### **Journal Pre-proofs**

Black Grape Juice Concentration via Ohmic-Vacuum Hybrid Heating: Quality Parameters, Energy Consumption and Exergy Efficiency

Nazila Zandi, Jalal Khodaei, Hosain Darvishi\*, Nasser Behroozi-Khazaei, Mahmoud Koushesh Saba

DOI: https://doi.org/ 10.22104/ift.2025.7587.2212

To appear in: Innovative Food Technologies (IFT)

Received Date: 1 May 2025 Revised Date: 26 May 2025 Accepted Date: 31 May 2025



Please cite this article as: Nazila Zandi, Jalal Khodaei, Hosain Darvishi\*, Nasser Behroozi-Khazaei, Mahmoud Koushesh Saba, Black Grape Juice Concentration via Ohmic-Vacuum Hybrid Heating: Quality Parameters, Energy Consumption and Exergy Efficiency, *Innovative Food Technologies (2025)*, doi: https://doi.org/10.22104/ift.2025.7587.2212

This is a PDF file of an article that has undergone enhancements after acceptance, such as the addition of a cover page and metadata, and formatting for readability, but it is not yet the definitive version of record. This version will undergo additional copyediting, typesetting and review before it is published in its final form, but we are providing this version to give early visibility of the article. Please note that, during the production process, errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

© 2023 The Author(s). Published by irost.org.

مقاله پژوهشی

تغليظ آب انگور سياه با استفاده از سيستم تركيبي گرمايش اهمي-خلاء:

# پارامترهای کیفی، انرژی مصرفی و راندمان اکسرژی

نازیلا زندی<sup>۱</sup>، جلال خدایی<sup>۱</sup>، حسین درویشی<sup>۱®۱</sup>، ناصر بهروزی خزایی<sup>۱</sup>، محمود کوشش صبا<sup>۲</sup> <sup>۱</sup>گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج، کردستان <sup>۲</sup>گروه علوم باغبانی، دانشگاه کردستان، سنندج، کردستان

چكىدە

در این مطالعه، فرایند تغلیظ آب انگور سیاه با استفاده از سامانه ترکیبی گرمایش اهمی-خلاء و تأثیر پارامترهای فشار (۵۰، ۷۰ و ۲۰ داد الام محتوای فراین ولتاژ (۱۰، ۲۰ و ۲۰ ۷/۳ ۳) بر زمان فرآوری، انرژی مصرفی ویژه، راندمان اکسرژی، و پارامترهای کیفی ( ۹۸، محتوای فنول کل و فعالیت آنتی اکسیدانی) بررسی شد. نتایج نشان داد افزایش گرادیان ولتاژ، نرخ گرمایش به طور معناداری افزایش و زمان فرآوری را کاهش می دهد. در حالی که ترکیب گرمایش اهمی با خلاء (فشار ۵۷ و گرمایش به طور معناداری افزایش و زمان فرآوری را کاهش می دهد. در حالی که ترکیب گرمایش اهمی با خلاء (فشار ۵۵ و ۲۰۰۵) سبب افزایش زمان فرازوی شده است. انرژی مصرفی ویژه در فشار اتمسفر (۲۰۰ ۸۰۹) بین ۱۹۹۲ تا ۲/۲۷ ملاه (۵۰ می در حالی کاهش فراروی شده است. انرژی مصرفی ویژه در فشار ۲۰۰ معنی راددمان اکسرژی (۲۰۸۰/۱) در فشار فران مان مان ۲/۲۷ ملاوی شاین از ۲/۱۰ مانیز و در حالی کاهش فراروی شده است. انرژی مصرفی ویژه شده است. انرژی محرفی ویژه شده است. انرژی محرفی ویژه شده است. افزایش رادمان اکسرژی (۲۸/۸۰) در فشار فران ماد ۲/۱۹ سبب افزایش ۲/۵۰ الی ۲۹/۲۰ برابری انرژی مصرفی ویژه شده است. بالاترین راندمان اکسرژی (۲۰۸۰/۱۰) در فشار ماد ۲/۱۹ همی ما خلام و توای مان اکسرژی (۲۰۸۰۸) در فشار ماد ۲۰۰ و گرادیان ولتاژ ۲۰۷ ماله ۲۰ را این از کیفی، کاهش اهر (تا ۱۹۰۷) و حفظ محتوای فنول کل (۱۸۵۰۸) در فشار ۸۵۷ مای و موای مان این از مان ۱۵۰۷ و گرادیان ولتاژ ۲۰۷/۱۰) و منظ محتوای فنول کل (۱۵۰۸۰) در فشار ۸۵۷ مای و فرایند تعلیظ با انتخاب سطوح مناسب فشار و گرادیان ولتاژ را برای دستیابی (۸۵۰ مای و مانه می مان کارایی انرژی و کیفیت محصول می تواند در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرد. به تعادلی میان کارایی انرژی و کیفیت محصول می تواند در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرد.

آب انگور نوشیدنی محبوبی است که به دلیل طعم خوشایند و فواید بهداشتی بیشماری که دارد، در سراسر جهان مصرف می شود. انگور منبع عالی از آنتی اکسیدان ها، ویتامین ها و مواد معدنی است که آب انگور را به یک انتخاب مغذی تبدیل می کند ( Cosme et ( al., 2018. با این حال، یکی از چالش های مربوط به تولید آب انگور، محتوای بالای آب آن است که ممکن است منجر به افزایش هزینه های حمل و نقل و ذخیره سازی، و همچنین کاهش عمر مفید شود ( Tavares et al., 2022). برای مقابله با این مسائل، آب انگور اغلب از طریق تکنیک های کاسته شده و ممحصول تغلیظ می شود.

در روشهای حرارتی متداول مواد غذایی، به یک منبع خارجی تولید انرژی نیازمند است. این انرژی گرمایی از طریق هدایت، جابجایی و تابش به مواد غذایی منتقل می⊂گردد. درصنایع فرآوری محصولات غذایی، به طورا معمول از روش گرمایش با بخار یا دیگ داغ استفاده می گردد. به دلیل غیر یکنواخت بودن فرایند حرارت دهی در گرمایش رایج و پایین ضرایب انتقال حرارت محصولات کشاورزی کیفیت محصول نهایی بسیار پایین می باشد (Hosainpour et al., 2014). همچنین به دلیل طولانی بودن فرایند گرمایش، انرژی مصرفی بالا و راندمان حرارتی کم می باشد (Darvishi et al., 2015). از این رو، توسعه روشهای جدید فرآوری برای فرایند های حرارت دهی مواد غذایی یکی از زمینه های مورد توجه محققین در صنعت مواد غذایی است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> نویسنده مسئول: <sup>\*</sup>H.darvishi@uok.ac.ir

در میان روش های مختلف تغلیظ، گرمایش اهمی به عنوان یک فناوری امیدبخش برای تغلیظ آبمیوه می باشد. گرمایش اهمی، که به عنوان گرمایش مقاومت الکتریکی یا گرمایش ژول نیز شناخته می شود، شامل عبور یک جریان الکتریکی متناوب از محصول غذایی است که به عنوان یک مقاومت الکتریکی عمل می کند. انرژی الکتریکی به صورت گرما در ماتریس غذایی پراکنده می شود و باعث گرم شدن سریع و یکنواخت می گردد (2014, Shiby et al., 2010; Shiby et al., 2014). این فرایند برای مایعات غذایی مانند آبمیوه ها بسیار مناسب است، زیرا به انتقال گرمای کارآمد و همگن اجازه می دهد بدون اینکه به مکانیسم های انتقال گرمای رسانش یا همرفت متکی باشد (2018, 2018; Fadavi et al., 2018).

ترکیب گرمایش اهمی با فناوری خلاء باعث کاهش فشار و در نتیجه کاهش نقطه جوش آبمیوه می شود و امکان انجام فرایند تغلیظ را در دماهای پایین تر نسبت به روش های تبخیر سنتی فراهم می آورد (Hwang et al., 2022; Fadavi et al., 2018). فرایند گرمایش -تحت خلاء به حفظ کیفیت تغذیه ای، طعم و رنگ محصول کمک می کند، زیرا از تجزیه ترکیبات حساس به گرما جلوگیری می نماید (Darvishi et al., 2019). یکی از عوامل کلیدی که بر فرایند گرمایش اهمی-خلاء تأثیر می گذارد، نرخ گرمایش است که به طور مستقیم با هدایت الکتریکی آب میوه و گرادیان ولتاژ اعمال شده مرتبط است (Alkanan et al., 2021). ایجاد یکنواختی دما در محصول، کاهش زمان فرآوری و همچنین افزایش نرخ گرمایش طی فراوری محصول سبب می شود تغییرات کیفی محصول به حداقل رسانده شود (Sakr and Liu, 2014). علاوه براین، گزارش شده است که گرمایش اهمی در مقایسه با تکنیک های پردازش حرارتی متداول، مصرف انرژی کمتری دارد که آن را از دیدگاه زیست محیطی و اقتصادی گزینه جذابی می سازد (Cokgezme et al., 2017, Cevik, 2021).

با این حال، پیاده سازی موفق گرمایش اهمی-خلاء برای تغلیظ آب انگور سیاه نیازمند درک کاملی از تاثیر پارامترهای مستقل مانند گرادیان ولتاژ و فشار محیط فراروی بر جنبه های مختلف فرآوری از جمله مصرف انرژی، راندمان حرارتی، کیفیت محصول، زمان فراوری، نرخ گرمایش و دمای فراوری است. بنابراین، مطالعه حاضر هدف دارد تا فرایند تغلیظ آب انگور سیاه با استفاده از فناوری گرمایش اهمی-خلاء را با تمرکز بر مصرف انرژی، راندمان اکسرژی، کیفیت محصول، نرخ گرمایش و زمان فراوری بررسی نماید. با کسب درک جامعی از این جنبه ها، این تحقیق تلاش می کند تا به توسعه یک روش کارآمد از نظر انرژی، با کیفیت بالا و مقرون به صرفه برای تغلیظ آب انگور سیاه کمک کند که در نهایت به نفع صنعت غذا و مصرف کنندگان خواهد بود.

### ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- آماده سازی نمونههای آب انگور

نمونههای تازه میوه انگور سیاه (رقم رشه، Vitis vinifera) از یک باغستان انگور دیم در نواحی کوهستانی سنندج، استان کردستان در اواخر شهریور ماه سال ۱۴۰۱ خریداری شد. نمونهها ابتدا با آب شسته شده، سپس با استفاده از سامانه تحت فشار آب میوه استخراج گردید. عمل فیلترایسیون با استفاده از یک صافی به منظور یکنواخت نمودن آب میوه انجام گرفت. مواد محلول جامد در نمونه آب میوه (پس از فرایند فیلتراسیون) با استفاده رفرکتومتر دستی (Atago, Japan) در دمای C<sup>o</sup> ۲۰ برابر با ۵/۰±۱۸/۵ بریکس به دست آمد.

#### ۲-۲- سامانه گرمایش اهمی -خلاء

شماتیک و تصویر سامانه گرمایش اهمی-تحت خلاء در شکل (۱) نشان داده شده است. سامانه گرمایش اهمی شامل یک محفظه شیشه ای از جنس پیرکس (مستطیلی شکل با ابعاد ۲۰/۵ cm (۱۰×۵۰/۱×۵۰/۱۰)، دو عدد الکترود از فولاد ضد زنگ 316L با ضخامت ۲ mm (با فاصله ۲۰ از همدیگر)، یک محفظه دسیکاتور با حجم ۴/۳۵ لیتر به عنوان محیط خلاء، یک تحلیل گر توان (شرکت لوترون، ساخت تایوان) برای اندازه گیری جریان الکتریکی، ولتاژ و توان مصرفی، سه عدد ترموکوپل با پوشش تلفونی برای اندازه گیری دمای نمونه طی فرایند گرمایش، رگلاتور ولتاژ (kw ۳ ، ساخت کره)، یک پمپ خلاء با توان مصرفی W ۵۷۳ (والیو، ساخت چین)، یک کنداسور حاوی آب و یخ به منظور معیان آب بخار شده از محصول، یک مخزن بافل برای ایجاد فشار یکنواخت بر سطح

کنداسور اندازه گیری شد. در هر آزمایش مقدار ۱۰۵ گرم نمونه آب میوه تازه با دمای اولیه C° ۲۰ ۲۰± استفاده شد. آزمایشات برای گرادیان ولتاژ های ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ ۷/cm در سطوح فشار ۵۰، ۷۰ و ۲۰۰ در سه تکرار انجام گرفت. فشار ۲۰۰ kPa به عنوان فشار اتسمفر (حالت گرمایش اهمی فاقد خلاء) در نظر گرفته شد. قبل شروع اعمال گرادیان ولتاژ بر محصول، پمپ خلاء به مدت min ۲ برای رسیدن به سطح پایدار فشار روشن بود. فرایند تغلیظ تا رسیدن محصول به بریکس ۷۰ انجام گرفت. مقادیر جریان الکتریکی، ولتاژ، توان مصرفی و دمای محصول با فواصل زمانی ۱ ثانیه اندازه گیری و ثبت شد. پس از انجام هر آزمایش، الکترود ها و محفظه شیشهای با آب شهری شستشو داده شد. نمونه های تغلیظ شده در ظرف های شیشه ای ۲۵ سال ۲۵ بسته بندی شده و تا انجام آزمایشات کیفی در دمای C° ۴ نگهداری شدند.



شکل (۱): شماتیک و تصویر سامانه گرمایش اهمی – خلاء مورد استفاده در فرایند تغلیظ آب انگور Fig. 1: Schematic and picture of the ohmic-vacuum concentration system for grape juice

۲-۳- نرخ گرمایش

نمودار داده های دما – زمان طی فرایند افزایش دمای محصول (فاز گرمایش محسوس) رسم شد. شیب نمودار دما-زمان به عنوان نرخ گرمایش در نظر گرفته شد. ۲–۴**– انرژی مصرفی ویژه** 

مقدار انرژی مصرفی ویژه با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد(Nouroallahi et al., 2018):

 $SEC = \frac{P_{vp} \times t + \sum VI \times \Delta t}{m}$ (1)که در آن، m<sub>w</sub> جرم آب بخار شده از محصول (kg)، t زمان فرایند تغلیظ (S)، t∆گام زمانی اندازهگیری پارامترهای جریان و ولتاژ (Δt=1s)، P<sub>vp</sub> توان مصرفی پمپ خلاء (W)، SEC انرژی مصرفی ویژه (MJ/kg water evp.) می باشد. ۲-۵- راندمان اکسرژی راندمان اکسرژی کل سامانه گرمایش از رابطه زیر محاسبه شد (Sabanci and Icier, 2017):  $\eta_{ex} = \left(\frac{EX_{P} + EX_{evp}}{EX_{f} + EX_{OUV}}\right) \times 100$ (2) که در آن، nex راندمان اکسرژی (٪)، EX<sub>f</sub> مقدار اکسرژی محصول نهایی (J)، EX<sub>evp</sub> مقدار اکسرژی بخار آب (J)، EX<sub>f</sub> اکسرژی محصول ورودی (J)، EX<sub>OHV</sub> اکسرژی سامانه گرمایش اهمی-خلا (J) مے، باشد. مقدار اکسرژی محصول خروجی از رابطه زیر محاسبه شد (Bozkurt and Icier, 2010):  $EX_{p} = m_{p}C_{p}\left[T_{p} - T_{\infty} - T_{\infty}ln\left(\frac{T_{p}}{T}\right)\right]$ (3)که در آن، m<sub>p</sub> جرم محصول نهایی (kg)، C<sub>p</sub> (kg) ظرفیت گرمایی ویژه محصول نهایی (J/kg.K)، T<sub>p</sub> دمای محصول (K)، T<sub>o</sub> دمای محيط (K) مي باشد. مقدار اکسرژی آب بخار شده از ماده مطابق با رابطه زیر محاسبه شد (Darvishi el al., 2015):  $EX_{evp} = m_w \left[ 1 - \frac{T_{\infty}}{T_p} \right] \times h_{fg}$ (4) که در آن، m<sub>w</sub> جرم اب بخار شده از ماده(kg) و h<sub>fg</sub> گرمای نهان تبخیر (J/kg water) می باشد. مقدار اکسرژی محصول ورودی از رابطه زیر محاسبه شد (Mohammadi el al., 2025):  $\mathrm{EX}_{\mathrm{f}} = \mathrm{m}_{\mathrm{f}} \mathrm{C}_{\mathrm{p}} \left[ \mathrm{T}_{\mathrm{f}} - \mathrm{T}_{\infty} - \mathrm{T}_{\infty} \mathrm{ln} \left( \frac{\mathrm{T}_{\mathrm{f}}}{\mathrm{T}} \right) \right]$ (5) که در آن، m<sub>f</sub> جرم محصول اولیه (kg) و T<sub>f</sub> دمای اولیه ماده محصول (K) می باشد. اکسرژی محصول ورودی به محفظه به دلیل همدما بودن محصول و محیط برابر با صفر در نظر گرفته شد. مقدار اکسرژی مصرفی سامانه گرمایش اهمی - خلاء از رابطه زیر محاسبه شد (Sabanci and Icier, 2017):  $EX_{OHV} = 0.99 \sum_{t} ((VI \times \Delta t) + P_{vp} \times t)$ (6)- 8-YDH مقادیر pH نمونه های تازه و تغلیظ شده با استفاده از pH-متر (مدل اترون، ساخت ایران) در دمای C° ۲۰ اندازه گیری شد. تغییرات pH نمونه از رابطه زیر محاسبه شد:  $\Delta pH = \left(\frac{pH_p - pH_0}{pH_0}\right) \times 100$ (7)که در آن، اندیس های p و 0 به ترتیب بیانگر ماده فراوری شده و ماده تازه می باشند. ۲-۷- محتوای فنول کل محتوای فنول کل نمونه ها پس از عصاره گیری با استفاده از روش فولین سیوکالتو در طول موج ۷۶۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (UV-S2100, Shanghai China) قرائت گردید. از اسید گالیک به عنوان استاندارد در اندازه گیری فنل کل استفاده شد. مقدار فنول کل به صورت میلی گرم اسید گالیک در ۱۰۰ گرم وزن نمونه محاسبه و گزارش گردید. ۸-۸- فعالیت آنتی اکسیدانی فعالیت آنتیاکسیدانی توسط روش مهار رادیکال آزاد ۲،۲-دیفنیل-۱-پیکریل هیدرازیل (DPPH) بر اساس روش Sánchez-Moreno et al. (1999) در طول موج ۵۱۷ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه گیری شد. فعالیت انتی اکسیدانی بر اساس اندازه گیری IC<sub>50</sub> با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$IC_{50} = \frac{AB_{c} - AB_{s}}{AB_{c}} \times 100$$
(8)
therefore the set of the

که در آن، ABc و ABs به ترتیب مقدار جذب در ۵۱۷ نانومتر برای نمونه شاهد و نمونه مورد آزمایش و IC<sub>50</sub> بیانگر فعالیت آنتیاکسیدانی (٪) است.

۲-۱۰ - آنالیزهای آماری

آزمایش ها در سه تکرار انجام گرفت. نتایج به فرم مقادیر میانگین ± خطای استاندارد گزارش شدهاند. برای تعیین تاثیر گرادیان ولتاژ و فشار بر خصوصیات اندازه گیری شده از آزمون مقایسه میانگینهای دانکن و آنالیز واریانس استفاده شد. برای انجام آنالیزهای آماری از نرم افزار SPSS. V18 استفاده شد. به منظور رسم نمودارها از نرم افزار Excel استفاده شد.

#### ۳- نتايج و بحث

### ۳-۱- نرخ گرمایش و زمان فر آوری

تغییرات متوسط دمای محصول طی فرایند گرمایش در شکل (۲) نشان داده شده است. دمای محصول برای شرایط گرمایش در فشار اتمسفر (۱۰۰ kPa) و گرادیان ولتاژ۲۰ و ۳۰۷/cm تا C° ۸۸/۹ ± ۸۸/۹ افزایش یافته و تا انتهای فرایند تغلیظ تقریبا ثابت می ماند. در حالی در گرادیان ولتاژ ۱۰ V/cm دمای محصول حداکثر به تا C° ۸۵/۴ ± ۸۵/۸ رسیده است. این روند در دیگر سطوح فشار نیز مشاهده شده است. در فشار ۷۵ kPa و ۵۰ kPa برای گرادیان ولتاژ های ۲۰ و ۳۰ V/cm به ترتیب دمای محصول حداكثر تا C° ۸۲/۴ ± ۱/۱ و تا C° ۸۲/۵ ± ۸/۱/۱ افزایش یافت. با این دمای محصول طی فرایند تغلیظ برای گرادیان ولتاژ V/cm ۱۰، برای سطوح فشار ۷۵ و ۵۰ kPa به ترتیب برابر با تا °۵ /۰ ± ۷۳/۵ و °۵ °۰ ± ۶۴/۹ بود. در گرادیان ولتاژ ۱۰ V/cm، شدت میدان الکتریکی کمتر است، بنابراین گرمای تولید شده پایین در محصول سبب می شود که دمای محصول کندتر و کمتر افزایش پیدا می کند. این شرایط برای ۵۰ kPa شدیدتر می باشد چرا که شدت جریان الکتریکی عبوری از محصول در خلاء به جد کاهش یافته (Darvishi et al., 2021)، این امر منجر به نرخ پایین انرژی تولیدی در محصول شده و دمای محصول از °C ۶۴/۹ بالاتر نمی رود. نتایج به دست آمده نشان داد نرخ گرمایش (شکل ۳)، در تمامی سطوح فشار اعمالی، با افزایش گرادیان ولتاژ افزایش یافته است. با افزایش گرادیان ولتاژ، مقدارانرژی ورودی به محصول افزایش و همین امر سبب افزایش نرخ حرارت دهی شده است (Fadavi et al., 2018; Sabanci and Icier, 2022). نرخ گرمایش با افزایش گرادیان ولتاژ از ۱۰ به ۳۰ V/cm در فشار ۱۰۰ kPa از ۲/۰۴ به ۲/۰۶ ۱/۲۴ °C/، برای فشار ۷۵ kPa از ۲/۰۷ به ۲/۵۱ °C/s و برای فشار ۸۵ kPa از ۲/۰۷ به ۰/۸۹ °C/ افزایش یافته است. در سطوح گرادیان ولتاژ ۱۰ و ۲۰ V/cm، افزایش فشار فاقد تاثیر معنی داری بر نرخ گرمایش بود (p >0.01). این در حالی است که در گرادیان ولتاژ ۳۰ V/cm با تغییر فشار از ۱۰۰ kPa به ۵۰ kPa، نرخ گرمایش از ۱/۲۹ به ۰/۸۹ °C/s كاهش يافته است.



شکل (۲): تغییرات دمای آب انگور طی فرایند تغلیظ تحت شرایط مختلف گرمایش اهمی – خلاء Fig. 2: Temperature profile evolution during ohmic-vacuum concentration of grape juice



شکل (۳): اثر گرادیان ولتاژ و فشار بر نرخ گرمایش آب انگور در سامانه گرمایش اهمی – خلاء Fig. 3. Pressure and voltage gradient effects on heating rate in ohmic-vacuum grape juice concentration

۲-۳- زمان فر آوری

زمان لازم برای فرایند تغلیظ آب انگور سیاه در شکل (۴) نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان داد در تمامی سطوح فشار اعمالی، با افزایش گرادیان ولتاژ از ۱۰ به V/cm زمان لازم برای فرآوری نمونه ها به طور معنی داری کاهش یافته است. با افزایش گرادیان ولتاژ، زمان فراروی تقریبا ۴/۷ برابر در فشار ۳/۲ ، ۱۰۰ kPa برابر در فشار ۷۵ kPa و ۴/۸ برابر در فشار ۵۰ kPa کاهش یافته است. حجم انرژی تولید شده در داخل محفظه اهمی با افزایش گرادیان ولتاژ افزایش یافته، این امر در نهایت به افزایش نرخ تبخیر و کاهش زمان فرآیند انجامید (Sabanci and Icier, 2022). همچنین با کاهش فشار وارده بر سطح ماده (از ۱۰۰ به ۵۰ kPa) زمان فراًوری افزایش یافته است. به عبارت دیگر، در تمامی سطوح گردایان ولتاژ، پایین ترین زمان فراوری در فشار اتمسفر (فاقد خلاء) و بالاترین زمان فراروی در فشار اعمالی ۵۰ kPa به دست آمد. زمان فرآوری برای تغلیظ آب انگور در فشار kPa در محدوده ۷/۷۸ الی ۲۴/۱۰ min، در فشار ۷۵ kPa در محدوده ۱۰/۴۷ الی ۲۷/۵۰ min و در فشار kPa در محمده ۱۰/۴۰ الی ۳۲/۰۲ min قرار دارد. علت افزایش زمان فراروری با کاهش فشار اعمالی را می توان به وابستگی هدایت الکتریکی، ظرفیت گرمایی ویژه ماده و گرمایی مورد نیاز برای تبخیر آب ماده، به فشار اعمال شده بر سطح نسبت داد Alkanan) et al., 2021). در گرادیان ولتاژ ثابت، هدایت الکتریکی ماده در فشار پایین به طور معنی داری کمتر از هدایت الکتریکی ماده در فشار های بالا است (Darvishi et al., 2021). در نتیجه، نرخ گرمای تولیده شده در ماده کمتر شده که در نهایت منجر به افزایش زمان فراروی می شود. از سوی دیگر، با کاهش فشار بر رروی سطح ماده ظرفیت گرمایی ویژه ماده و گرمایی مورد نیاز برای تبخیر ماده کاهش می یابد این امر سبب می شود در فشار های پایین انرژی کمتری برای رسیدن ماده به دمای جوشش لازم می باشد در نتیجه حجم بیشتری از انرژی صرف فرایند تبخیر خواهد داد. اما تاثیر هدایت الکتریکی بر نرخ تبخیر به مراتب بیشتر از دمای پایین جوش بوده است. نتایج به دست امده در این تحقیق با گزارشات صورت گرفته برای فرایند تغلیظ آب پرتقال در سامانه گرمایشی اهمی-خلاء توسط (2022) Hwang et al. و آب میوه کیوی توسط (2021) Darvishi et al. مطابقت دارد.



Processing time (min)

شکل (۴): اثر فشار و گرادیان ولتاژ بر زمان فراوری فرایند تغلیظ آب انگور به روش گرمایش اهمی -خلاء Fig.4. Pressure and voltage gradient effects on processing time in ohmic-vacuum grape juice concentration

#### ۳-۳- انرژی مصرفی ویژه

انرژی مصرفی ویژه فرایند تغلیظ آب انگور به روش گرمایش اهمی –خلاء در شکل (۵) نشان داده شده است. انرژی مصرفی ویژه با افزایش گرادیان ولتاژ به دلیل کاهش زمان فرآوری کاهش یافته است. با افزایش گرادیان ولتاژ از ۱۰ به V/cm، انرژی مصرفی ویژه در فشار ۱۰۰kPa به مقدار ۱۴/۶٪، در فشار ۷۵ kPa به مقدار ۴۱/۹٪ و در فشار ۵۰ kPa به مقدار ۵۰/۵٪ كاهش يافته است. (2020) Darvishi et al نشان دادند كه گراديان ولتاژ تأثير معناداري بر مصرف انرژي (p > 0.05) فرآيند تغلیظ گرمایش اهمی آب انگور در فشار اتمسفری نداشت. انرژی مصرفی ویژه برای تعلیظ آب انگور در فشار اتمسفر در محدوده گرادیان ولتاژ اعمال شده از ۱/۹۲ الی ۲/۲۷ MJ/kg water متغیر بوده است. در حالی که انرژی مصرفی ویژه برای شرایط خلاء (۷۵ و ۵۰ kPa) در محدوده ۴/۹۵ الی ۲۰/۰۵ MJ/kg water متغیر بوده است. کاهش هدایت الکتریکی ماده در خلاء و انرژی مصرفی بالای پمپ از دلایل اصلی بالا بودن انرژی مصرفی ویژه تحت شرایط خلاء نبست به فشار اتمسفر بوده است (Darvishi et al., 2021). در حالت خلاء انرژی مصرفی توسط پمپ ۶۴/۴ الی ۸۹/۸٪ از کل انرژی مصرفی را شامل می شود. به عبارت دیگر، انرژی مصرفی توسط بخش اهمی سامانه گرمایش تحت شرایط خلاء در محدوده ۱/۰۲ الی MJ/kg ۲/۵۲ water متغیر بوده است. کمترین مقدار انرژی مصرفی ویژه در شرایط خلاء (۴/۹۵ MJ/kg water) تقریبا ۲/۵۴ برابر بیشتر از کمترین مقدار انرژی مصرفی ویژه در فشار اتمسفر بوده است. مطابق پژوهشهای انجامشده، انرژی مصرفی ویژه برای تغليظ آب انگور به روش گرمايش مايكروويو-خلاء در محدوده ۱/۹۵ الی ۶/۴۸ MJ/kg water گزارش شده است Hameed et) al., 2023). در مقابل، این مقدار برای روشهای گرمایش معمولی (دیگ داغ)، گرمایش مایکروویو و تقطیر اسمزی به ترتیب ۱۷/۷۵، ۱۷/۷۵ و ۸/۶۹ MJ/kg water اندازه گیری شده است (Dincer et al., 2019). مقدار انرژی مصرفی ویژه در پژوهش حاضر كمتر از مقادير گزارششده توسط ساير محققان است. اين يافته نشان ميدهد كه روش گرمايش اهمي ميتواند كارايي بالاتری نسبت به سایر روشهای فرآوری آب انگور داشته باشد و به عنوان یک گزینه بهینه از نظر مصرف انرژی مطرح شود.



شکل (۵): اثر فشار و گرادیان ولتاژ بر انرژی مصرفی فرایند تغلیظ آب انگور به روش گرمایش اهمی -خلاء Fig. 5. Pressure and voltage gradient effects on specific energy consumption in ohmic-vacuum grape juice concentration

### ۳-۴-راندمان اکسرژی

تاثیر فشار و گرادیان ولتاژ اعمالی بر راندمان اکسرژی فرایند تغلیظ آب انگور سیاه به روش گرمایش اهمی – خلاء در شکل (۶) نشان داده شده است. راندمان اکسرژی در محدوده ۲/۵۰ الی ۱۸/۸۸٪ متغیر بوده است. راندمان اکسرژی فرایند تغلیظ آب آلبالو به روش گرمایش اهمی –خلاء در محدوده ۱۱/۴ الی ۱۸/۵ ٪ (2020) و راندمان اکسرژی فرایند تغلیظ شیره خرما در محدوده ۲/۵ اب انار در محدوده ۵۰/۵ الی ۱۸/۳۸٪ (۱۸/۳۸ (۱۸۲ می الا ۱۷) (۲۵ می الدمان اکسرژی فرایند تعلیظ شیره خرما در محدوده ۲/۵ الی ۱۲/۴۱٪ (کمان الی ۱۸/۳۸٪ (۱۸/۳۸) و (Ockgezme et al., 2017) و راندمان اکسرژی فرایند تعلیظ شیره خرما در محدوده ۲/۵ ای ۱۲/۴۱٪ (۱۲/۶۵ می الی ۱۸/۳۸٪ (۱۸/۳۸) گزارش شده است. با کاهش فشار اعمالی از ۱۰۰ به ۸۵ برای تمامی سطوح گرادیان ولتاژ، راندمان اکسرژی کاهش یافته است. راندمان اکسرژی در فشار اتسمفر (۱۰۰ در فشار هامی می مو خدار اعمالی ۱۱/۴۰ الی ۱۳/۲۵٪ بیشتر بوده است. علت این روند، اکسرژی مصرفی پمپ خلاء در فشار های ۵۰ و ۸۹ می باشد. موجنین در تمامی سطوح فشار، راندمان اکسرژی با افزایش گرادیان ولتاژ افزایش یافته است. علت افزایش راندمان اکسرژی آن است که با افزایش گرادیان ولتاژ، نرخ تولید انرژی در ماده افزایش یافته و اتلاف حرارتی به محیط به دلیل کاهش زمان فرآوری کاهش می یاید (2017) و الکتریکی شده و افزایش راندمان اکسرژی سیستم را به همراه دارد ( ۲۰۱۶ می ۷۵ در مورآوری کاهش می یاید (کمان اکسرژی در فشار اکسرژی سیستم را به همراه دارد ( ۲۰۱۶ می ۷۵ در محدوده برگشت ناپذیر حرارتی و الکتریکی شده و افزایش راندمان اکسرژی سیستم را به همراه دارد ( ۲۰۱۶مان اکسرژی در محدوده ۱۳/۴ الی ۱۹/۶۸٪، در فشار ۵۹ ۵۰ در محدوده ۱۰۰/۶ الی ۱۰/۶٪ منغیر بوده است.



شکل (۶): اثر فشار و گرادیان ولتاژ بر راندمان اکسرژی فرایند تغلیظ آب انگور به روش گرمایش اهمی -خلاء Fig. 6. Pressure and voltage gradient effects on exergy efficiency in ohmic-vacuum grape juice concentration

#### pH تغييرات

مقادیر pH و تغییرات pH ندازه گیری شد. مظابق با نتایج به دست آمده، pH نمونه های فراوری شده در محدوده pT الی pT/N انگور تازه برابر با ۳/۹۳ اندازه گیری شد. مظابق با نتایج به دست آمده، pH نمونه های فراوری شده در محدوده ۳/۳ الی ۳/۷۵ انگور تازه برابر با ۳/۹۳ اندازه گیری شد. مظابق با نتایج به دست آمده، pH نمونه های فراوری شده در محدود pH ای ۶۵٪ نسبت به تازه کاهش یافته است. آب انگور ماوی اسیدهای آلی مانند اسید تاریک، اسید مالیک و در مقادیر کمتر، اسید سیتریک است. وقتی آب تبخیر میشود، این معرده باقی می مانند و غلیظ تر می شوند. چون pH تابعی از غلظت یونهای هیدروژن (\*H) است، افزایش غلظت اسید باعث آزاد اسیدها باقی می مانند و غلیظ تر می شوند. چون pH تابعی از غلظت یونهای هیدروژن (\*H) است، افزایش غلظت اسید باعث آزاد شدن بیشتر \*H و در نتیجه کاهش PH می شوند (۶00 است کمترین تغییرات PH نمون (Samaranayake and Sastry, 2005). تغییرات PH در فشار PA می شود، این مدن بیشتر \*H و در نتیجه کاهش PH می شون (Samaranayake and Sastry, 2005). تغییرات PH در فشار معالی ولتاژ در فشار شدن بیشتر از اعمالی بوده است. این در حالی است کمترین تغییرات PH نمونه ها برای تمامی سطوح گرادیان ولتاژ در فشار می می مدن بر نمر مان عمالی بوده است. این در حالی است کمترین تغییرات PH نمونه ها برای تمامی سطوح گرادیان ولتاژ در فشار مدیم باید و نتر مای مای مروز ای در شار PA می مرد از PA نمونه ها برای تمامی سطوح گرادیان ولتاژ در فشار شدن به داین دمای بالات و احتمال تخریب یا تبخیر تر کیبات دیگر سطوح فشار اعمالی بوده است. در حالی است که در فشار PA نمونه ها برای تمامی سطوح گرادیان ولتاژ در فشار سیدی مند بر این ماید PA می می نوده می مروز می مده می مروز گردی نود از مروز ای ولتاژ در فیار PA نمونه های مروز ای ولتار و احتمال تخریب یا تبخیر می شایدی می مروز در مده می فراوری شده مروز می مده مده است. می مروز ای در شرایط اسیدی بر فرار مروز مروز مره با بین می مراید PA می در این تعلیظ مونه های دون تخریب آنها مروز ای شرایط اسیدی، شدو ای مروز می و شرایط تخریب این می PA می در در مروز و مرار PA می می تن مرای ولتاژ مروز و مرای PA می می تر مروز این ولتاژ تغییز اسیده به مور مؤثر تری انه مروز مره می مرای و مراز مرای PA می می تر ای مرار ولی تروز مرا PA باعث کاه مر تا مرونه های فراوری شده ای مروز و

با افزایش بیشتر گرادیان ولتاژ تغییرات PH روند افزایش از خود نشان داده است. نرخ گرمایش و شدت فعالیتهای الکتروشیمیایی، از جمله خوردگی الکترودها، از عوامل مؤثر بر تغییرات PH نمونههای فرآوریشده با استفاده از گرمایش اهمی محسوب می شوند (Assiry et al., 2010). در گرادیان ولتاژهای پایین، نرخ گرمایش و میزان واکنشهای الکتروشیمیایی کمتر است، که این موضوع باعث تغلیظ تدریجی اسیدهای آلی بدون تخریب شدید آنها شده و در نهایت کاهش PH محدودتری را به همراه دارد ( Kaur et e باعث تغلیظ تدریجی اسیدهای آلی بدون تخریب شدید آنها شده و در نهایت کاهش Ph محدودتری را به همراه دارد ( Kaur et بعث تغلیظ تدریجی اسیدهای آلی بدون تخریب شدید آنها شده و در نهایت کاهش Ph محدودتری را به همراه دارد ( Kaur et به هیدرولیز ترکیبات موجود، خوردگی بیشتر الکترودها، و تولید یونهای اضافی در محیط شود افزایش می یابد؛ این امر می تواند منجر (Pataro et al., 2014; Darvishi et می محدود و تولید یونهای اضافی در محیط شود Pataro et al., 2014) به هیدرولیز ترکیبات موجود، خوردگی بیشتر الکترودها، و تولید یونهای اضافی در محیط شود عمیاید این امر می تواند منجر (دادیان ولتاژ، تغییرات PH کاهش می یابد، اما در سطوح بالاتر گرادیان ولتاژ، روند تغییرات PH معکوس شده و افزایش می یابد. این رفتار می تواند به دلیل تعامل همزمان گرمایش شدید، افزایش واکنشهای الکتروشیمیایی، و تغییرات ساختاری در ترکیبات محلول باشد (2010).



شکل (۲): اثر فشار و گرادیان ولتاژ بر تغییرات pH آب انگور تغلیظ شده به روش گرمایش اهمی – خلاء Fig. 7. Pressure and voltage gradient effects on pH change in ohmic-vacuum grape juice concentration

#### ۳-۶- محتوای فنول کل

تاثیر پارامترهای فشار و گرادیان ولتاژ بر محتوای فنول نمونه های تغلیظ شده در شکل (۸) نشان داده شده است. نتایج آماری به دست بیانگر تاثیر معنی دار فاکتورهای گرادیان ولتاژ و فشار بر محتوای فنول کل بود (0.01)ج). با این حال اثر گرادیان ولتاژ بر تغییرات محتوای فنول کل آب انگور سیاه بیشتر از تاثیر فشار بوده است. در فشار های اعمالی ۵۰ و ۲۰۰ با افزایش گرایدان ولتاژ محتوای فنول کل نمونه ای فراوری شده به کاهش زمان فراوری کاهش یافته است. همچنین محتوای فنول کل نمونه های فراوری شده در فشار های دمتوای فنول کل نمونه ای فراوری شده به کاهش زمان فراوری کاهش یافته است. همچنین محتوای فنول کل نمونه های فراوری شده در فشار ۲۵۰ به دلیل پایین بودن دمای فراروی نسبت به فشار RP ۲۰۰ در گرادیان ولتاژ های یکسان بیشتر بوده است. (2019) معنه در فشار می که به دلیل پایین بودن دمای فراروی نسبت به فشار ۲۰۰ در گرادیان ولتاژ های یکسان بیشتر بوده فناوری شده در فشار می است معنوای فنول کل نمونه های بیشتر ویتامین دادند، افزایش گرادیان ولتاژ سبب حفظ بیشتر ویتامین ث و نفزل کل آب میوه پرتقال می گردد. (2010) Sabar دامان دادند، افزایش گرادیان ولتاژ سبب حفظ بیشتر ویتامین ث و فنول کل آب انار شد. (2017) Sabanci and Icie در زیرا در این فنول کل آب انار شد. (2017) معام دارد کارمایش اهمی نشان دادند، افزایش تردود تان دادند،گرمایش اهمی باعث افزایش فرآیند در غیاب اکسیژن دمای محصول نسبت به حالت اتمسفر پایینتر بوده و سبب می گردد تا تخریب پارامترهای شیمیایی مانند آنتی اکسیدانها، ویتامینها و ترکیبات فنولی با نرخ کمتری انجام پذیرد. این در حالی است که در فشار اعمالی ۷۵ ۲۹ با افزایش

گرادیان ولتاژ از ۱۰ به ۲۰ ۷/cm محتوای فنول کل افزایش و سپس با افزایش بیشتر گرادیان ولتاژ از ۲۰ به ۲۰ ۷/cm محتوای فنول کل نمونه ها کاهش یافته است. بیشترین محتوای فنولی کل برابر با ۸۵۷ mg GAE/100 ml تحت شرایط گرمایش ۷/cm ۳۰ و ۸۵ kPa به دست امد. محتوای فنول کل آب انگور تازه برابر با ۳۷/۷۵ mg GAE/100 ml تد ۸۵۲ تحد شرایط گرمایش معد. مقایسه ویژگیهای ترکیبات فنولی کل و فعالیت آنتیاکسیدانی بین نمونههای تیمارشده و نمونه تازه، باید در نظر داشت که نمونه تازه دارای محتوای رطوبت بالاتری نسبت به نمونههای تیمارشده است؛ بنابراین در حین مقایسه، نسبت غلظت ترکیبات باید مدنظر قرار گیرد. با در نظر گرفتن نسبت تغلیظ نمونهها، میتوان نتیجه گرفت که محتوای فنول کل نمونههای تازه، تحت شرایط رطوبتی یکسان، در تمامی تیمارهای گرمایشی کاهش یافته است. علت این کاهش احتمالاً به تجزیه حرارتی، اکسیداسیون، و واکنشهای شیمیایی ترکیبات فنولی طی فرآیند گرمایش مربوط میشود. این فرآیندها منجر به کاهش غلظت ترکیبات فنولی آزاد رطوبتی ایدان میمیایی ترکیبات فنولی طی فرآیند گرمایش مربوط میشود. این فرآیندها منجر به کاهش غلظت ترکیبات فنولی آز



Total phenolic content (mg GAE/100 ml)

شکل (۸): اثر فشار و گرادیان ولتاژ بر محتوای فنول کل نمونه های تغلیظ آب انگور به روش گرمایش اهمی –خلاء Fig. 8. Pressure and voltage gradient effects on total phenolics in ohmic-vacuum concentrated grape juice

۳–۷– خاصیت آنتی اکسیدانی

تأثیر فشار و گرادیان ولتاژ بر مقادیر IC<sub>50</sub> ، بهعنوان شاخصی از فعالیت آنتیاکسیدانی آب انگور سیاه تغلیظشده به روش حرارتدهی اهمی-خلاً، در شکل (۹) نشان داده شده است. مقدار IC<sub>50</sub> برای نمونه های تازه آب انگور سیاه پیش از فرایند تغلیظ، ۲۴٪ اندازه گیری شد. نتایج نشان دادند که گرادیان ولتاژ و فشار بهطور معناداری بر IC<sub>50</sub> نهایی تأثیر می گذارند و تعامل بین این

دو متغیر نقش مهمی در حفظ یا کاهش فعالیت آنتیاکسیدانی دارد. کاهش IC<sub>50</sub> به معنای بهبود فعالیت آنتیاکسیدانی است، بنابراین روند نزولی نشانه عملکرد بهتر ترکیبات آنتی اکسیدانی است (Khairiyah et al., 2022). در فشار ثابت ۵۰ kPa، افزایش گرادیان ولتاژ از ۱۰ به ۲۰ V/cm منجر به افزایش قابل توجه IC<sub>50</sub> از ۱۹/۸۴٪ به ۳۶/۱۱٪ گردید که حاکی از کاهش فعالیت آنتیاکسیدانی است. با افزایش بیشتر ولتاژ به IC<sub>50</sub> ، مقدار IC<sub>50</sub> به ۱۲۵/۷۱٪ رسید که تغییر چشمگیری نسبت به مقدار پیشین نداشت (p>0.05). این یافته ها نشان میدهد که افزایش بیش از حد گرادیان ولتاژ می تواند به تخریب ترکیبات فنولی منجر شده و عملکرد آنتیاکسیدانی را کاهش دهد ( Darvishi et al., 2021; Barrón-García et al., 2022). در فشار ۷۵ kPa، بالاترین مقدار IC<sub>50</sub>) در گرادیان ولتاژ V/cm به دست آمد، در حالی که در گرادیان ولتاژ ۷/cm این مقدار به ۲۴/۲۱٪ کاهش یافت. این کاهش ناگهانی می تواند ناشی از وقوع تغییرات فیزیکی یا ساختاری در ماتریکس نمونه در اثر شرایط فشار – گرادیان ولتاژ خاص باشد. در فشار ۲۰۰ kPa، روند مشابهی مشاهده شد؛ مقدار IC<sub>50</sub> ابتدا با افزایش گرادیان ولتاژ تا ۲۰ V/cm به ۳۳/۸۳٪ رسید و سپس با افزایش بیشتر ولتاژ به V/cm ۳۰ به ۲۸/۳۷٪ کاهش یافت.از سوی دیگر، با مقایسه مقادیر IC50 در گرادیان ولتاژ ثابت، مشاهده شد که فشار نیز تأثیر مهمی در فعالیت آنتی اکسیدانی نمونه های تغلیظ شده دارد. در گرادیان ولتاژ ۱۰ V/cm، کمترین مقدار IC<sub>50</sub> در فشار ۵۰kPa (۱۹/۸۴ //۱۹/۸۴ ٪) بهدست آمد که پایین تر از مقدار IC<sub>50</sub> نمونه های تازه و نشان دهنده بهبود فعالیت آنتیاکسیدانی بود. در این شرایط بهنظر میرسد ترکیب فشار پایین و گرادیان ولتاژ کم، از تخریب ترکیبات آنتیاکسیدانی جلوگیری کرده و حتی غلظت مؤثر آنها را افزایش داده است. نتایج بیانگر آن است که شرایط مناسب برای حفظ یا افزایش فعالیت آنتیاکسیدانی در طی فرآیند تغلیظ، در فشار ۵۰kPa و گرادیان ولتاژ V/cm حاصل می شود. مقادیر بالاتر گرادیان ولتاژ و فشار، به دلیل تولید گرمای بیش از حد یا اثرات تخریبی فیزیکی، میتوانند موجب کاهش کارایی آنتی اکسیدانی شوند ( .Darvishi et al., .(2019



شکل (۹): اثر فشار و گرادیان ولتاژ بر فعالیت آنتی اکسیدانی نمونه های تغلیظ آب انگور به روش گرمایش اهمی –خلاء Fig. 9: Pressure and voltage gradient effects on antioxidant activity (IC<sub>50</sub>) in ohmic-vacuum concentrated grape juice

#### ۴- نتیجه گیری

نتایح حاصل از فرایند تغلیظ آب انگور سیاه در یک سامانه ترکیبی گرمایش اهمی – خلاء نشان داد که زمان فرآوری در تمامی سطوح فشار با افزایش گرادیان ولتاژ از ۱۰ به ۳۰ ۲۰ V/cm به طور معنیداری کاهش یافت. اما کاهش فشار منجر به افزایش زمان فرایند و انرژی مصرفی ویژه شد. حداکثر راندمان اکسرژی تحت فشار اتمسفر برابر با ۱۸/۷۸٪ به دست آمد. مطابق نتایج، افزایش گرادیان ولتاژ به حفظ بیشتر فنولها و فعالیت آنتی اکسیدانی کمک میکند، در حالی که فشار پایین (۵۰ هابق نتایج، افزایش برای حفظ کیفیت و فعالیت آنتیاکسیدانی را فراهم میکند. افزایش ولتاژ از ۱۰ به ۲۰ ۷/cm منجر به افزایش محتوای فنول کل و کاهش IC50 (بهبود فعالیت آنتیاکسیدانی را فراهم میکند. افزایش ولتاژ از ۱۰ به ۲۰ ۷/cm منجر به افزایش محتوای فنول کل و کاهش IC50 (بهبود فعالیت آنتیاکسیدانی) شد، اما ولتاژ بالاتر از ۲۰ ۷/cm تأثیر منفی داشت. بالاترین محتوای فنول کل و ماهش GAE/100 ml و بهترین فعالیت آنتیاکسیدانی در فشار AP ۵۰ و گرادیان ولتاژ می داشت. بالاترین محتوای فنول کل 70 میدهد که بهینهسازی فرآیند تغلیظ با انتخاب سطوح مناسب فشار و ولتاژ میتواند تعادل مؤثری بین کارایی انرژی و کیفیت محصول ایجاد کند. تحقیقات آینده باید به بررسی مقیاس پذیری این فناوری بپردازد و هدف آن افزایش صرفهجویی در انرژی در برای که استانداردهای کیفیت بالا حفظ می شود، باشد. این رویکرد میتواند به طور قابل توجهی به صنعت کمک کند و راه حلهای پایداری برای تغلیظ آبمیوه فراهم آورد

### حمایت مالی

این پژوهش با حمایت مالی «طرح شهید احمدی روشن» انجام شده است. هزینه های مربوط به اجرای آزمایش ها، تجهیزات و تحلیل داده ها از طریق این طرح تأمین گردید. نویسندگان قدردانی خود را از نهاد مسئول این طرح برای پشتیبانی از تحقیقات

علمي و فناورانه اعلام ميدارند. هيچ گونه تعارض منافع توسط نويسندگان بيان نشده است.

- Alkanan, Z.T., Altemimi, A.B., Al-Hilphy, A.R., Cacciola, F. and Ibrahim, S.A., 2021. Application and effects of ohmic-vacuum combination heating on the quality factors of tomato paste. Foods, 10(12), p.2920.
- Assiry, A.M., Gaily, M.H., Alsamee, M. and Sarifudin, A., 2010. Electrical conductivity of seawater during ohmic heating. Desalination, 260(1-3), 9-17.
- Barrón-García, O.Y., Morales-Sánchez, E., Jiménez, A.R., Antunes-Ricardo, M., Luzardo-Ocampo, I., González-Jasso, E. and Gaytán-Martínez, M., 2022. Phenolic compounds profile and antioxidant capacity of 'Ataulfo'mango pulp processed by ohmic heating at moderate electric field strength. Food Research International, 154, p.111032.
- Bozkurt, H. and Icier, F., 2010. Exergetic performance analysis of ohmic cooking process. Journal of Food Engineering, 100(4), 688-695.
- Cevik, M., 2021. Electrical conductivity and performance evaluation of verjuice concentration process using ohmic heating method. Journal of Food Process Engineering, 44(5), p.e13672.
- Cokgezme, O.F., Sabanci, S., Cevik, M., Yildiz, H. and Icier, F., 2017. Performance analyses for evaporation of pomegranate juice in ohmic heating assisted vacuum system. Journal of Food Engineering, 207, 1-9.
- Cosme, F., Pinto, T. and Vilela, A., 2018. Phenolic compounds and antioxidant activity in grape juices: A chemical and sensory view. Beverages, 4(1), p.22.
- 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.
- Darvishi, H., Hosainpour, A., Nargesi, F. and Fadavi, A., 2015. 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.
- Darvishi, H., Khoshtaghza, M.H., and Najafi G. 2013. Ohmic heating of pomegranate juice: Electrical conductivity and pH change. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 12: 101–108
- 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.
- Dinçer, C., Çam, İ.B., Torun, M., Gülmez, H.B. and Topuz, A., 2019. Mathematical modeling of concentrations of grape, pomegranate and black carrot juices by various methods. Gida- The Journal of Food, 44(6), 1092-1105.
- 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. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 47: 225-230
- Hameed, A., Maan, A.A., Khan, M.K.I., Mahmood Khan, I., Niazi, S., Waheed Iqbal, M., Riaz, T., Manzoor, M.F. and Abdalla, M., 2023. Evaporation kinetics and quality attributes of grape juice concentrate as affected by microwave and vacuum processing. International Journal of Food Properties, 26(1), 1596-1611.
- Hosainpour, A., Nargesi, F., Darvishi, H., Fadavi, A. 2014. Ohmic pre-drying of tomato paste. Food Science and Technology International, 20, 193–204.
- Hwang, J.H., Jung, A.H. and Park, S.H., 2022. Efficacy of ohmic vacuum concentration for orange juice concentrates and their physicochemical properties under different voltage gradients. Lwt, 154, p.112750.
- Kaur, N. and Singh, A.K., 2016. Ohmic heating: concept and applications—a review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 56(14), 2338-2351.
- Kaur, R., Gul, K. and Singh, A.K., 2016. Nutritional impact of ohmic heating on fruits and vegetables—A review. Cogent Food & Agriculture, 2(1), p.1159000.
- Khairiyah, S., Sinaga, S.M. and De Putra, E., 2022. Determination Of Vitamin C And Antioxidant Activity In Fresh Red Guava (Psidium Guajava L.) And Red Guava Commercial Fruit Juices. International Journal of Science, Technology & Management, 3(4), 880-883.
- Mohammadi, P., Amiri Chayjan, R. and Darvishi, H., 2025. Process production of date syrup using ohmic heating under vacuum: Evaluating the impact of voltage gradient and pressure on energy consumption, efficiency, and quality characteristics. Innovative Food Technologies. 12(2), 192-211.

منابع

- Pataro, G., Barca, G.M., Pereira, R.N., Vicente, A.A., Teixeira, J.A. and Ferrari, G., 2014. Quantification of metal release from stainless steel electrodes during conventional and pulsed ohmic heating. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 21, 66-73.
- Sabanci, S. and Icier, F., 2017. Applicability of ohmic heating assisted vacuum evaporation for concentration of sour cherry juice. Journal of Food Engineering, 212, 262-270.
- 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.
- 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.
- Sakr, M., Liu, S. 2014. A comprehensive review on applications of ohmic heating (OH). Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39, 262-269
- Samaranayake, P., Sastry, S.K., 2005. Electrode and pH effects on electrochemical reactions during ohmic heating. Journal of Electroanalytical Chemistry, 577: 125135.
- Sánchez-Moreno, C., Larrauri, J.A., Saura-Calixto, F. 1999. A procedure to measure the antiradical efficiency of polyphenols. Journal of the Science of Food and Agriculture, 76, 270–276.
- Shiby V.K., Pandey, M.C., Radhakrishna, K., Bawa, A.C. 2014. Technology, applications and modelling of ohmic heating: a review. Journal of Food Science and Technology, 51: 2304–2317
- Soghani, B.N., Azadbakht, M. and Darvishi, H., 2018. Ohmic blanching of white mushroom and its pretreatment during microwave drying. Heat and Mass Transfer, 54, .3715-3725.
- Tavares, H.M., Tessaro, I.C. and Cardozo, N.S.M., 2022. Concentration of grape juice: Combined forward osmosis/evaporation versus conventional evaporation. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 75, p.102905.
- Yildiz, H., Icier, F., Baysal, T., 2010. Changes in β-carotene, chlorophyll and color of spinach puree during ohmic heating. Journal of Food Process Engineering, 33: 763-779.

### Black Grape Juice Concentration via Ohmic-Vacuum Hybrid Heating: Quality Parameters, Energy Consumption and Exergy Efficiency

Nazila Zandi<sup>1</sup>, Jalal Khodaei<sup>1</sup>, Hosain Darvishi<sup>\*1</sup>, Nasser Behroozi-Khazaei<sup>1</sup>, Mahmoud Koushesh Saba<sup>2</sup> <sup>1</sup>Department of Biosystems Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Kurdistan, Iran <sup>2</sup>Department of Horticultural Science, University of Kurdistan, Sanandaj, Kurdistan, Iran

\*Corresponding author email: H.darvishi@uok.ac.ir

**Introduction:** Conventional thermal processing methods for fruit juice concentration often lead to significant nutrient degradation and high energy consumption. Ohmic heating (OH) has emerged as an advanced alternative, utilizing electrical resistance to generate rapid, uniform heating. When combined with vacuum technology, OH enables lower processing temperatures by reducing the boiling point, thereby better preserving heat-sensitive bioactive compounds. Black grape juice, rich in polyphenols and antioxidants, presents an ideal candidate for this hybrid approach. However, the interplay between operational parameters (voltage gradient and vacuum pressure) and their effects on processing efficiency and product quality remains underexplored. This study systematically evaluates the ohmic-vacuum concentration of black grape juice to identify best conditions that balance energy efficiency with quality retention.

**Material and methods:** Fresh black grapes were sourced from vineyards in Sanandaj, Iran. The juice was extracted, filtered, and standardized to  $15.5 \pm 0.5$  °Brix using a refractometer. The experimental setup consisted of a Pyrex ohmic chamber ( $10 \times 10 \times 15$  cm) with 316L stainless steel electrodes (2 mm thickness, 10 cm spacing), connected to a vacuum system (50-100 kPa), power regulator (0-30 V/cm, 60 Hz AC), and data acquisition unit. Processing conditions tested three voltage gradients (10, 20, 30 V/cm) and three pressures (50, 70, 100 kPa) until 70 °Brix concentration was achieved. Heating rates were calculated from temperature-time curves using Teflon-coated thermocouples ( $\pm 0.1$ °C). Specific energy consumption (SEC, MJ/kg water) combined ohmic and vacuum pump energy inputs. Exergy efficiency accounted for thermal irreversibilities using ambient (293 K) and product temperatures. Quality analyses included pH (digital meter), total phenolics (Folin-Ciocalteu method, 760 nm), and antioxidant activity (DPPH assay, IC<sub>50</sub> at 517 nm). All experiments were triplicated, with data analyzed via ANOVA and Duncan's test (SPSS v18, p < 0.05).

**Results:** The study demonstrated significant effects of voltage gradient and vacuum pressure on processing kinetics, energy efficiency, and product quality during ohmic-vacuum concentration of black grape juice. Increasing voltage gradient from 10 to 30 V/cm at atmospheric pressure (100 kPa) improved heating rates from 0.06 to  $1.24^{\circ}$ C/s, reducing processing time by 4.7-fold (32.02 min to 7.78 min). Under vacuum conditions (50 kPa), heating rates decreased by 28% (0.07-0.89°C/s) due to reduced electrical conductivity, extending processing time to 32.02 min at 10 V/cm. The fastest processing (7.78 min) occurred at 30 V/cm and 100 kPa, while the slowest (32.02 min) was observed at 10 V/cm and 50 kPa. Specific energy consumption (SEC) ranged from 1.92-2.27 MJ/kg water at 100 kPa, increasing 2.5-4.5 times under vacuum (4.95-10.05 MJ/kg at 50 kPa) due to additional pump energy requirements. Exergy efficiency peaked at 18.78% for 30 V/cm at 100 kPa, but decreased to 2.5-6% at 50 kPa. The vacuum pump accounted for 64-89% of total energy consumption under reduced pressure conditions. pH reduction was minimized (4.58%) at 50 kPa and 10 V/cm, compared to 16% reduction at 100 kPa. Total phenolic content reached maximum retention (857 mg GAE/100 mL) at 50 kPa and 10 V/cm, with higher voltages causing progressive degradation. Antioxidant activity (IC50) showed optimal results (19.36%) at 50 kPa and 10 V/cm, but deteriorated to 35-40% at 30 V/cm. Color parameters (L, *a*, b\*) indicated greater changes at higher voltages and atmospheric pressure.

**Conclusion:** The ohmic-vacuum hybrid system demonstrated that higher voltage gradients (30 V/cm) reduced processing time and improved exergy efficiency (18.78% at 100 kPa), but vacuum conditions (50 kPa) increased energy demand. Low pressure (50 kPa) and moderate voltage (10 V/cm) optimally preserved phenolics and antioxidants, despite longer processing times. Balancing energy efficiency (favoring 100 kPa) with quality (favoring 50 kPa) requires optimization. Future studies should explore scaling this technology for industrial applications while minimizing energy use. This research highlights the potential of ohmic-vacuum heating as a sustainable solution for juice concentration, addressing both energy and quality challenges in the food industry.

Keywords: Ohmic-vacuum heating; quality; energy consumption; exergy efficiency; grape juice concentration