

مقاله پژوهشی

تغلیظ آب انگور سیاه با استفاده از سیستم ترکیبی گرمایش اهمی-خلاء: پارامترهای کیفی، انرژی مصرفی و راندمان اکسرژی

نازیلا زندی^۱، جلال خدایی^۲، حسین درویشی^{۳*}، ناصر بهروزی خزایی^۲، محمود کوشش صبا^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج، کردستان

۲. دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج، کردستان

۳. دانشیار، گروه علوم باغبانی، دانشگاه کردستان، سنندج، کردستان

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۲/۱۱، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵)

چکیده

در این مطالعه، فرایند تغلیظ آب انگور سیاه با استفاده از سامانه ترکیبی گرمایش اهمی-خلاء و تأثیر پارامترهای فشار (۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ kPa) و گرادیان ولتاژ (۱۰، ۲۰ و ۳۰ V/cm) بر زمان فراوری، انرژی مصرفی ویژه، راندمان اکسرژی و پارامترهای کیفی (pH، محتوای فنول کل و فعالیت آنتی اکسیدانی) بررسی شد. نتایج نشان داد افزایش گرادیان ولتاژ، نرخ گرمایش به طور معناداری افزایش و زمان فراوری را کاهش می‌دهد. در حالی که ترکیب گرمایش اهمی با خلاء (فشار ۷۵ و ۵۰ kPa) سبب افزایش زمان فراوری شده است. انرژی مصرفی ویژه در فشار اتمسفر (۱۰۰ kPa) بین ۱/۹۲ تا ۲/۲۷ MJ/kg water متغیر بود، در حالی که کاهش فشار تا ۵۰ kPa سبب افزایش ۲/۵۴ الی ۴/۴۲ برابری انرژی مصرفی ویژه شده است. بالاترین راندمان اکسرژی (۱۸/۷۸٪) در فشار ۱۰۰ kPa و گرادیان ولتاژ ۳۰ V/cm مشاهده شد. از نظر کیفی، کاهش pH (تا ۱۶٪) و حفظ محتوای فنول کل (۸۵۷ mg GAE/100ml) و فعالیت آنتی اکسیدانی ($IC_{50} = ۱۹/۳۶$ ٪) در فشار ۵۰ kPa و گرادیان ولتاژ ۱۰ V/cm بهترین نتایج کیفی بودند. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان بیان داشت بهینه‌سازی فرایند تغلیظ با انتخاب سطوح مناسب فشار و گرادیان ولتاژ را برای دستیابی به تعادلی میان کارایی انرژی و کیفیت محصول می‌تواند در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرد.

کلمات کلیدی: گرمایش اهمی-خلاء، کیفیت، انرژی مصرفی، راندمان اکسرژی، تغلیظ آب انگور

* نویسنده مسئول: H.darvishi@uok.ac.ir

۱. مقدمه

آب انگور نوشیدنی محبوبی است که به دلیل طعم خوشایند و فواید بهداشتی بیشماری که دارد، در سراسر جهان مصرف می‌شود. انگور منبع عالی از آنتی‌اکسیدان‌ها، ویتامین‌ها و مواد معدنی است که آب انگور را به یک انتخاب مغذی تبدیل می‌کند [۱]. با این حال، یکی از چالش‌های مربوط به تولید آب انگور، محتوای بالای آب آن است که ممکن است منجر به افزایش هزینه‌های حمل و نقل و ذخیره‌سازی و همچنین کاهش عمر مفید شود [۲]. برای مقابله با این مسائل، آب انگور اغلب از طریق تکنیک‌های کاسته شده و محصول تغلیظ می‌شود.

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 می‌گردد. در صنایع فرآوری محصولات غذایی، به‌طور معمول از روش گرمایش با بخار یا دیگ داغ استفاده می‌گردد. به دلیل غیر یکنواخت بودن فرایند حرارت‌دهی در گرمایش رایج و پایین ضرایب انتقال حرارت محصولات کشاورزی کیفیت محصول نهایی بسیار پایین می‌باشد [۳]. همچنین به دلیل طولانی بودن فرایند گرمایش، انرژی مصرفی بالا و راندمان حرارتی کم می‌باشد [۴]. از این رو، توسعه روش‌های جدید فرآوری برای فرایندهای حرارت‌دهی مواد غذایی یکی از زمینه‌های مورد توجه محققین در صنعت مواد غذایی است.

در میان روش‌های مختلف تغلیظ، گرمایش اهمی به عنوان یک فناوری امیدبخش برای تغلیظ آبمیوه می‌باشد. گرمایش اهمی که به عنوان گرمایش مقاومت الکتریکی یا گرمایش ژول نیز شناخته می‌شود، شامل عبور یک جریان الکتریکی متناوب از محصول غذایی است که به عنوان یک مقاومت الکتریکی عمل می‌کند. انرژی الکتریکی به صورت گرما در ماتریس غذایی پراکنده می‌شود و باعث گرم شدن سریع و یکنواخت می‌گردد [۵-۶]. این فرایند برای مایعات غذایی مانند آبمیوه‌ها بسیار مناسب است، زیرا به انتقال گرمای کارآمد و همگن اجازه می‌دهد بدون اینکه به مکانیسم‌های انتقال گرمای رسانش یا همرفت متکی باشد [۷-۸].

ترکیب گرمایش اهمی با فناوری خلاء باعث کاهش فشار و در نتیجه کاهش نقطه جوش آبمیوه می‌شود و امکان انجام

فرایند تغلیظ را در دماهای پایین‌تر نسبت به روش‌های تبخیر سنتی فراهم می‌آورد [۹-۸]. فرایند گرمایش-تحت خلاء به حفظ کیفیت تغذیه‌ای، طعم و رنگ محصول کمک می‌کند، زیرا از تجزیه ترکیبات حساس به گرما جلوگیری می‌نماید [۱۰]. یکی از عوامل کلیدی که بر فرایند گرمایش اهمی-خلاء تأثیر می‌گذارد، نرخ گرمایش است که به طور مستقیم با هدایت الکتریکی آب میوه و گرادیان ولتاژ اعمال شده مرتبط است [۱۱]. ایجاد یکنواختی دما در محصول، کاهش زمان فرآوری و همچنین افزایش نرخ گرمایش طی فرآوری محصول سبب می‌شود تغییرات کیفی محصول به حداقل رسانده شود [۱۲]. علاوه بر این، گزارش شده است که گرمایش اهمی در مقایسه با تکنیک‌های پردازش حرارتی متداول، مصرف انرژی کمتری دارد که آن را از دیدگاه زیست محیطی و اقتصادی گزینه جذابی می‌سازد [۱۳-۱۴].

با این حال، پیاده‌سازی موفق گرمایش اهمی-خلاء برای تغلیظ آب انگور سیاه نیازمند درک کاملی از تأثیر پارامترهای مستقل مانند گرادیان ولتاژ و فشار محیط فرآوری بر جنبه‌های مختلف فرآوری از جمله مصرف انرژی، راندمان حرارتی، کیفیت محصول، زمان فرآوری، نرخ گرمایش و دمای فرآوری 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 فرآوری بررسی نماید. با کسب درک جامعی از این جنبه‌ها، این تحقیق تلاش می‌کند 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 مصرف‌کنندگان خواهد بود.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. آماده سازی نمونه‌های آب انگور

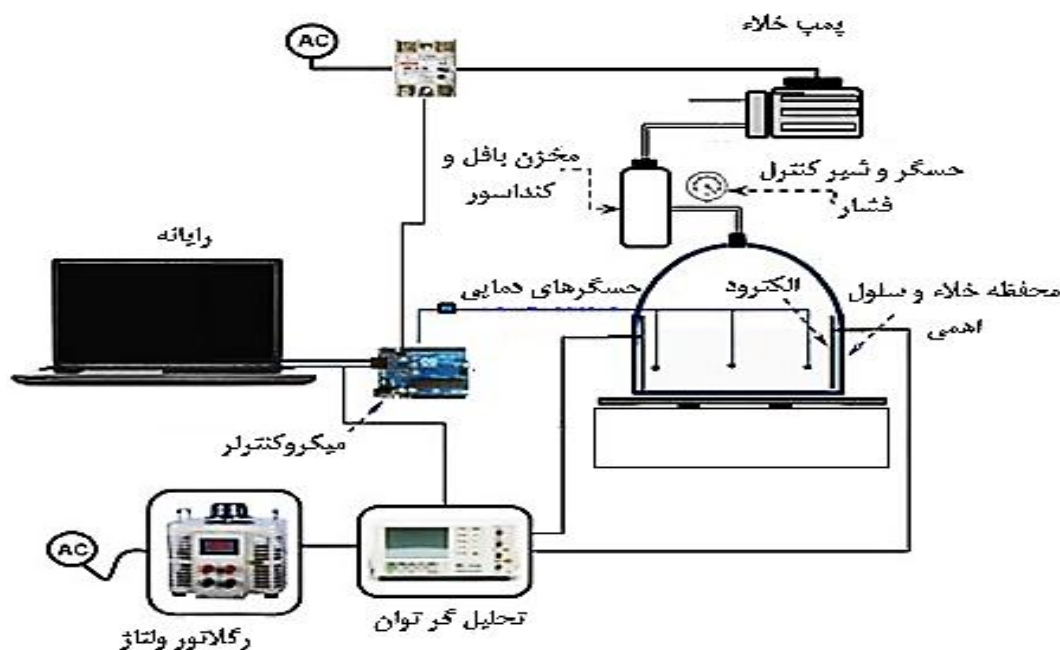
نمونه‌های تازه میوه انگور سیاه (رقم رشه، *Vitis vinifera*) از یک باغستان انگور دیم در نواحی کوهستانی سمنج، استان کردستان در اواخر شهریور ماه سال ۱۴۰۱ خریداری شد. نمونه‌ها ابتدا با آب شسته شده، سپس با استفاده از سامانه تحت فشار آب میوه استخراج گردید. عمل فیلتراسیون با استفاده از یک صافی به منظور یکنواخت

منظور معیان آب بخار شده از محصول، یک مخزن بافل برای ایجاد فشار یکنواخت بر سطح محصول، میکروکنترلر و رایانه شخصی است. تغییرات جرم نمونه طی فرآیند تغلیظ با استفاده از حجم آب معیان شده در مسیر کنداسور اندازه‌گیری شد. در هر آزمایش مقدار ۱۰۵ gr نمونه آب میوه تازه با دمای اولیه $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ استفاده شد. آزمایشات برای گرادیان ولتاژهای ۱۵، ۲۰، ۲۵ و 30 V/cm در سطوح فشار ۵۰، ۷۰ و 100 kPa در سه تکرار انجام گرفت. فشار 100 kPa به عنوان فشار اتمسفر (حالت گرمایش اهمی فاقد خلأ) در نظر گرفته شد. قبل شروع اعمال گرادیان ولتاژ بر محصول، پمپ خلأ به مدت ۲ min 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 اندازه‌گیری و ثبت شد. پس از انجام هر آزمایش، الکترودها و محفظه شیشه‌ای با آب شهری شست‌وشو داده شد. نمونه‌های تغلیظ شده در ظرف‌های شیشه‌ای ۲۵ mL بسته‌بندی شده و تا انجام آزمایشات کیفی در دمای 4°C نگهداری شدند.

نمودن آب میوه انجام گرفت. مواد محلول جامد در نمونه آب میوه (پس از فرایند فیلتراسیون) با استفاده از رفرکتومتر دستی (Atago, Japan) در دمای 20°C برابر با 15.5 ± 0.5 بریکس به دست آمد.

۲.۲. سامانه گرمایش اهمی-خلأ

شماتیک و تصویر سامانه گرمایش اهمی-تحت خلأ در شکل (۱) نشان داده شده است. سامانه گرمایش اهمی شامل یک محفظه شیشه‌ای از جنس پیرکس (مستطیلی شکل با ابعاد $15 \times 10.5 \times 10.5 \text{ cm}$)، دو عدد الکتروود از فولاد ضد زنگ ۳۱۶ L با ضخامت ۲ mm (با فاصله ۱۰ cm از همدیگر)، یک محفظه دسیکاتور با حجم ۴/۳۵ L به عنوان محیط خلأ، یک تحلیل‌گر توان (شرکت لوترون، ساخت تایوان) برای اندازه‌گیری جریان الکتریکی، ولتاژ و توان مصرفی، سه عدد ترموکوپل با پوشش تلفونی برای اندازه‌گیری دمای نمونه طی فرایند گرمایش، رگلاتور ولتاژ (۳ kW، ساخت کره)، یک پمپ خلأ با توان مصرفی ۳۷۵ (والیو، ساخت چین)، یک کنداسور حاوی آب و یخ به





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

۳.۲. نرخ گرمایش

مقدار اکسرژی محصول خروجی از رابطه زیر محاسبه شد

[۱۷]:

$$EX_p = m_p C_p \left[T_p - T_\infty - T_\infty \ln \left(\frac{T_p}{T_\infty} \right) \right] \quad (۳)$$

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 محیط (K) می‌باشد.

مقدار اکسرژی آب بخار شده از ماده مطابق با رابطه زیر محاسبه شد [۴]:

$$EX_{evp} = m_w \left[1 - \frac{T_\infty}{T_p} \right] \times h_{fg} \quad (۴)$$

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

مقدار اکسرژی محصول ورودی از رابطه زیر محاسبه شد [۱۸]:

$$EX_f = m_f C_p \left[T_f - T_\infty - T_\infty \ln \left(\frac{T_f}{T_\infty} \right) \right] \quad (۵)$$

که در آن، m_f جرم محصول اولیه (kg) و T_f دمای اولیه ماده محصول (K) می‌باشد. اکسرژی محصول ورودی به محفظه به دلیل همدمای بودن محصول و محیط برابر با صفر در نظر گرفته شد.

مقدار اکسرژی مصرفی سامانه گرمایش اهمی - خلاء از رابطه زیر محاسبه شد [۱۶]:

$$EX_{OHV} = 0.99 \sum (VI \times \Delta t) + P_{vp} \times t \quad (۶)$$

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.

۴.۲. انرژی مصرفی ویژه

مقدار انرژی مصرفی ویژه با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد [۱۵]:

$$SEC = \frac{P_{vp} \times t + \sum VI \times \Delta t}{m_w} \quad (۱)$$

که در آن، m_w جرم آب بخار شده از محصول (kg)، t زمان فرایند تغلیظ (S)، Δt گام زمانی اندازه‌گیری پارامترهای جریان و ولتاژ ($\Delta t = 1s$)، P_{vp} توان مصرفی پمپ خلاء (W)، SEC انرژی مصرفی ویژه (MJ/kg water evp.) می‌باشد.

۵.۲. راندمان اکسرژی

راندمان اکسرژی کل سامانه گرمایش از رابطه زیر محاسبه شد [۱۶]:

$$\eta_{ex} = \left(\frac{EX_p + EX_{evp}}{EX_f + EX_{OHV}} \right) \times 100 \quad (۲)$$

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 - خلا (J) می‌باشد.

۶.۲. pH

۲،۲-دیفنیل-۱-پیکریل هیدرازیل (DPPH) براساس روش Sánchez-Moreno et al. [19] در طول موج ۵۱۷ nm توسط دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه گیری شد. فعالیت آنتی اکسیدانی بر اساس اندازه گیری IC_{50} با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$IC_{50} = \frac{AB_c - AB_s}{AB_c} \times 100 \quad (A)$$

که در آن، AB_c و AB_s به ترتیب مقدار جذب در ۵۱۷ nm برای نمونه شاهد و نمونه مورد آزمایش و IC_{50} بیانگر فعالیت آنتی اکسیدانی (%) است.

۹.۲. آنالیزهای آماری

آزمایش ها در سه تکرار انجام گرفت. نتایج به فرم مقادیر میانگین $\pm$ خطای استاندارد گزارش شده اند. برای تعیین تأثیر گرادیان ولتاژ و فشار بر خصوصیات اندازه گیری شده از آزمون مقایسه میانگین های 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.

مقادیر pH نمونه های تازه و تغلیظ شده با استفاده از pH-متر (مدل اترن، ساخت ایران) در دمای $20^\circ C$ اندازه گیری شد. تغییرات pH نمونه از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\Delta pH = \left(\frac{pH_p - pH_0}{pH_0} \right) \times 100 \quad (V)$$

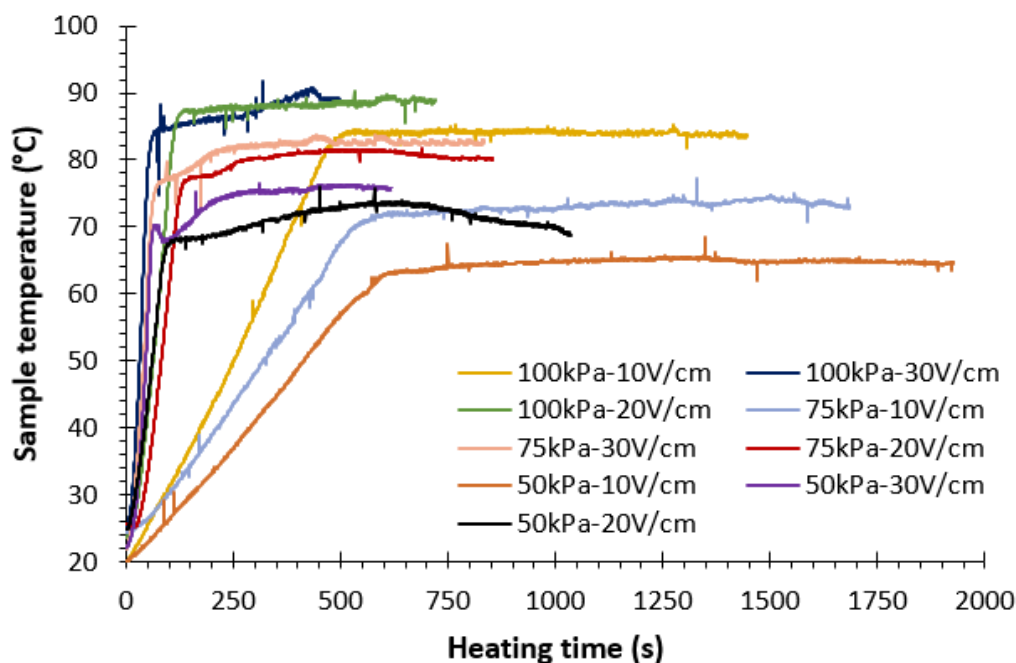
که در آن، اندیس های p و 0 به ترتیب بیانگر ماده فرآوری شده و ماده تازه می باشند.

۷.۲. محتوای فنول کل

محتوای فنول کل نمونه ها پس از عصاره گیری با استفاده از روش فولین سیوکالتو در طول موج ۷۶۰ nm 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.

۸.۲. فعالیت آنتی اکسیدانی

فعالیت آنتی اکسیدانی توسط روش مهار رادیکال آزاد



شکل (۲). تغییرات دمای آب انگور طی فرایند تغلیظ تحت شرایط مختلف گرمایش اهمی - خلأ

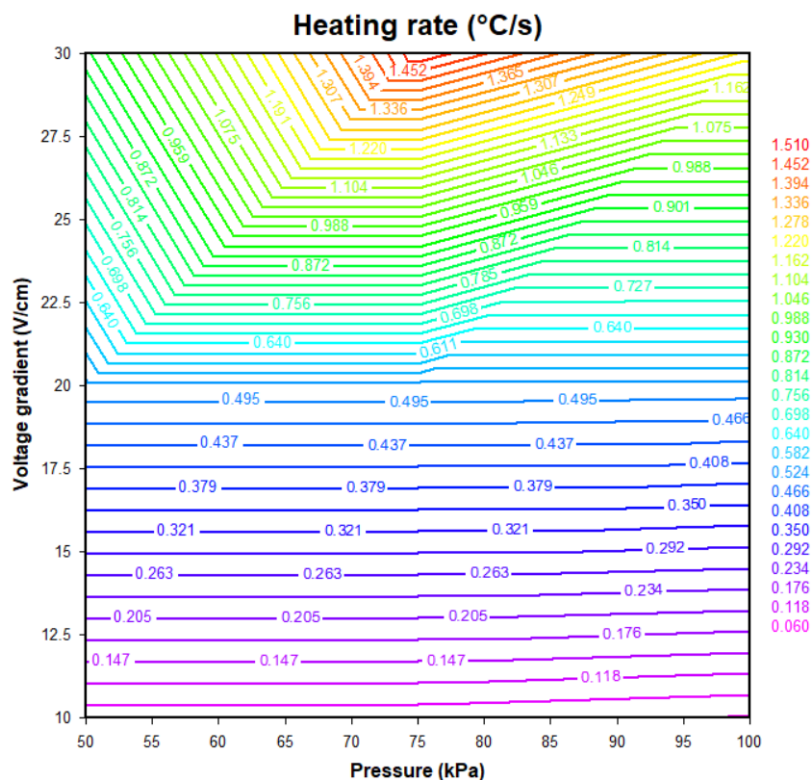
Fig 2. Temperature profile evolution during ohmic-vacuum concentration of grape juice

۳. نتایج و بحث

۱.۳. نرخ گرمایش و زمان فرآوری

کندتر و کمتر افزایش پیدا می‌کند. این شرایط برای ۵۰ kPa شدیدتر می‌باشد چرا که شدت جریان الکتریکی عبوری از محصول در خلاء به جد کاهش یافته [۱۵]، این امر منجر به نرخ پایین انرژی تولیدی در محصول شده و دمای محصول از $64/9^{\circ}\text{C}$ بالاتر نمی‌رود. 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، مقدار انرژی ورودی به محصول افزایش و همین امر سبب افزایش نرخ حرارت‌دهی شده است [۸،۲۰]. نرخ گرمایش با افزایش گرادیان ولتاژ از ۱۰ به 30 V/cm در فشار ۱۰۰ kPa از $0/06^{\circ}\text{C/s}$ به $1/24^{\circ}\text{C/s}$ ، برای فشار ۷۵ kPa از $0/07^{\circ}\text{C/s}$ به $1/51^{\circ}\text{C/s}$ و برای فشار ۵۰ kPa از $0/07^{\circ}\text{C/s}$ به $2/0\text{ V/cm}$ ، افزایش یافته است. در سطوح گرادیان ولتاژ ۱۰ و 20 V/cm ، افزایش فشار فاقد تأثیر معنی‌داری بر نرخ گرمایش بود ($p > 0.01$). این در حالی است که در گرادیان ولتاژ 30 V/cm با تغییر فشار از ۱۰۰ kPa به ۵۰ kPa، نرخ گرمایش از $1/29$ به $0/89^{\circ}\text{C/s}$ کاهش یافته است.

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 ولتاژ ۲۰ و 30 V/cm تا $88/9 \pm 0/5^{\circ}\text{C}$ و تا انتهای فرایند تغلیظ تقریباً ثابت می‌ماند. در حالی که در گرادیان ولتاژ 10 V/cm دمای محصول حداکثر به $85/8 \pm 0/6^{\circ}\text{C}$ رسیده است. این روند در دیگر سطوح فشار نیز مشاهده شده است. در فشار ۷۵ kPa و ۵۰ kPa برای گرادیان ولتاژهای ۲۰ و 30 V/cm به ترتیب دمای محصول حداکثر تا $1/2^{\circ}\text{C}$ و $82/4 \pm 1/5^{\circ}\text{C}$ تا $72/8 \pm 1/5^{\circ}\text{C}$ افزایش یافت. با این دمای محصول طی فرایند تغلیظ برای گرادیان ولتاژ 10 V/cm ، برای سطوح فشار ۷۵ و ۵۰ kPa به ترتیب برابر با $0/8^{\circ}\text{C}$ و $73/5 \pm 0/5^{\circ}\text{C}$ بود. در گرادیان ولتاژ 10 V/cm ، شدت میدان الکتریکی کمتر است، بنابراین گرمای تولید شده پایین در محصول سبب می‌شود که دمای محصول



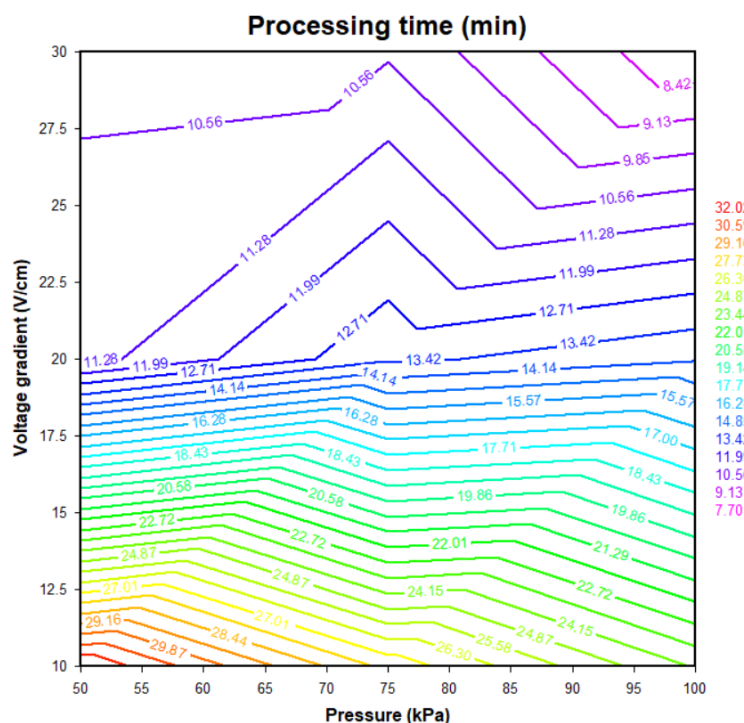
شکل (۳). اثر گرادیان ولتاژ و فشار بر نرخ گرمایش آب انگور در سامانه گرمایش اهمی - خلاء

Fig 3. Pressure and voltage gradient effects on heating rate in ohmic-vacuum grape juice concentration

دارد. علت افزایش زمان فرآوری با کاهش فشار اعمالی را می‌توان به وابستگی هدایت الکتریکی، ظرفیت گرمایی ویژه ماده و گرمایی مورد نیاز برای تبخیر آب ماده، به فشار اعمال شده بر سطح نسبت داد [۱۱]. در گرادیان ولتاژ ثابت، هدایت الکتریکی ماده در فشار پایین به‌طور معنی‌داری کمتر از هدایت الکتریکی ماده در فشار های بالا است [۱۵]. در نتیجه، نرخ گرمای تولید شده در ماده کمتر شده که در نهایت منجر به افزایش زمان فرآوری می‌شود. از سوی دیگر، با کاهش فشار بر رروی سطح ماده ظرفیت گرمایی ویژه ماده و گرمایی مورد نیاز برای تبخیر ماده کاهش می‌یابد این امر سبب می‌شود در فشارهای پایین انرژی کمتری برای رسیدن ماده به دمای جوشش لازم می‌باشد؛ در نتیجه حجم بیشتری از انرژی صرف فرایند تبخیر خواهد داد. اما تأثیر هدایت الکتریکی بر نرخ تبخیر به مراتب بیشتر از دمای پایین جوش بوده است. نتایج به دست آمده در این تحقیق با گزارشات صورت گرفته برای فرایند تغلیظ آب پرتقال در سامانه گرمایشی اهمی-خلأ [۹] و آب میوه کیوی [۱۵] مطابقت دارد.

۲.۳. زمان فرآوری

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 ۳۰ زمان لازم برای فرآوری نمونه‌ها به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است. با افزایش گرادیان ولتاژ، زمان فرآوری تقریباً $4/7$ برابر در فشار 100 kPa ، $3/2$ برابر در فشار 75 kPa و $4/8$ برابر در فشار 50 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 فرایند انجامید [۲۰]. همچنین با کاهش فشار وارده بر سطح ماده (از ۱۰۰ به 50 kPa) زمان فرآوری افزایش یافته است. به عبارت دیگر، در تمامی سطوح گرادیان ولتاژ، پایین‌ترین زمان فرآوری در فشار اتمسفر (فاقد خلأ) و بالاترین زمان فرآوری در فشار اعمالی 50 kPa به دست آمد. زمان فرآوری برای تغلیظ آب انگور در فشار 100 kPa در محدوده $7/78 \text{ min}$ الی $24/10$ ، در فشار 75 kPa در محدوده $10/47 \text{ min}$ الی $27/50$ و در فشار 50 kPa در محدوده $10/40 \text{ min}$ الی $32/02$ قرار



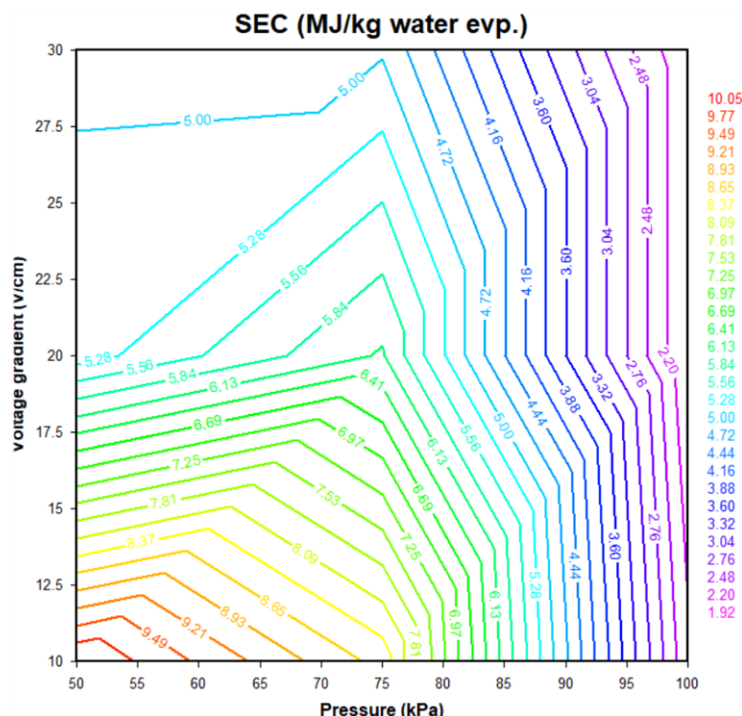
شکل (۴). اثر فشار و گرادیان ولتاژ بر زمان فرآوری فرایند تغلیظ آب انگور به روش گرمایش اهمی -خلأ

Fig 4. Pressure and voltage gradient effects on processing time in ohmic-vacuum grape juice concentration

۳.۳. انرژی مصرفی ویژه

حالت خلاء انرژی مصرفی توسط پمپ ۶۴/۴ الی ۸۹/۸٪ از کل انرژی مصرفی را شامل می‌شود. به عبارت دیگر، انرژی مصرفی توسط بخش اهمی سامانه گرمایش تحت شرایط خلاء در محدوده ۱/۰۲ الی ۲/۵۲ MJ/kg water متغیر بوده است. کمترین مقدار انرژی مصرفی ویژه در شرایط خلاء (۴/۹۵ MJ/kg water) تقریباً ۲/۵۴ برابر بیشتر از کمترین مقدار انرژی مصرفی ویژه در فشار اتمسفر بوده است. مطابق پژوهش‌های انجام‌شده، انرژی مصرفی ویژه برای تغلیظ آب انگور به روش گرمایش مایکروویو-خلاء در محدوده ۱/۹۵ الی ۶/۴۸ MJ/kg water گزارش شده است [۲۲]. در مقابل، این مقدار برای روش‌های گرمایش معمولی (دیگ داغ)، گرمایش مایکروویو و تقطیر اسمزی به ترتیب ۱۷/۷۵، ۱۰/۸۴ و ۸/۶۹ MJ/kg water اندازه‌گیری شده است [۲۳]. مقدار انرژی مصرفی ویژه در پژوهش حاضر کمتر از مقادیر گزارش‌شده توسط سایر محققان است. این یافته نشان می‌دهد که روش گرمایش اهمی می‌تواند کارایی بالاتری نسبت به سایر روش‌های فرآوری آب انگور داشته باشد و به عنوان یک گزینه بهینه از نظر مصرف انرژی مطرح شود.

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 ۳۰ V/cm، انرژی مصرفی ویژه در فشار ۱۰۰ kPa به مقدار ۱۴/۶٪، در فشار ۷۵ kPa به مقدار ۴۱/۹٪ و در فشار ۵۰ kPa به مقدار ۵۰/۵٪ کاهش یافته است. Darvishi et al. [۲۱] نشان دادند که گرادیان ولتاژ تأثیر معناداری بر مصرف انرژی ($p > 0.05$) فرایند تغلیظ گرمایش اهمی آب انگور در فشار اتمسفری نداشت. انرژی مصرفی ویژه برای تغلیظ 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 ۱۰/۰۵ 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 نسبت به فشار اتمسفر بوده است [۱۵]. در



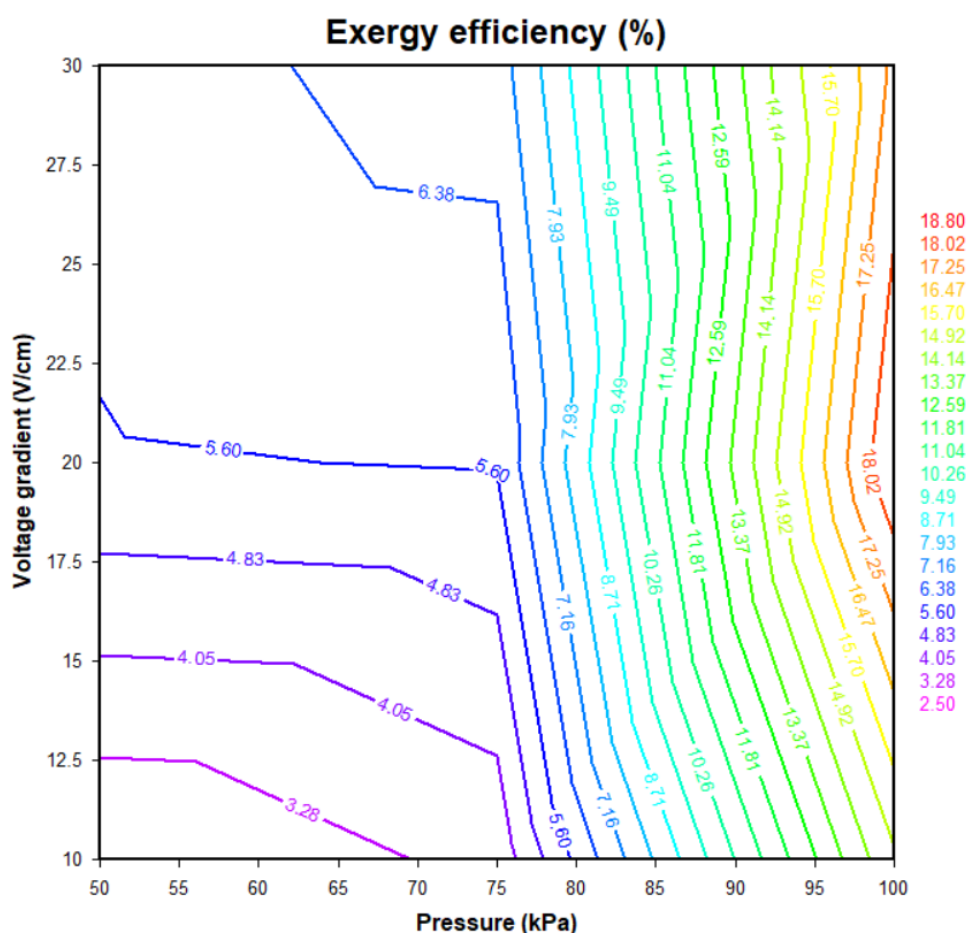
شکل (۵). اثر فشار و گرادیان ولتاژ بر انرژی مصرفی فرایند تغلیظ آب انگور به روش گرمایش اهمی -خلاء

Fig 5. Pressure and voltage gradient effects on specific energy consumption in ohmic-vacuum grape juice concentration

۱۱/۴۰ الی ۱۳/۲۵٪ بیشتر بوده است. علت این روند، اکسرژی مصرفی پمپ خلأ در فشارهای ۵۰ و ۷۵ kPa می‌باشد. همچنین 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 می‌یابد [۲۰]. این امر در نهایت منجر به کاهش اتلاف اکسرژی ناشی از فرایندهای برگشت‌ناپذیر حرارتی و الکتریکی شده و افزایش راندمان اکسرژی سیستم را به همراه دارد [۴، ۱۴]. راندمان اکسرژی در فشار ۱۰۰ kPa در محدوده ۱۴/۸۰ الی ۱۸/۷۸٪، در فشار ۷۵ kPa در محدوده ۳/۴۹ الی ۶/۷۶٪ و در فشار ۵۰ kPa در محدوده ۲/۵۰ الی ۶/۰۳٪ متغیر بوده است.

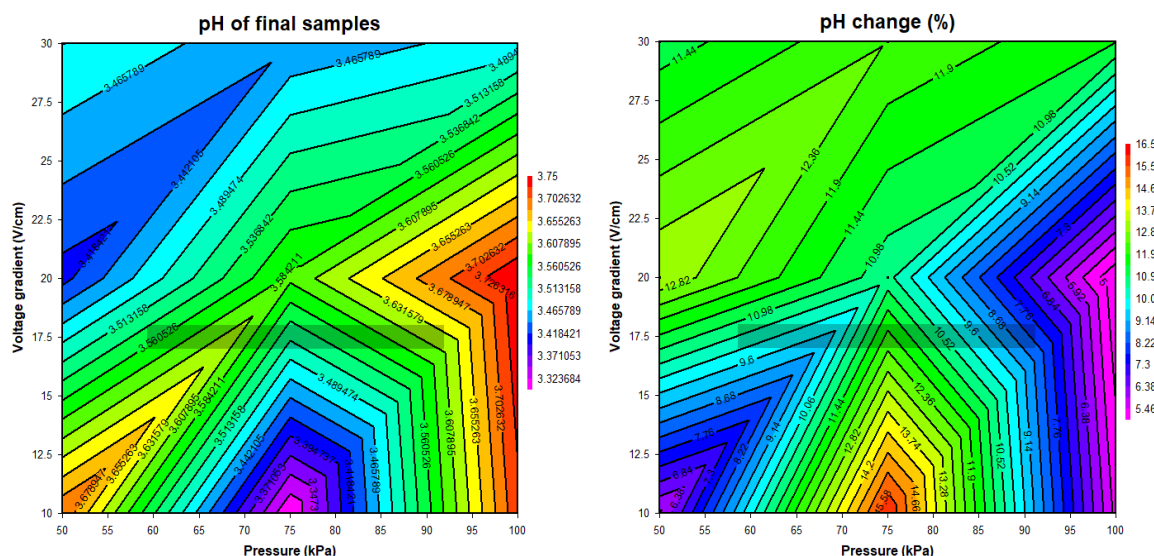
۴.۳. راندمان اکسرژی

تأثیر فشار و گرادیان ولتاژ اعمالی بر راندمان اکسرژی فرایند تغلیظ آب انگور سیاه به روش گرمایش-خلأ در شکل (۶) نشان داده شده است. راندمان اکسرژی در محدوده ۲/۵۰ الی ۱۸/۷۸٪ متغیر بوده است. راندمان اکسرژی فرایند تغلیظ آب آلبالو به روش گرمایش-خلأ در محدوده ۱۱/۴ الی ۱۷/۵٪ [۲۴]، راندمان اکسرژی فرایند تغلیظ آب انار در محدوده ۵/۵۰ الی ۱۸/۳۸٪ [۱۴] و راندمان اکسرژی فرایند تغلیظ شیر خرم در محدوده ۵/۲ الی ۱۲/۴۱٪ [۱۸] گزارش شده است. با کاهش فشار اعمالی از ۱۰۰ به ۵۰ kPa برای تمامی سطوح گرادیان ولتاژ، راندمان اکسرژی کاهش یافته است. راندمان اکسرژی در فشار اتمسفر (۱۰۰ kPa) نسبت به دیگر سطوح فشار اعمالی



شکل (۶). اثر فشار و گرادیان ولتاژ بر راندمان اکسرژی فرایند تغلیظ آب انگور به روش گرمایش-خلأ

Fig 6. Pressure and voltage gradient effects on exergy efficiency in ohmic-vacuum grape juice concentration



شکل (۷). 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

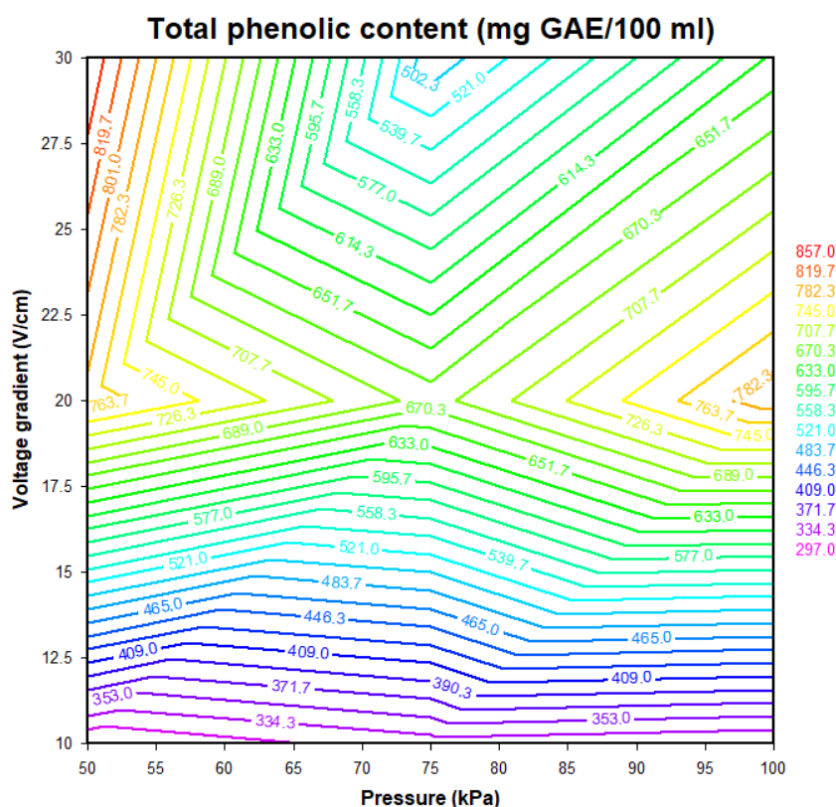
است. طی فرایند تغلیظ، فشار ۷۵ kPa نوعی حالت «حد واسط» بین شرایط شدید تبخیر و شرایط تخریب حرارتی باشد، به این معنا که در این فشار تغلیظ اسیدها به‌طور مؤثرتری انجام شده؛ اما تجزیه حرارتی اسیدها هنوز به‌طور محسوسی رخ نداده است. این در حالی است که اثر گرادیان ولتاژ در سطوح مختلف فشار بر تغییرات pH نمونه‌های فرآوری شده متفاوت است. در فشار ۵۰ kPa با افزایش گرادیان ولتاژ تغییرات pH نمونه افزایش یافته است. به عبارت دیگر افزایش گرادیان ولتاژ در فشار ۵۰ kPa باعث کاهش بیشتر pH نمونه‌های فرآوری شده نسبت به نمونه تازه شده است. این در حالی است که در فشارهای ۷۵ و ۱۰۰ kPa با افزایش گرادیان ولتاژ از ۱۰ به ۲۰ V/cm، تغییرات pH کاهش یافته و پس از 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 فرآوری شده با استفاده از گرمایش اهمی محسوب می‌شوند [۲۶]. 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 [۲۷]. اما

۵.۳. تغییرات pH

مقادیر pH و تغییرات pH نمونه‌های فرآوری شده نسبت به نمونه آب انگور تازه در شکل (۷) نشان داده شده است. مقدار pH آب انگور تازه برابر با ۳/۹۳ اندازه‌گیری شد. مطابق با نتایج به دست آمده، pH نمونه‌های فرآوری شده در محدوده ۳/۳۰ الی ۳/۷۵ متغیر بوده است. به عبارتی دیگر pH نمونه‌های فرآوری شده در حدود ۴/۵۸ الی ۱۶٪ نسبت به تازه کاهش یافته است. آب انگور حاوی اسیدهای آلی مانند اسید تارتاریک، اسید مالیک و در مقادیر کمتر، اسید سیتریک است. وقتی آب تبخیر می‌شود، این اسیدها باقی می‌مانند و غلیظ‌تر می‌شوند. چون pH تابعی از غلظت یون‌های هیدروژن (H) است، افزایش غلظت اسید باعث آزاد شدن بیشتر H^+ و در نتیجه کاهش pH می‌شود [۲۵]. تغییرات pH در فشار ۷۵ kPa بیشتر از دیگر سطوح فشار اعمالی بوده است. این در حالی است که کمترین تغییرات pH نمونه‌ها برای تمامی سطوح گرادیان ولتاژ در فشار ۱۰۰ kPa رخ داده است. علت این امر آن است که در فشار ۱۰۰ kPa، به دلیل دمای بالاتر و احتمال تخریب یا تبخیر ترکیبات اسیدی، شدت افت pH کمتر بوده است، در حالی که در فشار ۷۵ kPa تغلیظ مؤثر اسیدها بدون تخریب آن‌ها صورت گرفته و در نتیجه کاهش بیشتری در مقدار pH مشاهده شده

ولتاژ، تغییرات pH کاهش می‌یابد، اما در سطوح بالاتر گرادیان ولتاژ، روند تغییرات pH معکوس شده و افزایش می‌یابد. این رفتار می‌تواند به دلیل تعامل هم‌زمان گرمایش شدید، افزایش واکنش‌های الکتروشیمیایی و تغییرات ساختاری در ترکیبات محلول باشد [۲۶].

با افزایش گرادیان ولتاژ، هم شدت گرمایش و هم فعالیت‌های الکتروشیمیایی افزایش می‌یابد؛ این امر می‌تواند منجر به هیدرولیز ترکیبات موجود، خوردگی بیشتر الکترودها و تولید یون‌های اضافی در محیط شود [۲۸-۲۹]. همچنین، در این شرایط احتمال تخریب جزئی ترکیبات حساس مانند اسیدهای آلی بالا می‌رود. بنابراین، در ابتدا با افزایش گرادیان



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

۶.۳. محتوای فنول کل

۵۰ kPa به دلیل پایین بودن دمای فرآوری نسبت به فشار ۱۰۰ kPa در گرادیان ولتاژهای یکسان بیشتر بوده است. [10] Darvishi et al. نیز طی فرایند گرمایش اهمی نشان دادند، افزایش گرادیان ولتاژ سبب حفظ بیشتر ویتامین ث و فنل کل آب میوه پرتقال می‌گردد. [۶] Yildiz et al. مطابق نتایج آزمایشات خود نشان دادند، گرمایش اهمی باعث افزایش فنول کل آب انار شد. همچنین [۱۶] Sabanci and Icier گزارش کردند که حالت خلأ تأثیر معنی‌داری بر حفظ کیفیت محتوای فنول کل دارد زیرا در این فرآیند در غیاب اکسیژن دمای محصول نسبت به حالت اتمسفر پایین‌تر بوده و سبب

تأثیر پارامترهای فشار و گرادیان ولتاژ بر محتوای فنول نمونه‌های تغلیظ شده در شکل ۸) نشان داده شده است. نتایج آماری به دست بیانگر تأثیر معنی‌دار فاکتورهای گرادیان ولتاژ و فشار بر محتوای فنول کل بود ($p < 0.01$). با این حال اثر گرادیان ولتاژ بر تغییرات محتوای فنول کل آب انگور سیاه بیشتر از تأثیر فشار بوده است. در فشارهای اعمالی ۵۰ و ۱۰۰ kPa با افزایش گرادیان ولتاژ محتوای فنول کل نمونه‌ای فرآوری شده به کاهش زمان فرآوری کاهش یافته است. همچنین محتوای فنول کل نمونه‌های فرآوری شده در فشار

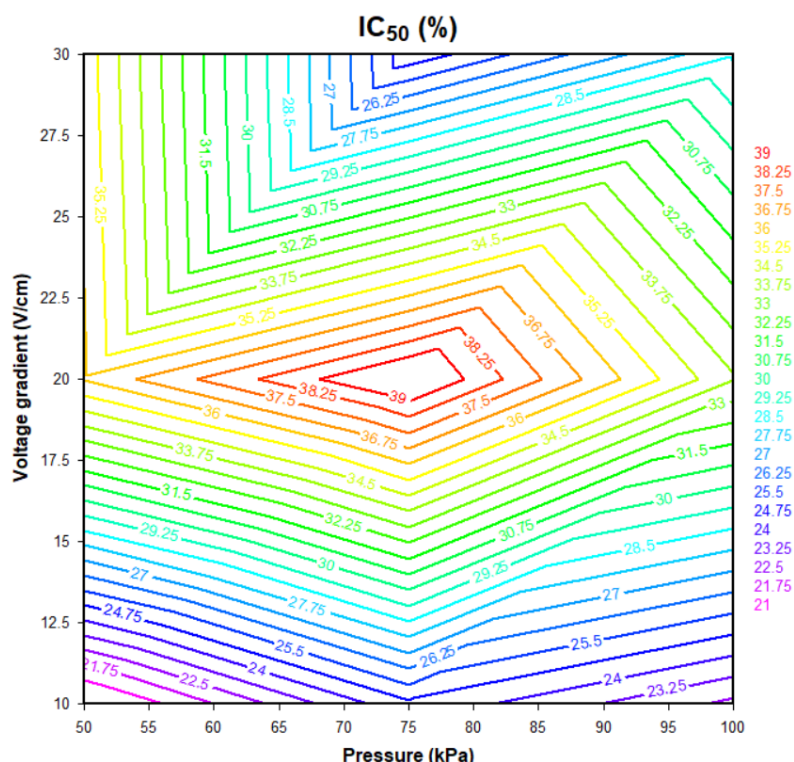


نزولی نشانه عملکرد بهتر ترکیبات آنتی‌اکسیدانی است [۳۰]. در فشار ثابت ۵۰ kPa، افزایش گرادیان ولتاژ از ۱۰ به ۳۶/۱۱ V/cm منجر به افزایش قابل توجه IC_{50} از ۱۹/۸۴٪ به ۳۶/۱۱٪ گردید که حاکی از کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی است. با افزایش بیشتر ولتاژ به ۳۰ V/cm، مقدار IC_{50} به ۳۵/۷۱٪ رسید که تغییر چشمگیری نسبت به مقدار پیشین نداشت ($p > 0.05$). این یافته‌ها نشان می‌دهد که افزایش بیش از حد گرادیان ولتاژ می‌تواند به تخریب ترکیبات فنولی منجر شده و عملکرد آنتی‌اکسیدانی را کاهش دهد [۳۱، ۱۵]. در فشار ۷۵ kPa، بالاترین مقدار IC_{50} (۴۰/۰۸٪) در گرادیان ولتاژ ۲۰ V/cm به دست آمد، در حالی که در گرادیان ولتاژ ۳۰ V/cm این مقدار به ۲۴/۲۱٪ کاهش یافت. این کاهش ناگهانی می‌تواند ناشی از وقوع تغییرات فیزیکی یا ساختاری در ماتریکس نمونه در اثر شرایط فشار - گرادیان ولتاژ خاص باشد. در فشار ۱۰۰ kPa، روند مشابهی مشاهده شد؛ مقدار IC_{50} ابتدا با افزایش گرادیان ولتاژ تا ۲۰ V/cm به ۳۳/۸۳٪ رسید و سپس با افزایش بیشتر ولتاژ به ۳۰ V/cm به ۲۸/۳۷٪ کاهش یافت. از سوی دیگر، با مقایسه مقادیر IC_{50} در گرادیان ولتاژ ثابت، مشاهده شد که فشار نیز تأثیر مهمی در فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌های تغلیظ شده دارد. در گرادیان ولتاژ ۱۰ V/cm، کمترین مقدار IC_{50} در فشار ۵۰ kPa (۱۹/۸۴٪) به دست آمد که پایین‌تر از مقدار IC_{50} نمونه‌های تازه و نشان‌دهنده بهبود فعالیت آنتی‌اکسیدانی بود. در این شرایط به نظر 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 ۵۰ kPa و گرادیان ولتاژ ۱۰ V/cm حاصل می‌شود. مقادیر بالاتر گرادیان ولتاژ و فشار، به دلیل تولید گرمای بیش از حد یا اثرات تخریبی فیزیکی، می‌توانند موجب کاهش کارایی آنتی‌اکسیدانی شوند [۱۰].

می‌گردد تا تخریب پارامترهای شیمیایی مانند آنتی‌اکسیدان‌ها، ویتامین‌ها و ترکیبات فنولی با نرخ کمتری انجام پذیرد. این در حالی است که در فشار اعمالی ۷۵ kPa با افزایش گرادیان ولتاژ از ۱۰ به ۲۰ V/cm محتوای فنول کل افزایش و سپس با افزایش بیشتر گرادیان ولتاژ از ۲۰ به ۳۰ V/cm محتوای فنول کل نمونه‌ها کاهش یافته است. بیشترین محتوای فنولی کل برابر با ۸۵۷ mg GAE/100 ml تحت شرایط گرمایش ۳۰ V/cm و ۵۰ kPa به دست آمد. محتوای فنول کل آب انگور تازه برابر با ۳۷/۷۵ mg GAE/100mL $\pm$ ۵۸۲/۳۸ به دست آمد. در مقایسه ویژگی‌های ترکیبات فنولی کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی بین نمونه‌های تیمار شده و نمونه تازه، باید در نظر داشت که نمونه تازه دارای محتوای رطوبت بالاتری نسبت به نمونه‌های تیمار شده 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 و قابل اندازه‌گیری می‌گردند، حتی زمانی که تفاوت‌های رطوبتی بین نمونه‌ها نرمال‌سازی شده باشند [۱۵].

۷.۳. خاصیت آنتی‌اکسیدانی

تأثیر فشار و گرادیان ولتاژ بر مقادیر IC_{50} ، به عنوان شاخصی از فعالیت آنتی‌اکسیدانی آب انگور سیاه تغلیظ‌شده به روش حرارت‌دهی اهمی-خلأ، در شکل (۹) نشان داده شده است. مقدار IC_{50} برای نمونه‌های تازه آب انگور سیاه پیش از فرایند تغلیظ، ۲۴٪ اندازه‌گیری شد. نتایج نشان دادند که گرادیان ولتاژ و فشار به‌طور معناداری بر IC_{50} نهایی تأثیر می‌گذارند و تعامل بین این دو متغیر نقش مهمی در حفظ یا کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی دارد. کاهش IC_{50} به معنای بهبود فعالیت آنتی‌اکسیدانی است، بنابراین روند



شکل (۹). اثر فشار و گرادیان ولتاژ بر فعالیت آنتی اکسیدانی نمونه های تغلیظ آب انگور به روش گرمایش اهمی -خلأ
Fig 9. Pressure and voltage gradient effects on antioxidant activity (IC_{50}) in ohmic-vacuum concentrated grape juice

۴. نتیجه گیری

دست آمد. این یافته ها نشان می دهد که بهینه سازی فرآیند تغلیظ با انتخاب سطوح مناسب فشار و ولتاژ می تواند تعادل مؤثری بین کارایی انرژی و کیفیت محصول ایجاد کند. تحقیقات آینده باید به بررسی مقیاس پذیری این فناوری بپردازد و هدف آن افزایش صرفه جویی در انرژی در حالی که استانداردهای کیفیت بالا حفظ می شود، باشد. این رویکرد می تواند به طور قابل توجهی به صنعت کمک کند و راه حل های پایداری برای تغلیظ آب میوه 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 علمی و فناوریانه اعلام می دارند. هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

نتایج حاصل از فرایند تغلیظ آب انگور سیاه در یک سامانه ترکیبی گرمایش اهمی -خلأ نشان داد که زمان فرآوری در تمامی سطوح فشار با افزایش گرادیان ولتاژ از ۱۰ به ۳۰ V/cm به طور معنی داری 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 فنول ها و فعالیت آنتی اکسیدانی کمک می کند، در حالی که فشار پایین (۵۰ kPa) بهترین شرایط برای حفظ کیفیت و فعالیت آنتی اکسیدانی را فراهم می کند. افزایش ولتاژ از ۱۰ به ۲۰ V/cm منجر به افزایش محتوای فنول کل و کاهش IC_{50} (بهبود فعالیت آنتی اکسیدانی) شد، اما ولتاژ بالاتر از ۲۰ V/cm تأثیر منفی داشت. بالاترین محتوای فنول کل (857 mg GAE/100 ml) و بهترین فعالیت آنتی اکسیدانی در فشار ۵۰ kPa و گرادیان ولتاژ ۱۰ V/cm به

- [1] Cosme, F., Pinto, T., & Vilela, A. (2018). Phenolic compounds and antioxidant activity in grape juices: A chemical and sensory view. *Beverages*, 4(1), 22.
<https://doi.org/10.3390/beverages4010022>
- [2] Tavares, H.M., Tessaro, I.C., & Cardozo, N.S.M. (2022). Concentration of grape juice: Combined forward osmosis/evaporation versus conventional evaporation. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 75, 102905.
<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102905>
- [3] Hosainpour, A., Darvishi, H., Nargesi, F., & Fadavi, A. (2014). Ohmic pre-drying of tomato paste. *Food Sci. Technol. Int.*, (3), 193-204.
<https://doi.org/10.1177/1082013213480360>
- [4] Darvishi, H., Hosainpour, A., Nargesi, F., & Fadavi, A. (2015). Exergy and energy analyses of liquid food in an Ohmic heating process: A case study of tomato production. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 31, 73-82.
<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.06.012>
- [5] Varghese, K. S., Pandey, M. C., Radhakrishna, K., & Bawa, A. (2014). Technology, applications and modelling of ohmic heating: A review. *J. Food Sci. Technol.*, 51, 2304-2317.
<https://doi.org/10.1007/s13197-012-0710-3>
- [6] Yildiz, H., Icier, F., & Baysal, T. (2010). Changes in β -carotene, chlorophyll and color of spinach puree during ohmic heating. *J. Food Process. Eng.*, 33, 763-779.
<https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00303.x>
- [7] Kaur, N., & Singh, A.K. (2016). Ohmic heating: Concept and applications—a review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 56(14), 2338-2351.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2013.835303>
- [8] 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.
<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.03.004>
- [9] Hwang, J.H., Jung, A.H., & Park, S.H. (2022). Efficacy of ohmic vacuum concentration for orange juice concentrates and their physicochemical properties under different voltage gradients. *LWT*, 154, 112750.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112750>
- [10] Darvishi, H., Mohammadi, P., Fadavi, A., Saba, M.K., & Behrooz-Khazaei, N. (2019). Quality preservation of orange concentrate by using hybrid ohmic-vacuum heating. *Food Chem.*, 289, 292-298.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.043>
- [11] Alkanan, Z.T., Altemimi, A.B., Al-Hilphy, A.R., Cacciola, F., & Ibrahim, S.A. (2021). Application and effects of ohmic-vacuum combination heating on the quality factors of tomato paste. *Foods*, 10(12), 2920.
<https://doi.org/10.3390/foods10122920>
- [12] Sakr, M., & Liu, S. (2014). A comprehensive review on applications of ohmic heating (OH). *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 39, 262-269.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.061>
- [13] Cevik, M. (2021). Electrical conductivity and performance evaluation of verjuice concentration process using ohmic heating method. *J. Food Process. Eng.*, 44(5), e13672.
<https://doi.org/10.1111/jfpe.13672>
- [14] 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. *J. Food Eng.*, 207, 1-9.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.03.015>
- [15] Darvishi, H., Behrooz-Khazaei, N., Koushesh Saba, M., Alimohammadi, Z., & Nourbakhsh, H. (2021). The influence of ohmic-vacuum heating on phenol, ascorbic acid and engineering factors of kiwifruit juice concentration process. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 56(9), 4789-4798.
<https://doi.org/10.1111/ijfs.15160>
- [16] Sabanci, S., & Icier, F. (2017). Applicability of ohmic heating assisted vacuum evaporation for concentration of sour cherry juice. *J. Food Eng.*, 212, 262-270.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.004>
- [17] Bozkurt, H., & Icier, F. (2010). Exergetic performance analysis of ohmic cooking process. *J. Food Eng.*, 100(4), 688-695.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.05.020>
- [18] Mohammadi, P., Amiri Chayjan, R., & 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. *Innov. Food Technol.*, 12(2), 192-211.
<https://doi.org/10.22104/ift.2025.7466.2204>
- [19] Sánchez-Moreno, C., Larrauri, J.A., & Saura-Calixto, F. (1999). A procedure to measure the antiradical efficiency of polyphenols. *J. Sci. Food Agric.*, 76, 270-276.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199802\)76:2<270::AID-JSFA945>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199802)76:2<270::AID-JSFA945>3.0.CO;2-9)

- [20] Sabanci, S., & Icier, F. (2022). Evaluation of an ohmic assisted vacuum evaporation process for orange juice pulp. *Food Bioprod. Process.*, 131, 156–163.
<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.09.009>
- [21] Darvishi, H., Koushesh Saba, M., Behrooz-Khazaei, N., & Nourbakhsh, H. (2020). Improving quality and quantity attributes of grape juice concentrate (molasses) using ohmic heating. *J. Food Sci. Technol.*, 57, 1362–1370.
<https://doi.org/10.1007/s13197-019-04170-1>
- [22] Hameed, A., Maan, A.A., Khan, M.K.I., Mahmood Khan, I., Niazi, S., Waheed Iqbal, M., Riaz, T., Manzoor, M.F., & Abdalla, M. (2023). Evaporation kinetics and quality attributes of grape juice concentrate as affected by microwave and vacuum processing. *Int. J. Food Prop.*, 26(1), 1596–1611.
<https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2218062>
- [23] Dinçer, C., Çam, İ.B., Torun, M., Gülmez, H.B., & Topuz, A. (2019). Mathematical modeling of concentrations of grape, pomegranate and black carrot juices by various methods. *Gıda*, 44(6), 1092–1105.
<https://doi.org/10.15237/gida.GD19080>
- [24] Sabanci, S., & Icier, F. (2020). Enhancement of the performance of sour cherry juice concentration process in vacuum evaporator by assisting ohmic heating source. *Food Bioprod. Process.*, 122, 269–279.
<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.05.004>
- [25] Samaranayake, P., & Sastry, S.K. (2005). Electrode and pH effects on electrochemical reactions during ohmic heating. *J. Electroanal. Chem.*, 577, 125135.
<https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2004.11.026>
- [26] Assiry, A.M., Gaily, M.H., Alsamee, M., & Sarifudin, A. (2010). Electrical conductivity of seawater during ohmic heating. *Desalination*, 260(1–3), 9–17.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.015>
- [27] Kaur, R., Gul, K., & Singh, A.K. (2016). Nutritional impact of ohmic heating on fruits and vegetables—A review. *Cogent Food Agric.*, 2(1), 1159000.
<https://doi.org/10.1080/23311932.2016.1159000>
- [28] Pataro, G., Barca, G.M., Pereira, R.N., Vicente, A.A., Teixeira, J.A., & Ferrari, G. (2014). Quantification of metal release from stainless steel electrodes during conventional and pulsed ohmic heating. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 21, 66–73.
<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.11.009>
- [29] Darvishi, H., Khoshtaghza, M.H., & Najafi, G. (2013). Ohmic heating of pomegranate juice: Electrical conductivity and pH change. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, 12, 101–108.
<https://doi.org/10.1016/j.jssas.2012.08.003>
- [30] Khairiyah, S., Sinaga, S.M., & De Putra, E. (2022). Determination of vitamin C and antioxidant activity in fresh red guava (*Psidium guajava* L.) and red guava commercial fruit juices. *Int. J. Sci. Technol. Manag.*, 3(4), 880–883.
[DOI: 10.46729/ijstm.v3i4.543](https://doi.org/10.46729/ijstm.v3i4.543)
- [31] Barrón-García, O.Y., Morales-Sánchez, E., Jiménez, A.R., Antunes-Ricardo, M., Luzardo-Ocampo, I., González-Jasso, E., & Gaytán-Martínez, M. (2022). Phenolic compounds profile and antioxidant capacity of ‘Ataulfo’ mango pulp processed by ohmic heating at moderate electric field strength. *Food. Res. Int.* 154, 111032.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111032>

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

Nazila Zandi¹, Jalal Khodaei², Hosain Darvishi^{*2}, Nasser Behrooz-Khazaei², Mahmoud Koushesh Saba³

1. Master's student, Department of Biosystems Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Kurdistan, Iran
2. Department of Biosystems Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Kurdistan, Iran
3. Department of Horticultural Science, University of Kurdistan, Sanandaj, Kurdistan, Iran

(Received: 1 May 2025, Received in revised form: 26 May 2025, Accepted: 31 May 2025)

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 ± 0.5 °Brix using a refractometer. The experimental setup consisted of a Pyrex ohmic chamber (10×10×15 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 ($\pm 0.1^\circ\text{C}$). Specific energy consumption (SEC, MJ/kg water) was calculated by combining the energy inputs from both the ohmic heating system and the vacuum pump. 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_{50} at 517 nm). All experiments were triplicated, with data analyzed via ANOVA and Duncan's test (SPSS v18, $p < 0.05$).

Results and discussion: 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°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

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

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*

How to cite this article:

Zandi,N., Khodaei,J & Darvishi, H.(2025). Nasser Behrooz-Khazaei, Mahmoud Koushesh Saba, Black Grape Juice Concentration via Ohmic-Vacuum Hybrid Heating: Quality Parameters, Energy Consumption and Exergy Efficiency, *Innovative Food Technologies*, 12(4), 321-337
doi: <https://doi.org/10.22104/ift.2025.7587.2212>