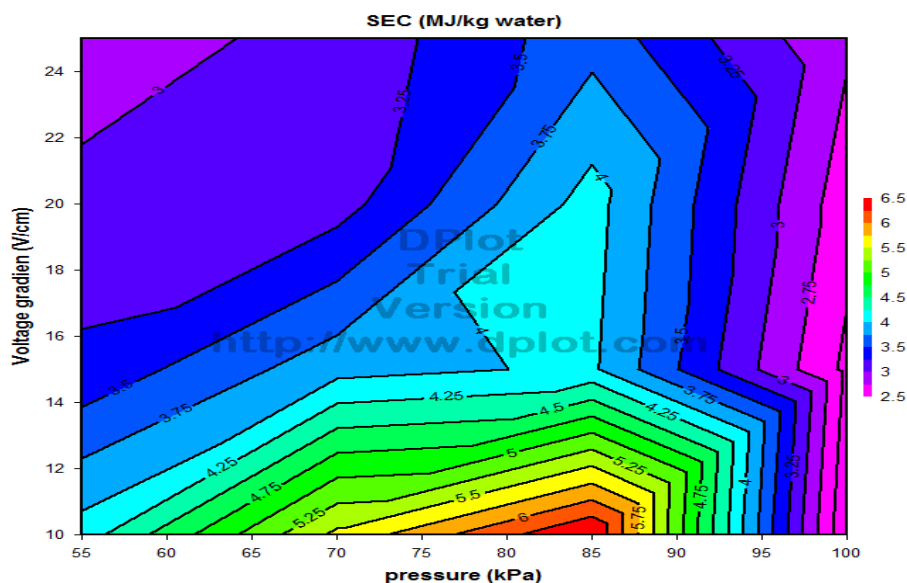
شکل ۳. تغییرات دمایی نمونه‌های تغلیظ‌شده شیر خرمای فرایند گرمایش
Fig 3. Temperature Changes in Concentrated Date Syrup Samples During the Heating Process

می‌توان اضافه‌شدن انرژی مصرفی توسط پمپ خلاء دانست، زیرا در حالت اتمسفر، انرژی پمپ وجود ندارد. همچنین طبق نتایج مطالعات دیگر محققین، با کاهش فشار هدایت الکتریکی ماده کاهش پیدا می‌کند [۱۹]. این امر سبب می‌شود انرژی الکتریکی عبوری به ماده کاهش یابد، در نتیجه نرخ گرمایش دچار افت شدید و در نهایت انرژی مصرفی یا به عبارتی زمان فرایند، افزایش پیدا کند.

با سیر نزولی فشار از ۸۵ به ۵۵ kPa، مقدار انرژی مصرفی کاهش یافت؛ چراکه با کاهش فشار، ظرفیت گرمایی ویژه و همچنین گرمای نهان تبخیر ماده نیز کم شد.

۲.۳. انرژی مصرفی ویژه

تأثیر گرادیان ولتاژ و فشار بر انرژی مصرفی ویژه طی فرایند تغلیظ شیر خرمای با روش گرمایش اهمی، در شکل (۴) ترسیم شده است. باتوجه به نتایج، دریافتیم که با افزایش گرادیان ولتاژ، انرژی مصرفی از ۶ تا ۳ MJ/Kg water کاهش یافت. به این دلیل که با افزایش گرادیان ولتاژ، انرژی ورودی به داخل محفظه افزایش پیدا کرد. در نتیجه زمان فراوری کاهش و نرخ تبخیر افزایش و در نهایت انرژی مصرفی پایین آمد. از سوی دیگر، با کاهش فشار، انرژی مصرفی ویژه از ۲/۷۵ به ۶ MJ/kg water افزایش پیدا کرد. علت این امر را



شکل ۴. تأثیر فشار و گرادیان ولتاژ بر انرژی مصرفی ویژه فرایند تغلیظ شیر خرم با روش گرمایش اهمی

Fig 4. Effect of Pressure and Voltage Gradient on the Specific Energy Consumption in the Concentration Process of Date Syrup Using Resistive Heating

یافته‌های مطالعات اخیر با نتایج به دست آمده توسط [۲۲، ۲۱، ۱۵] که نرخ تولید گرما را حین گرمایش اهمی مواد مایع گزارش کردند، نشان داد که افزایش نرخ تولید گرما بسته به گرادیان ولتاژ اعمال شده است.

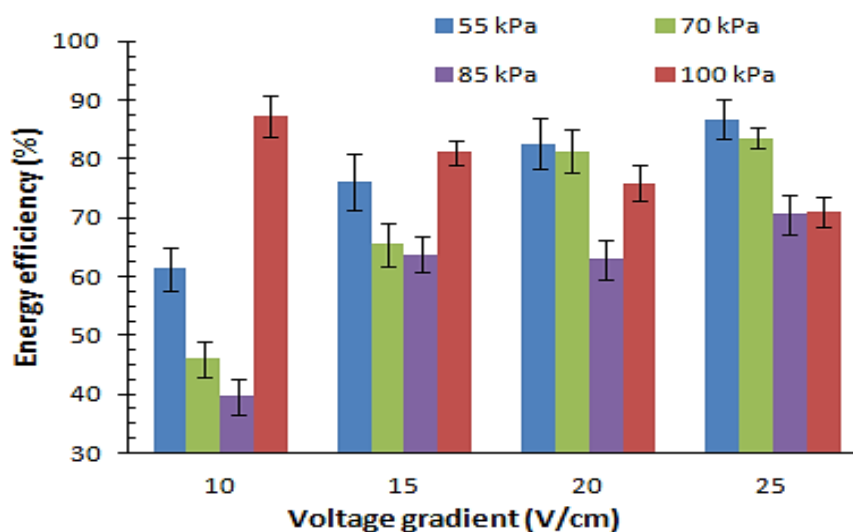
فرایند گرمایش اهمی تابع زمان فرایند و توان ورودی به سلول گرمایش و فشار است. با افزایش توان ورودی، هرچند زمان فراوری کاهش می‌یابد، اما انرژی مصرفی (توان $\times$ زمان) تغییر چندانی از خود نشان نخواهد داد [۲۳].

۳.۳. راندمان انرژی

تأثیر پارامترهای مورد بررسی (گرادیان ولتاژ و فشار وارده بر سطح ماده) بر راندمان حرارتی فرایند تغلیظ اهمی شیر خرم در شکل (۵) نشان داده شده است.

هرچند کاهش فشار سبب افت هدایت الکتریکی و در نتیجه کاهش انرژی داخلی ماده شد، اما اثر ظرفیت گرمایی ویژه بر کاهش فشار و گرمای نهان تبخیر بیشتر از کاهش هدایت الکتریکی بود [۱۹]. بنابراین، انرژی لازم جهت تبخیر نیز کاهش پیدا کرد. لازم به ذکر است که قند هم یکی از عوامل افت شدید هدایت الکتریکی ماده است [۲۰]. با افزایش غلظت، میزان آب موجود در ماده کاهش و در نتیجه میزان قند افزایش یافت که این امر باعث کاهش هدایت الکتریکی شد [۲۰].

از آنجایی که نرخ انرژی تولید شده در محصول، رابطه مستقیمی با هدایت الکتریکی ماده دارد، انرژی مصرف شده در ۱۰۰ kPa نسبت به سطوح دیگر فشار پایین‌تر بود. بیشترین انرژی مصرفی برابر با ۶/۵۲ MJ/kg water، تحت شرایط ۱۰ V/cm و ۱۰۰ kPa و کمترین مقدار آن، برابر ۲/۹۱ MJ/kg water، تحت شرایط ۲۵ V/cm و ۵۵ kPa به دست آمد.



شکل ۵. تأثیر فشار و گرادیان ولتاژ بر راندمان انرژی فرایند تغلیظ شیر خرمای به روش گرمایش اهمی

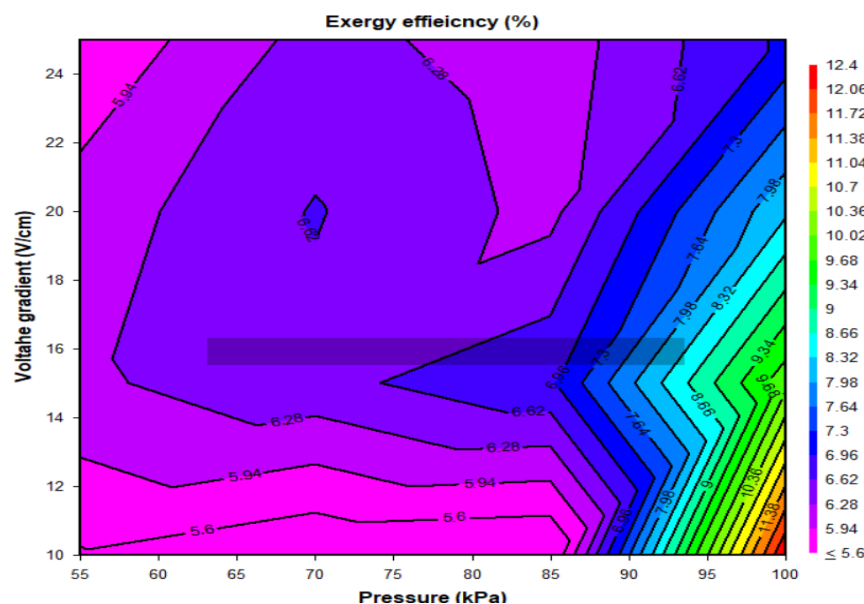
Fig 5. Effect of Pressure and Voltage Gradient on the Energy Efficiency of the Concentration Process of Date Syrup Using Resistive Heating

گزارش (2003) Icier نشان داد که راندمان حرارتی برای فرایند گرمایش اهمی مواد مایع بین ۴۷ تا ۹۲٪ بود. راندمان انرژی برای فرایند گرمایش اهمی در محدوده ۶۷ الی ۸۵/۵٪ برای تغلیظ رب گوجه‌فرنگی [۱۴]، ۲۳/۹ الی ۵۵/۱٪ برای تغلیظ رب انار [۲۴] و ۶۶/۶ الی ۷۴/۲٪ برای شیر انگور [۱۳] گزارش شد.

۴.۳. راندمان اکسرژی

تأثیر فشار و گرادیان ولتاژ بر راندمان اکسرژی سیستم در شکل (۶) نشان داده شده است.

از نتایج به‌دست‌آمده درمی‌یابیم که کاهش فشار واردشده بر سطح ماده، سبب افزایش معناداری در راندمان حرارتی فرایند تغلیظ شد. کمترین راندمان انرژی در فشار ۸۵ kPa، در تمام سطوح ولتاژ رخ داد. با این حال، در حالت اتمسفر با افزایش گرادیان ولتاژ، راندمان سیر نزولی داشت، زیرا با افزایش گرادیان ولتاژ، هرچند زمان فراوری کم می‌شود، اما انرژی اتلافی سیستم نیز افزایش می‌یابد؛ در حالی که در خلاء، روندی معکوس دیده می‌شود. بدان معنا که با افزایش گرادیان ولتاژ، راندمان افزایش پیدا کرد. راندمان حرارتی برای حالت اتمسفر از ۷۴ تا ۹۰٪ بود، در صورتی که برای فشار ۵۵ kPa، راندمان انرژی از ۶۰ تا ۸۴٪ و برای ۷۰ kPa از ۴۵ تا ۸۴٪ و برای ۸۵ kPa از ۴۰ تا ۷۳٪ افزایش یافت.



شکل ۶. اثر فشار و گرادیان ولتاژ بر راندمان اکسرژی فرایند تغلیظ شیر خرم با روش گرمایش اهمی

Fig 6. Effect of Pressure and Voltage Gradient on the Exergetic Efficiency of the Concentration Process of Date Syrup Using Resistive Heating

با اعمال فشار متوسط، با افزایش گرادیان ولتاژ راندمان اکسرژی از ۵/۶٪ به ۶/۶۲٪ افزایش یافته است. با این حال، در خلأ بالا در داخل محفظه اهمی، با افزایش گرادیان ولتاژ اختلاف معناداری در مقدار راندمان اکسرژی مشاهده نشد ($p > 0.05$). بیشترین مقدار اکسرژی (۱۲/۴۱٪) در فشار ۱۰۰ kPa و ۱۰ V/cm و کمترین مقدار آن (۵/۲۱٪)، تحت شرایط ۸۵ kPa و ۱۰ V/cm به دست آمد [۱۵].

راندمان اکسرژی فرایند تغلیظ آب گوجه‌فرنگی را به روش گرمایش اهمی تحت شرایط خلأ، در محدوده ۲۷/۷ الی ۶۴/۳٪ بیان کردند [۲۵] راندمان اکسرژی فرایند تغلیظ آب پرتقال به روش گرمایش در فشار اتمسفر را در محدوده ۳۱/۵ الی ۵۹/۵٪ بیان کردند [۲۶] و راندمان اکسرژی فرایند تغلیظ آب آلبالو به روش گرمایش اهمی -خلأ، در محدوده ۱۱/۴ الی ۱۷/۵٪ گزارش شد.

۴.۳. پارامترهای رنگی

نتایج به دست آمده برای پارامترهای رنگی نمونه‌های فراوری شده در جدول (۱)، نشان‌دهنده تأثیر معنادار فشار و گرادیان ولتاژ بر تغییرات پارامتر رنگی L در نمونه‌ها است. بالاترین مقدار L برای تمامی سطوح گرادیان ولتاژ در فشار ۷۵ kPa حاصل شد. با کاهش فشار از ۷۵ به ۵۵ kPa، مقدار L به میزان چشمگیری کاهش یافت.

نتایج به دست آمده نشان داد که راندمان اکسرژی برای فرایند گرمایش اهمی شیر خرم در محدوده ۵/۲۱٪ تا ۱۲/۴۱٪ متغیر است. در هریک از سطوح گرادیان ولتاژ، با افزایش میزان خلأ بر روی سطح ماده، راندمان اکسرژی به طور معناداری کاهش یافت. علت در دو عامل مشهود است:

۱. کاهش هدایت الکتریکی: با افزایش میزان خلأ، هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد [۱۳]. این کاهش، منجر به افت نرخ گرمای تولید در ماده شده و در نهایت سبب کاهش معنادار راندمان اکسرژی می‌شود.

۲. عملکرد پمپ خلأ: در فشار اتمسفر، پمپ خلأ خاموش است، لذا اکسرژی مصرفی توسط پمپ خلأ برابر صفر بوده و این امر باعث بالا بودن راندمان اکسرژی در فشار اتمسفر می‌شود.

طبق نتایج به دست آمده، در محدوده فشار ۹۰ الی ۱۰۰ kPa، با افزایش گرادیان ولتاژ، راندمان اکسرژی به طور معناداری کاهش یافت ($p < 0.05$). افزایش گرادیان ولتاژ در فرایند تغلیظ اهمی، باعث افزایش نرخ تولید گرما و انجام فرایند تبخیر در دمای $92 \pm 1^\circ$ شد. این امر، باعث ایجاد نقاط داغ موضعی و تبخیر سریع شده و در نتیجه، برگشت‌ناپذیری‌ها و تلفات حرارتی را افزایش و در نهایت، راندمان اکسرژی فرایند را کاهش می‌دهد.

جدول ۱. تأثیر فشار و گرادیان ولتاژ بر پارامترهای رنگی شیر خرمای فرآوری‌شده به روش گرمایش اهمی

Table 1. Effect of Pressure and Voltage Gradient on the Color Parameters of Date Syrup Processed by Resistive Heating

Color parameters	Pressure (kPa)	Voltage gradient (V/cm)			
		10	15	20	25
L	55kPa	29.48	29.48	29.48	29.48
a		0.50	0.50	0.50	0.50
b		-1.27	-1.27	-1.27	-1.27
ΔE		4.81	5.28	5.49	5.49
L	70kPa	31.18	31.18	31.18	31.18
a		0.96	0.96	0.96	0.96
b		-3.52	-3.52	-3.52	-3.52
ΔE		5.79	5.69	5.50	5.81
L	85kPa	26.78	26.69	26.61	26.57
a		0.57	0.58	0.25	0.73
b		-1.18	-2.76	-1.39	-3.30
ΔE		5.22	9.48	5.65	7.37
L	100kPa	27.62	27.62	28.16	27.80
a		0.04	0.04	0.74	0.27
b		-1.41	-1.41	-3.17	-1.99
ΔE		5.36	6.88	5.77	7.88

روشن‌تر از شیر تازه هستند. آنها گزارش کردند که این تغییرات رنگی می‌توانند به دلیل واکنش‌های غیرآنزیمی و نرخ سریع گرمایش در گرادیان ولتاژهای بالا باشد [۲۹]. نتایج این تحقیق نشان دادند که تغییرات رنگ، با کاهش فشار وارده بر سطح ماده، کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر، کمترین مقدار تغییرات رنگ، در فشار ۵۵ kPa دیده شده است. در فشارهای بالا، دمای نمونه‌ها نسبت به فشارهای پایین بیشتر است و این دماهای بالا می‌توانند باعث کاراملیزاسیون قندها و در نتیجه منجر به تغییرات رنگی بیشتر در نمونه‌ها شوند. همچنین، دماهای بالا می‌توانند عامل تجزیه ترکیبات رنگی موجود در نمونه‌ها نیز باشند [۸]. گزارش کردند که در فشار خلاء، دسترسی به اکسیژن کاهش می‌یابد و این امر منجر به کاهش اکسیداسیون ترکیبات رنگی و قندی ماده می‌شود که در نتیجه تغییرات رنگی کمتری را به همراه دارد [۲۳]. بیان کردند پارامتر رنگی a گیلای طی گرمایش اهمی کاهش

این کاهش می‌تواند به تغییرات فیزیکی و شیمیایی در ساختار نمونه‌ها نسبت داده شود. تحقیقات نشان داد که مقدار L به طور کلی با افزایش گرادیان ولتاژ کاهش می‌یابد [۲۷-۴۴] این پدیده به واکنش‌های شیمیایی نظیر کاراملیزاسیون و تغییرات رنگی ناشی از واکنش‌های قندی مربوط می‌شود. واکنش‌های مذکور، به ویژه در فرایندهای حرارتی می‌توانند منجر به تیرگی رنگ شیر خرمای شوند. افزون بر این، تخریب آنتوسیانین‌ها و تشکیل رنگ قهوه‌ای در طی فرایندهای حرارتی نیز می‌تواند به عنوان دلایل تغییر رنگ در نظر گرفته شود [۲۸]. از سوی دیگر، تغییرات رنگی (ΔE) در نمونه‌ها، با افزایش گرادیان ولتاژ افزایش یافت. در تمامی سطوح فشار مورد آزمایش، با افزایش سطح گرادیان ولتاژ، مقدار ΔE نیز بالا رفت. محققین نشان دادند که نمونه‌های فرآوری‌شده آب نیشکر با استفاده از گرمایش اهمی، به دلیل تغییر در پارامترهای L، a و b، زردتر و

ماده و به آرامی منتقل می‌شود. این امر موجب افزایش واکنش‌های منجر به تغییر رنگ نمونه‌ها می‌شود.

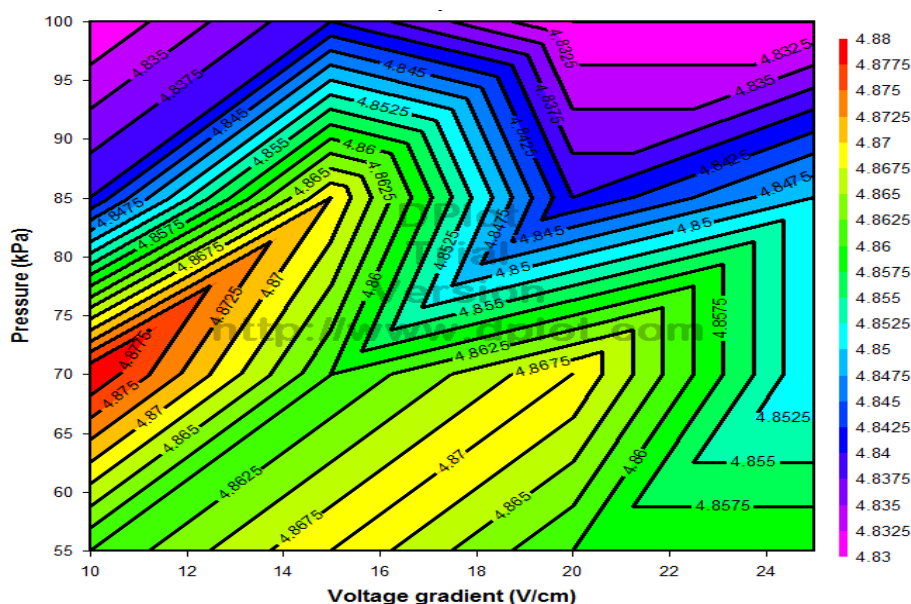
در روش گرمایش اهمی، به دلیل تولید انرژی داخلی و انتقال حرارت یکنواخت در ماده، حفظ رنگ محصول به طور قابل-توجهی بهتر صورت می‌گیرد. این یافته‌ها اهمیت انتخاب بهینه پارامترهای فراوری را در حفظ کیفیت رنگ محصولات غذایی نشان می‌دهد.

۳.۵. pH

اثرات تغلیظ اهمیک- خلا بر روی pH شیر خرم تحت شرایط مختلف فشار و گرادیان ولتاژ بررسی شد (شکل ۷).

می‌یابد. همچنین، پژوهشگران تغییرات قابل توجهی را در پارامترهای رنگی a و b آب آلبالو، پس از تغلیظ با تبخیر خلا معمولی و خلا اهمی در ولتاژ گرادیان 10 V/cm ، گزارش کردند [۲۸]. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مقدار ΔE در روش گرمایش رایج به طور معناداری بیشتر از روش گرمایش اهمی است.

علت پایین بودن تغییرات رنگی در نمونه‌های فراوری شده با روش گرمایش اهمی، به زمان کمتر فراوری، توزیع حرارتی یکنواخت در ماده و واکنش‌های الکتروشیمیایی مربوط می‌شود. کوتاهی زمان در معرض حرارت قراردادن نمونه‌ها می‌تواند به حفظ رنگ و ترکیبات شیمیایی آن‌ها کمک کند. در مقابل، در روش حرارت سنتی، گرما از طریق هدایت به



شکل ۷. تأثیر فشار و گرادیان ولتاژ بر pH شیر خرمی فراوری شده به روش گرمایش اهمی - خلا

Fig 7. Effect of Pressure and Voltage Gradient on pH Date Syrup Processed by Resistive Heating in Vacuum

بود. این مقادیر حداکثر کاهش 0.06 واحد را نسبت به آبمیوه تازه نشان داد.

بیشترین کاهش pH در بالاترین فشار (100 کیلوپاسکال) مشاهده شد که مقادیر به طور پایدار بین $4/83$ و $4/84$ باقی ماند. سطوح متوسط خلا ($70-85$ کیلوپاسکال) مقادیر pH

مقادیر pH تغییرات جزئی نسبت به نمونه قبل از فرایند تغلیظ (4.89 pH) را در طول فرایند نشان داد. این تغییرات عمدتاً به دلیل اعمال خلا بود تا پارامترهای الکتریکی. تغلیظ تحت خلا باعث اسیدی شدن جزئی شد، به طوری که مقادیر pH در تمامی شرایط فرایند، بین $4/83$ تا $4/88$ متغیر

۶.۳. پارامترهای حسی

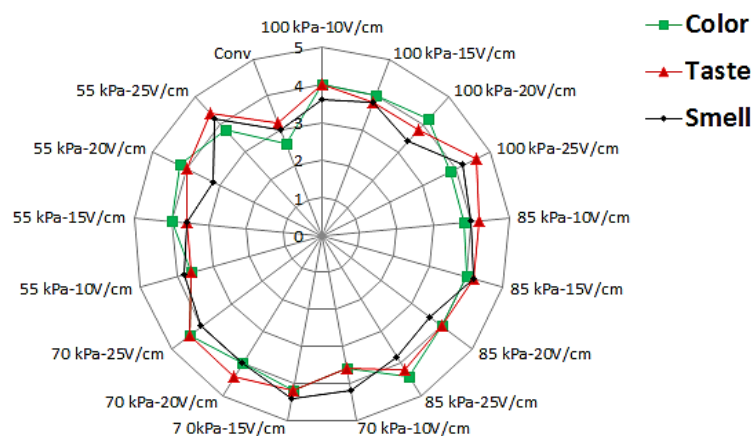
ارزیابی‌های حسی برای پارامتر رنگ توسط افراد پنلیست نشان می‌دهد که کمترین امتیاز رنگ مربوط به فراوری رایج بود. در مقابل بیشترین امتیاز کسب‌شده در گرادیان 25 V/cm برای سطوح فشار 70 و 85 kPa رخ داد. باین حال در روش گرمایش اهمی تحت خلاء کمترین امتیاز مربوط به گرادیان 10 V/cm بوده است؛ چراکه در گرادیان ولتاژهای پایین، نرخ انرژی تولیدی در ماده پایین است. همین علت، باعث طولانی‌تر شدن زمان فراوری و درنهایت منجر به تغییرات بیشتر الکتروشیمیایی در ماده شد که تغییر رنگ نمونه را در پی داشت. همچنین با توجه به نمرات کسب‌شده برای نمونه‌های فراوری‌شده می‌توان بیان کرد که کمترین امتیاز برای روش سنتی بود. باین حال، حداکثر امتیاز کسب‌شده در فشار 70 kPa و گرادیان 15 V/cm به‌دست آمده است. همچنین امتیاز اکتسابی در فشار 85 kPa بیشتر از امتیاز کسب‌شده در فشار اتمسفر (100 kPa) و فشار 55 kPa بود، زیرا در فشارهای خلاء، پارامترهای مربوط به بو توسط پمپ به بیرون کشیده شد و ماده فاقد بوی مناسب شد. از سوی دیگر، دلیل پایین‌بودن پارامتر بو در روش سنتی را می‌توان به طولانی‌بودن زمان فرایند نسبت داد.

نتایج آماری نشان دادند که فشار و گرادیان ولتاژ، تأثیر معناداری بر مزه نمونه‌های فراوری‌شده به روش گرمایش اهمی دارند. از طرفی با افزایش گرادیان ولتاژ از 15 به 25 V/cm ، در فشار 70 kPa امتیاز کسب‌شده برای مزه نمونه‌ها کاهش پیدا کرد. ارزیابی‌های حسی برای پارامتر رنگ در شکل (۸) توسط افراد پنلیست نشان می‌دهد که کمترین امتیاز رنگ مربوط به فراوری رایج بوده است.

بالاتری را گزارش دادند که نشان می‌دهد شرایط خلاء متوسط ممکن است اثرات تغلیظ اسید را به حداقل برساند.

گرادیان ولتاژ، تأثیر حداقلی بر روی pH شیر خرم نشان داد، به‌طوری‌که تغییرات در سطوح فشار ثابت در محدوده ± 0.3 واحد باقی ماند. به‌عنوان مثال، در فشار 100 کیلوپاسکال، مقادیر pH پایداری قابل‌توجهی ($4.83 - 4.84$) را، باوجود افزایش ولتاژ از 10 به 25 ولت حفظ کرد. این پایداری نشان می‌دهد که شدت میدان الکتریکی اعمال‌شده، تغییرات الکتروشیمیایی قابل‌توجه یا مهاجرت یونی که قادر به تغییر تعادل اسید-باز محصول باشد، ایجاد نکرده است. تعامل بین پارامترهای فشار و ولتاژ، هیچ اثر هم‌افزایی قابل‌توجهی بر تغییر pH نشان نداد. این امر بیانگر آن است که تغییرات مشاهده‌شده در pH، عمدتاً وابسته به فشار بوده و نه تحت‌تأثیر ولتاژ. پایداری کلی pH در شرایط مختلف فرآیند نشان می‌دهد که تغلیظ اهمیک-خلاء، به‌طور مؤثری خواص اسید-باز شیر خرم را حفظ می‌کند.

یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهند که اسیدی‌شدن جزئی تحت شرایط خلاء می‌تواند به تغلیظ اسیدهای غیرفرار در طول حذف آب، حفظ اسیدهای آلی فرار تحت فشار کاهش‌یافته، یا اثرات حرارتی جزئی ناشی از گرمایش اهمیک نسبت داده شود. این نتایج گویاست که تغلیظ اهمیک-خلاء تعادل طبیعی اسید-باز شیر خرم را در حین دستیابی به اهداف تغلیظ حفظ می‌کند، به‌طوری‌که پایداری pH در گرادیان‌های مختلف ولتاژ، به‌ویژه ماهیت ملایم گرمایش اهمیک را در این کاربرد نشان می‌دهد.



شکل ۸. نتایج ارزیابی های حسی برای پارامترهای رنگ، مزه و بو شیر خرمای فراوری شده تحت شرایط مختلف

Fig 8. Sensory Evaluation Results for Color, Taste, and Aroma Parameters of Date Syrup Processed Under Different Conditions

در نمونه های فراوری شده با روش گرمایش اهمی- خلا به طور معناداری کمتر از نمونه های تولید شده به روش سنتی بود. این نشان دهنده حفظ کیفیت تغذیه ای و حسی محصول نهایی است. تجزیه و تحلیل pH نیز نشان داد که این روش توانسته است تعادل اسید- باز شیر خرم را حفظ کند که از اهمیت بالایی در کیفیت نهایی محصول برخوردار است.

در پایان، گرمایش اهمی تحت خلا به عنوان یک فناوری کارآمد و پایدار برای تولید شیر خرم توصیه می شود که با کاهش مصرف انرژی، حفظ کیفیت و کاهش زمان فراوری، می تواند به بهبود فرایندهای تولید در صنعت غذایی کمک کند.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

تشکر و قدردانی

از دانشگاه بوعلی سینا و دانشگاه کردستان که با تخصیص بودجه و فراهم کردن امکانات پژوهش، ما را در این مهم یاری رساندند، قدردانی می شود.

در مقابل بیشترین امتیاز کسب شده برای رنگ نمونه های تغلیظ شده در گرادیان ولتاژ ۲۵ V/cm برای سطوح فشار ۷۰ و ۸۵ kPa رخ داد. با این حال، در روش گرمایش اهمی تحت خلا، کمترین امتیاز رنگ مربوط به گرادیان ولتاژ ۲۵ V/cm بود؛ چراکه در گرادیان ولتاژهای پایین، نرخ انرژی تولیدی در ماده پایین است. همین امر، باعث طولانی تر شدن زمان فراوری و در نهایت منجر به تغییرات بیشتر الکتروشیمیایی در ماده می شود و در نهایت تغییر رنگ نمونه می شود.

۴. نتیجه گیری

در این مطالعه، فرایند تولید شیر خرم با استفاده از فناوری گرمایش اهمی تحت خلا بررسی شد. نتایج نشان داد که این روش نسبت به روش های سنتی مانند گرمایش مستقیم، مزایای قابل توجهی دارد. افزایش گرادیان ولتاژ تا ۲۵ ولت بر سانتی متر و کاهش فشار تا ۵۵ کیلوپاسکال، منجر به بهبود نرخ گرمایش و کاهش زمان فراوری تا ۲۳ درصد شد. همچنین، انرژی مصرفی ویژه در شرایط بهینه به حداقل مقدار خود رسید و راندمان انرژی نیز به ۹۰ درصد افزایش یافت. تغییرات رنگی و ویژگی های حسی (رنگ، طعم و بو)

مراجع

- [1] Sain, Mukul, et al. "Effect of Ohmic Heating on Food Products: An In-Depth Review Approach Associated with Quality Attributes." *Journal of Food Processing and Preservation* 2024.1 (2024): 2025937.
- [2] Fadavi A, Yousefi S, Darvishi H, Mirsaeedghazi H (2018) Comparative study of ohmic vacuum, ohmic, and conventional-vacuum heating methods on the quality of tomato concentrate. *Innov Food Sci Emerg Technol* 47:225–230
- [3] Makroo, H. A., N. K. Rastogi, and B. Srivastava. "Ohmic heating assisted inactivation of enzymes and microorganisms in foods: A review." *Trends in Food Science & Technology* 97 (2020): 451-465.
- [4] Sabanci, S. and Icier, F., 2022. Evaluation of an ohmic assisted vacuum evaporation process for orange juice pulp. *Food and Bioproducts Processing*, 131, 156-163.
- [5] Shao, L., Zhao, Y., Zou, B., Li, X. and Dai, R., 2021. Ohmic heating in fruit and vegetable processing: Quality characteristics, enzyme inactivation, challenges and prospective. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 601-616.
- [6] Gavahian, M., Tiwari, B.K., Chu, Y.H., Ting, Y. and Farahnaky, A., 2019. Food texture as affected by ohmic heating: Mechanisms involved, recent findings, benefits, and limitations. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 328-339.
- [7] Priyadarshini, Aparajita, Kalpana Rayaguru, and Prakash Kumar Nayak. "Influence of Ohmic heating on fruits and vegetables: A review." *Journal of Critical reviews* 7.19 (2020): 1952-1959.
- [8] Darvishi, H., Mohammadi, P., Fadavi, A., Saba, M.K. and Behroozi-Khazaei, N., 2019. Quality preservation of orange concentrate by using hybrid ohmic–Vacuum heating. *Food Chemistry*, 289, 292-298.
- [9] Alkanan, Zina T., Ammar B. Altemimi, Asaad RS Al-Hilphy, Francesco Cacciola, and Salam A. Ibrahim. "Application and effects of ohmic-vacuum combination heating on the quality factors of tomato paste." *Foods* 10, no. 12 (2021): 2920.
- [10] Darvishi, H., Hosainpour, A., Nargesi, F. and Fadavi, A., 2015a. Exergy and energy analyses of liquid food in an Ohmic heating process: A case study of tomato production. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 31, 73-82.
- [11] Poojitha, P. and Athmaselvi, K. A. 2016. Stability and storage studies on banana pulp by ohmic heating and conventional heating. *Bioscience and Biotech Reserch Asia*; 13(2): 1231-1238.
- [12] Dai, Y., Miao, J., Yuan, S.Z., Liu, Y., Li, X.M., Dai, R.T., 2013. Colour and sarcoplasmic protein evaluation of pork following water bath and ohmic cooking. *Meat Sci.* 93 (4), 898–905.
- [13] Darvishi, H., Behroozi-Khazaei, N., Koushesh Saba, M., Alimohammadi, Z. and Nourbakhsh, H., 2021. The influence of Ohmic-vacuum heating on phenol, ascorbic acid and engineering factors of kiwifruit juice concentration process. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(9), 4789-4798.
- [14] Darvishi, H., Hosainpour, A., Nargesi, F., Fadavi, A. 2015b. Exergy and energy analyses of liquid food in an Ohmic heating process: A case study of tomato production *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 31: 73 357 –82.
- [16] Icier, F. and Ilicali, C. 2005b. The effects of concentration on electrical conductivity of orange juice concentrates during ohmic heating *European Food Research and Technology*; 220: 406-414.
- [17] Al-Hilphy, Asaad R., Ammar B. Altemimi, Zina T. Alkanan, Aya S. Eweys, Imane Haoujar, Francesco Cacciola, and Tarek G. Abedelmaksoud. "Vacuum ohmic heating: a promising technology for the improvement of tomato paste processing, safety, quality and storage stability." *Basrah Journal of Agricultural Sciences* 36, no. 1 (2023): 214-237.
- [18] Syamsuri, R. "An overview of ohmic heating utilization in the processing of food." In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1230, no. 1, p. 012182. IOP Publishing, 2023.
- [19] Fadavi, A., Salari, S., Mansouri, A. and Hoseini, S., 2020. Effects of vacuum and juice concentration on electrical conductivity by the ohmic method: A case study of sour cherry. *Food and Bioprocess Technology*, 13, 1146-1153.
- [20] Icier, F., Yildiz, H., Sabanci, S., Cevik, M. and Cokgezme, O.F., 2017. Ohmic heating assisted vacuum evaporation of pomegranate juice: Electrical conductivity changes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 39, 241-246.
- [21] Sabanci, S., Icier, F. 2017. Applicability of ohmic heating assisted vacuum evaporation for 421 concentration of sour cherry juice. *Journal of Food Engineering*, 212: 262 422 -270.

- [22] Assiry, A.M., Galiy, M.H., Alsamee, M., Sarifudin, A. 2010. Electrical conductivity of 339 seawater during ohmic heating. *Desalination*, 260: 9 340 –17.
- [23] Mercali, G.D., Schwartz, S., Marczak, L.D.F., Tessaro, I.C., Sastry, S., 2014. Ascorbic acid degradation and color changes in acerola pulp during ohmic heating: effect of electric field frequency. *J. Food Eng.* 123, 1–7.
- [24] Cokgezme, O. F., Sabanci, S., Cevik, M., Yildiz, H., & Icier, F. (2017). Performance analyses for evaporation of pomegranate juice in ohmic heating assisted vacuum system. *Journal of Food Engineering*, 207(4), 1–9.
- [25] Torshizi, M.V., Azadbakht, M. and Kashaninejad, M., 2020. Application of response surface method to energy and exergy analyses of the ohmic heating dryer for sour orange juice. *Fuel*, 278, p.118261.
- [26] Sabanci, S. and Icier, F., 2020. Enhancement of the performance of sour cherry juice concentration process in vacuum evaporator by assisting ohmic heating source. *Food and Bioproducts Processing*, 122, 269-279.
- [27] Shrestha, P., Abedini, A., Parmar, P., Rathnakumar, K. and Poudya, R.L., 2024. Effect of Ohmic Heating on Color Profile of Liquid Food. *Non-Thermal Food Processing Technologies*, 165-199.
- [28] Sabancı, S., Icier, F., 2019. Effects of vacuum ohmic evaporation on some quality properties of sour cherry juice concentrates. *Int. J. Food Eng.* 15 (9), 20190055.
- [29] Brochier, B., Mercali, G.D., Marczak, L.D.F., 2018. Effect of ohmic heating parameters on peroxidase inactivation, phenolic compounds degradation and color changes of sugarcane juice. *Food Bioprod. Process.* 111, 62–71.