

مقاله پژوهشی

بررسی اثرات نوع الکتروود و گرادیان ولتاژ بر تغلیظ آب انگور به روش گرمایش اهمی

مهدی شفیعی^۱، مهدی خجسته‌پور^{۲*}، محمدحسین آق‌خانی^۳، مهدی ترکیان بلداجی^۴

۱. دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲. استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳. استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴. استادیار گروه مکانیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ورامین پیشوا، ورامین، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۸/۷/۷، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۸/۱۰/۱۳، تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۲/۹)

چکیده

گرمایش اهمی، فرآیندی گرمایشی است که با عبور جریان الکتریسته متناوب از داخل ماده غذایی ایجاد گرما می‌کند. در این تحقیق، اثر گرادیان ولتاژ (۱۰، ۱۴، ۱۸ و ۲۲۷/cm) و نوع الکتروود (فولاد زنگ‌نزن، آلومینیوم و برنجی) در فرآیند تغلیظ آب انگور به کمک سامانه گرمایش اهمی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که گرایان ولتاژ و نوع الکتروود بر روی مدت‌زمان گرمایش، انرژی مصرفی و همچنین عملکرد سامانه گرمایش تأثیر معنی‌دار دارد ($p < 0.01$). با افزایش گرادیان ولتاژ در هر سه نوع الکتروود، مدت‌زمان گرمایش و انرژی مصرفی کاهش، ولی عملکرد سامانه افزایش یافت. در همه الکتروودها و در همه گرادیان‌های ولتاژی، با گذشت زمان در طول گرمایش اهمی، هدایت الکتریکی از مقدار اولیه افزایش یافت؛ هرچند با افزایش گرادیان ولتاژ هدایت الکتریکی ماده غذایی کاهش می‌یابد. بهترین عملکرد سامانه گرمایش اهمی در الکتروود فولاد زنگ‌زن و در گرادیان ولتاژی ۲۲۷/cm برابر با ۸۵/۰۹٪ به‌دست آمد.

کلیدواژه‌ها: گرمایش اهمی، هدایت الکتریکی، هدایت گرمایی، آب‌انگور

* نویسنده مسئول: mkhpour@um.ac.ir

۱. مقدمه

اهمی، تأثیرگذار است [۱۱-۱۰]. علاوه بر آن، خواص الکتریکی مانند گرادیان میدان و ولتاژ نیز نقش مهمی را ایفا می‌کنند. مواد غذایی که شامل آب و یون‌های نمک فراوان هستند، برای به‌کارگیری گرمایش اهمی بسیار مناسب هستند [۱۲]. الکترودها در فرآیند گرمایش اهمی، به‌عنوان نقطه اتصال هادی‌های جامد و مایع، نقش اساسی را بر عهده دارند؛ همچنین بر انتقال یکنواخت جریان در محیط گرمایش نیز تأثیرگذار هستند. نوع الکترودها، می‌تواند هم بر روی کیفیت گرمایش، هم بر بازده سامانه اثر بگذارد [۱۳]. تأثیر نوع الکترودها در طول فرآیند گرمایش اهمی، در تحقیقی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که نوع الکترودها، بر راندمان حرارتی، انرژی مصرفی و مدت‌زمان فرآیند گرمایش اهمی مؤثر است [۱۴]. استانسول و همکاران نیز طی مطالعه‌ای دریافتند که در فرآیند گرمایش اهمی شیر، به‌کارگیری الکترودها فولادی، در مقایسه با الکترودها تیتانیوم، باعث کاهش قابل‌توجه انرژی مصرفی و مدت‌زمان گرمایش خواهد شد [۱۵].

آیسیر و ایلیکالی (۲۰۰۵) تأثیرات گرادیان ولتاژ، دما و غلظت را بر نرخ گرمایش اهمی آب پرتقال مورد بررسی قرار دادند و بین این پارامترها، به رابطه معنی‌داری رسیدند [۱۷-۱۶]. سارانگ و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی رسانایی الکتریکی میوه‌ها و گوشت‌ها در روش گرمایش اهمی پرداختند و بیان داشتند که گرادیان ولتاژ اثری معنی‌دار بر رسانایی الکتریکی دارد [۱۸]. همچنین آیسیر و ایلیکالی با استفاده از پنج گرادیان ولتاژ مختلف (۶۰-۲۰ V/cm)، گرمایش آب پرتقال را بررسی کردند و وابستگی هدایت الکتریکی به دما، گرادیان ولتاژ و غلظت اندازه‌گیری شد. آنها گزارش دادند که زمان گرمایش اهمی وابسته به گرادیان ولتاژ بوده و با افزایش گرادیان ولتاژ، زمان کاهش می‌یابد [۱۷]. تحقیقات مختلفی هم در مورد راندمان سامانه گرمایش اهمی انجام گرفته است؛ به‌عنوان مثال، راندمان حرارتی سامانه گرمایش اهمی در تحقیقی در سال ۲۰۰۳ مورد مطالعه قرار گرفت و مشخص شد که راندمان این سامانه در محدود ۰/۵۲ تا ۰/۹۲ است [۱۹].

در سال ۲۰۱۰، تحقیقی جهت به دست آوردن هدایت

درخت انگور با نام علمی *Vitis Vinifera* از خانواده انگورسانان است و یکی از محصولات باغی مهم در دنیا محسوب می‌شود و کشور ایران با تولید ۳۴۰،۸۶۶،۱ تن در سال، جزء ده کشور برتر دنیا در تولید این محصول است [۱]. یکی از روش‌های نگهداری میوه انگور، کاهش فعالیت آبی آن با تبدیل به کنسانتره انگور یا شیر انگور است. تغلیظ آب میوه علاوه بر کاهش فعالیت آبی و کندکردن رشد میکرو-ارگانیسم‌ها، باعث کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و افزایش مدت ماندگاری فرآورده می‌شود [۲]. پاستوریزاسیون آب‌میوه‌ها، به صورت دمای کم-زمان طولانی و دمای بالا-زمان کوتاه، یکی دیگر از روش‌های معمول برای نگهداری آب‌میوه‌ها است [۳]. در این گونه تیمارهای حرارتی، استفاده از زمان کوتاه و دمای بالای نتایج مطلوب‌تری نسبت به دمای کم و زمان‌های طولانی، ایجاد می‌کند [۴]؛ اما باید در نظر داشت که فرآیندهای حرارتی، انرژی بر هستند و بخش قابل‌توجهی از انرژی مورد نیاز در این فرآیندها از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود [۵]. استفاده از سوخت‌های فسیلی در فرآوری محصولات کشاورزی و تولیدات مواد غذایی علاوه بر هزینه‌بر بودن و راندمان پایین انرژی، آلودگی زیست‌محیطی را نیز به دنبال دارند؛ لذا نیاز به روش‌هایی جدید در عمل‌آوری محصولات کشاورزی، به نحوی که بتوان با حداقل مصرف انرژی بهترین کیفیت را به دست آورد ضروری است.

گرمایش اهمی، یکی از این روش‌ها است که با عبور جریان متناوب از میان ماده غذایی، منجر به تولید گرما می‌شود. این سامانه گرمایشی از لحاظ تولید گرما و انتقال حرارت و همچنین از لحاظ توزیع دما که در طول گرمایش اتفاق می‌افتد، با روش‌های مرسوم گرمایش متفاوت است [۸-۶]. مقدار گرمای تولیدشده در گرمایش اهمی به‌طور مستقیم به میزان مقاومت الکتریکی ماده و گرادیان ولتاژ اعمالی بستگی دارد [۵]. ماده غذایی که بین این دو الکترودها محصور شده است، به‌عنوان یک مقاومت الکتریکی رفتار می‌کند [۹]. پارامترهای مختلفی، از جمله نوع ماده غذایی، فازهای جامد و مایع، اندازه و شکل قطعات، میزان رطوبت، ویسکوزیته، pH، ظرفیت گرمایی و هدایت الکتریکی بر عملکرد گرمایش

میزان مصرف انرژی و همچنین عملکرد سامانه مورد بررسی قرار گرفته است تا بتوان یک سامانه کارآمد، برای فرآوری میوه انگور، به صورت شیره انگور یا پاستوریزاسیون آن طراحی کرد.

۲. مواد و روش انجام کار

۲.۱. انتخاب وارسته و تهیه آب انگور

برای تولید آب انگور تغلیظ شده از انگور رقم ریش‌بابا استفاده شد. این نوع رقم، دارای حبه‌های درشت آبدار، با پوستی ضخیم است. انگور مذکور، از تاکستان‌های شهر شیراز تهیه شد. بعد از تهیه انگور، حبه‌های آن از خوشه جدا و شست‌وشو داده شد. از خردکن (مدل Kenwood FPM270) جهت له کردن و خرد کردن حبه‌ها استفاده شد. حبه‌های له شده از صافی با مش 0.7mm عبور داده شد تا آب انگور زلال از پوست و تفاله‌ها جدا شود. آب انگور اولیه به دست آمده، در دمای 4°C نگه‌داری شد تا قابلیت استفاده در مراحل مختلف را دارا باشد.

۲.۲. سامانه گرمایش اهمی

این سامانه، عموماً شامل یک سلول اهمی، رگلاتور ولتاژ، ترمومتر، الکتروود، پاور آنالیزور و ترازو دیجیتالی است (شکل ۱). سلول اهمی که محل قرارگیری ماده غذایی برای گرمایش است، از جنس PTFE ساخته شد. طول مفید بدنه سلول اهمی $1.0/5\text{ cm}$ ، قطر داخلی 5 cm و قطر بیرونی آن 7 cm است. حجم داخلی سلول 206 cc محاسبه شد. در دو طرف سلول اهمی دو تویی قرار دارد که الکتروودها توسط آن‌ها در داخل بدنه سلول اهمی قرار می‌گیرند. در مرکز بدنه سلول اهمی نیز یک منفذ به قطر 4 mm قرار داده شده که ترموکوپل میله‌ای از آن عبور داده می‌شود تا دمای داخل سلول اندازه‌گیری شود.

الکتریکی آب‌انگور قرمز نیز انجام شد. سه نمونه از آب‌انگور قرمز با غلظت ۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۴/۵ درجه بریکس با استفاده از سه گرادیان‌ولتاژ مختلف (۱۰، ۱۲ و 15 V/cm) تحت تیمار قرار گرفتند. مشاهده شد که هدایت الکتریکی آب انگور قرمز به صورت خطی با افزایش ماده جامد محلول و درجه حرارت افزایش یافت [۱۲]. یاکوب و همکاران (۲۰۱۹) نیز سامانه گرمایش اهمی بر روی آناناس بررسی کردند که مشخص شد فرآیند گرمایش اهمی توزیع گرمای یکنواختی را در محیط مواد غذایی ایجاد می‌کند، همچنین ویژگی‌های الکتریکی مرتبط، مانند هدایت الکتریکی (σ) را نیز می‌توان مشخص کرد؛ با افزایش گرادیان‌ولتاژ و دما، غلظت آب میوه-ها به صورت معناداری افزایش می‌یابد [۲۰].

گرمایش اهمی ضمن مزایای فراوان، محدودیت‌هایی نیز دارد. محدودیت‌های گرمایش اهمیک در رابطه با مکانیزم‌های گرمایش الکتریکی است. یکی از محدودیت‌های مهم، این است که هر دستگاه تنها برای گروهی از محصولات که دارای ضریب هدایت الکتریکی مشابه هستند، طراحی می‌شود. از دیگر محدودیت‌های آن، می‌توان به هزینه اجرای ابتدایی بالا، نبود اطلاعات و روش‌های معتبر اشاره کرد [۲۱].

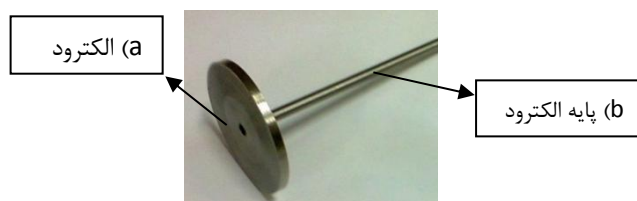
در ایران، شیره انگور، به‌عنوان یک محصول فرآوری شده میوه انگور، کاربرد غذایی فراوانی دارد و در طب سنتی هم دارویی خون‌ساز و همچنین ماده غذایی انرژی‌زا تلقی شده و همواره مورد توجه بوده است، ولی متأسفانه تولید این محصول، به صورت سنتی و با روش‌های هدایت حرارتی معمول صورت می‌گیرد که این امر، علاوه بر کاهش کیفیت محصول نهایی به شدت انرژی‌بر بوده و هزینه‌های تولید را افزایش می‌دهد؛ لذا استفاده از روش گرمایش اهمی برای فرآوری این محصول، می‌تواند به‌عنوان یک روش جایگزین مورد توجه قرار گیرد. از طرف دیگر، اثر نوع الکتروود بر عملکرد گرمایش اهمی، به‌خصوص بر کیفیت محصول نهایی تولیدشده، کمتر مورد توجه محققان بوده است؛ لذا در این تحقیق اثر نوع الکتروود و گرادیان‌ولتاژ بر زمان گرمایش و



شکل (۱) سامانه گرمایش اهمی به کار رفته در این تحقیق
Fig (1) Ohmic heating system.

شد که محل قرارگیری پایه الکتروود است. پایه الکتروود، عبارت است از میله‌ای به قطر ۳ mm و طول ۱۰ cm که در داخل منفذ الکتروود پیچ می‌شود. الکتروودها به کمک پایه الکتروود، در داخل توپی بسته شده و در داخل سلول قرار می‌گیرند.

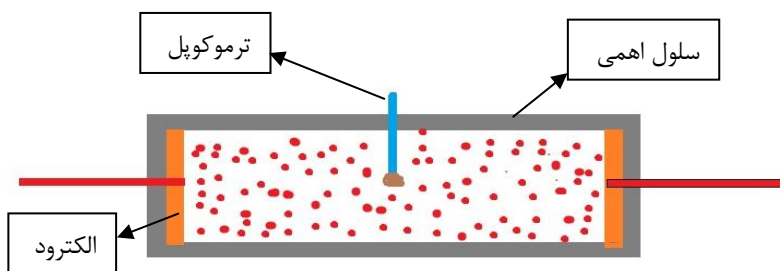
جنس الکتروودها در سامانه گرمایش اهمی بسیار مهم بوده و بر عملکرد تأثیر بسزایی خواهد داشت. مطابق مطابق شکل ۲، الکتروودها به صورت استوانه به ضخامت ۲/۵ mm و قطر ۴/۹ cm و از جنس‌های آلومینیوم، برنج و فولاد زنگ‌نزن ساخته شدند. وسط الکتروودها، منفذی به قطر ۳ mm ایجاد



شکل (۲) نمونه‌ای از الکتروود (a) الکتروود (b) پایه الکتروود
Fig (2) Sample of Electrode: a) Electrode b) Rod of Electrode.

ترموکوپل PT100 در مرکز سلول واقع و به ترمومتر متصل شد (شکل ۳).

برای اندازه‌گیری پروفایل دمایی در سلول گرمایش اهمی، ترمومتر مدل Dual input RTD 804U (ساخت کشور تایلند) با قابلیت اتصال به درگاه کامپیوتر به کار رفت.



شکل (۳) نحوه قرار گرفتن الکتروودها و ترموکوپل در داخل سلول اهمی
Fig (3) Layout of Electrode and thermocouple in Ohmic Cell

حسب متر (m)، A: مساحت مقطع مؤثر الکتروود (m²). با توجه به معادله (۴)، می‌توان توان الکتریکی مصرف‌شده در یک مقاومت الکتریکی را محاسبه کرد:

$$P = RI^2 = \frac{V^2}{R} = VI \quad \text{معادله (۴)}$$

V: ولتاژ بر حسب (V)، I: آمپراژ بر حسب (A)، P: توان الکتریکی (W). با محاسبه توان مصرفی و به کمک معادله (۵) مقدار انرژی مصرفی (E) به دست می‌آید.

$$E = Pt = RI^2 t = \frac{V}{R} t = VIt \quad \text{معادله (۵)}$$

از طرف دیگر، انرژی داده شده به سامانه، طبق رابطه ارائه شده توسط آیسیر و همکاران که در سال ۲۰۰۵ مطرح شد، در قالب معادله (۶) و (۷) محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$E_{\text{given}} = E_{\text{taken}} - E_{\text{loss}} \quad \text{معادله (۶)}$$

$$\sum(VIt) = mc_p(T_f - T_i) + E_{\text{loss}} \quad \text{معادله (۷)}$$

در این روابط E_{given}: انرژی داده‌شده به سامانه، E_{taken}: انرژی جذب‌شده توسط سامانه، E_{loss}: انرژی اتلافی یا از دست‌رفته در سامانه، t: زمان (s)، m: جرم آب موجود (kg)، c_p: ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)، T_f: دمای نهایی نمونه (°C) و بالاخره T_i: دمای اولیه نمونه (°C) است. انرژی مصرفی ویژه که همان انرژی لازم برای خشک کردن یک کیلوگرم از محصول است، به کمک معادله (۸) محاسبه می‌شود [23]:

$$E_{\text{sc}} = \frac{E_c}{m_w} \quad \text{معادله (۸)}$$

E_c: انرژی مصرفی (w.h)، m_w: جرم آب بخار شده از محصول (kg) و E_{sc}: انرژی مصرفی ویژه (w.h/kg water) است. همچنین میزان گرمای تولیدشده در داخل ماده غذایی را می‌توان از معادله (۹) به دست آورد:

$$\dot{u} = \sigma \times \nabla V^2 \quad \text{معادله (۹)}$$

u: انرژی گرمایی تولیدشده (J)، σ: هدایت الکتریکی (S/m) ∇V: گرادیان ولتاژ (V/cm). انرژی اتلافی سامانه، مجموع انرژی لازم برای افزایش دمای سلول، انرژی اتلافی به محیط از طریق جابجایی و انرژی مصرفی برای تغییرات الکتروشیمیایی را شامل می‌شود. انرژی اتلافی که از طریق

به منظور تبدیل ولتاژ به ولتاژهای مورد نیاز، از دستگاه رگولاتور ولتاژ (ساخت شرکت امرسان ایران) و برای ثبت داده‌هایی مانند آمپراژ، ولتاژ، توان مصرفی و اختلاف فاز، از دستگاه پاورآنالایزر ساخت شرکت تکاک ایران استفاده شد. یک ترازوی دیجیتالی، مدل Sartorius BP110S با دقت ۰/۰۱ گرم برای ثبت تغییرات وزن در حین انجام روند گرمایشی به کار رفت. همچنین برای اندازه‌گیری بریکس از دستگاه رفاکتومتر مدل Atago 1211 NAR-1T استفاده شد.

اندازه‌گیری رطوبت اولیه آب انگور، به روش آون انجام شد و آون دیجیتالی ایران خودساز مدل OD.115 به کار رفت. اندازه‌گیری pH با دستگاه pH متر مدل HANNA-HI pH-211 انجام شد. ولتاژهای ۱۰۵، ۱۴۷، ۱۸۹ و ۲۳۱ ولت به سلول اعمال شد که با توجه به رابطه (۱) و فاصله ۱۰/۵cm بین دو الکتروود گرادیان ولتاژهای اعمالی ۱۰، ۱۴، ۱۸ و ۲۲v/cm به دست آمد.

$$\nabla V = \frac{V}{L} \quad \text{رابطه (۱)}$$

∇V: گرادیان ولتاژ بر حسب (v/cm)، V: ولتاژ بر حسب (V)، L: فاصله بین الکتروودها بر حسب (cm).

۲.۳. محاسبات

برای اندازه‌گیری چگالی از پیکنومتر استفاده شد. با محاسبه چگالی آب انگور و در دست‌داشتن فاصله بین الکتروودها و جرم آب انگوری که در داخل سلول ریخته می‌شود، سطح مؤثر الکتروود از رابطه (۲) محاسبه شد [۲۲]:

$$A = \frac{m}{\rho L} \quad \text{رابطه (۲)}$$

A: سطح مقطع مؤثر (m²)، ρ: چگالی پوره (kg/m³)، L: فاصله بین الکتروودها (m) و m: جرم آب انگور (kg). به کمک معادله (۳) هدایت الکتریکی مواد غذایی از روابط بین ولتاژ و جریان به دست می‌آید که معکوس مقاومت ویژه رسانا است [۱۶، ۶]:

$$\sigma = \frac{LI}{VA} \quad \text{رابطه (۳)}$$

σ: هدایت الکتریکی (S/m)، V: ولتاژ بر حسب ولت (V)، I: شدت جریان بر حسب آمپر (A)، L: فاصله بین الکتروود بر

$$\frac{\lambda_{wp}}{\lambda_w} = 1 + 23\exp(-0.4M) \quad \text{معادله (۱۳)}$$

آزمایش‌های فاکتوریل تغلیظ آب‌انگور در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در سه تکرار صورت گرفت. در این طرح، سه نوع الکتروود و چهار گرادیان ولتاژ مختلف به‌عنوان متغیرهای مستقل و پارامترهایی نظیر مدت‌زمان فرآیند، انرژی مصرفی، انرژی مصرفی ویژه و عملکرد به‌عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شدند. تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد و مقایسه میانگین‌ها از روش آزمون دانکن صورت گرفت. ۱۰۰ cc از آب انگور به‌دست آمده با درجه بریکس ۱۶، در داخل سلول اهمی ریخته‌شده و گرادیان‌های ولتاژی مختلف به آن اعمال شد تا زمانی که درجه بریکس به ۶۰ درجه افزایش یابد.

۳. بحث و نتیجه گیری

۳.۱. خواص فیزیکی اولیه آب انگور

خواص اولیه آب انگور اندازه‌گیری و در جدول ۱ نشان درج شد.

جدول (۱) خواص فیزیکی اولیه آب انگور

Table (1) Grape water physicochemical properties

چگالی اولیه Density (gr/cm ³)	pH	میزان رطوبت اولیه Moisture content (W.b)/%	ظرفیت گرمایی ویژه اولیه Specific heat capacity (KJ/kg.°C)	هدایت حرارتی اولیه Thermal conductivity (w/m.°C)	بریکس Brix
۱/۰۵	۴,۳۲	۹۰	۳,۴۵	۰,۲۷	۱۶
-	CV= % ۲/۶۱	-	-	-	CV= % ۳/۴۲

۳.۲. مدت‌زمان گرمایش و سرعت کاهش رطوبت
با توجه به جدول ۲، اثر متقابل گرادیان ولتاژ و نوع الکتروود اثر معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ بر روی مدت‌زمان کل فرآیند دارد.

جدول (۲) نتایج تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف گرادیان و نوع الکتروود بر زمان (ثانیه).

Table (2) Results of analysis of variance: The effect of different levels of gradient and type of electrode on time(s).

F	MS	SS	Df	
۶۷۹/۱۳**	۳۰۹۶/۸۳	۹۲۹۰/۴۹۸۴	۳	گرادیان
۵۵۴/۱۰**	۲۵۲۶/۶۹۶	۵۰۵۳/۳۹۲	۲	الکتروود
۳۹۲/۰۷**	۱۷۸۷/۸۳	۱۰۷۲۷/۰۳۵	۶	گرادیان×الکتروود
-	۴/۵۶	۱۰۹/۴۴	۲۴	خطا

**وجود اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪

CV= % ۲/۶۶

بدنه سلول به محیط داده می‌شود، از معادله (۱۰) به‌دست می‌آید:

$$Q_c = \bar{h}(\pi DL)(\bar{T}_w - T_{amb})\Delta t \quad \text{معادله (۱۰)}$$

Q_c : انرژی اتلافی از طریق سلول (J)، D: قطر خارجی بدنه سلول (m)، \bar{h} : متوسط ضریب انتقال حرارتی از طریق جابه جایی (W/m².K)، T_{amb} : دمای محیط (°C)، \bar{T}_w : متوسط دمای دیواره سلول (°C). ضریب کارایی سامانه برابر نسبت انرژی گرفته‌شده توسط سامانه به انرژی داده شده و از روابط (۱۱ و ۱۲) محاسبه می‌شود [۱۶-۱۷]:

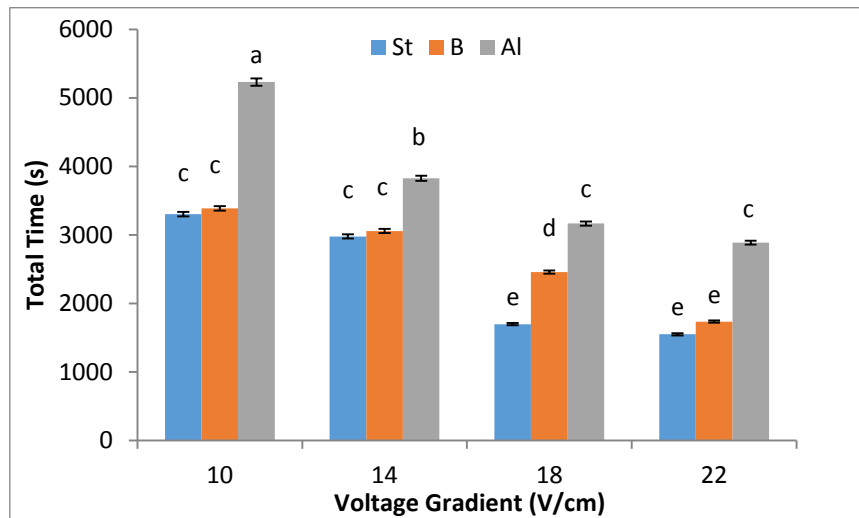
$$Q_t = m_p c_p (T_2 - T_1) + m_w \lambda_{wp} \quad \text{معادله (۱۱)}$$

Q_t : انرژی گرفته‌شده توسط سامانه (J)، m_p : جرم آب ماده غذایی اولیه (kg)، C_p : ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.°C)، T_2 : دمای نهایی (°C)، T_1 : گرمای اولیه (°C)، m_w : وزن آب تبخیر شده (kg).

$$SPC = \frac{Q_t}{E_g} \quad \text{معادله (۱۲)}$$

SPC: عملکرد سامانه، E_g : گرمای داده‌شده به سامانه (J)، λ_{wp} : گرمای نهان تبخیر محصول بوده و از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود [۲۴-۲۵]:

در شکل ۴، مقایسه میانگین تأثیر متقابل گرادیان ولتاژ و نوع الکتروود بر مدت زمان گرمایش نشان داده شده است.

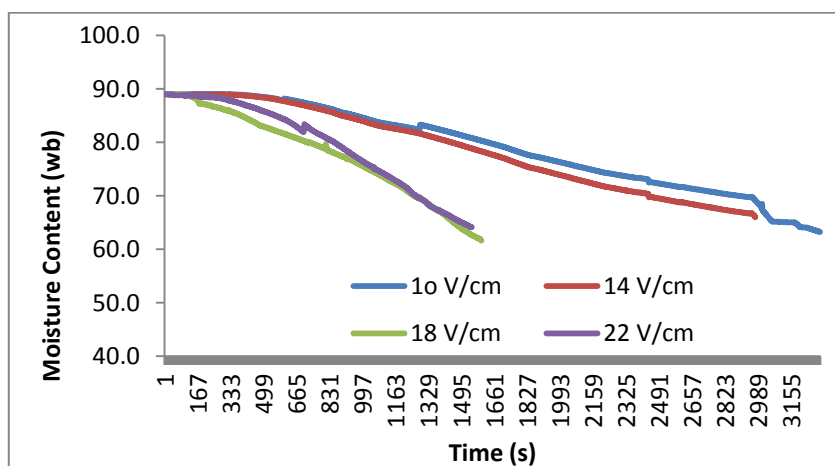


شکل (۴) مقایسه میانگین تأثیر متقابل سطوح مختلف گرادیان و نوع الکتروود بر زمان (ثانیه).

Fig (4) Comparison of mean interaction of different gradient levels and type of electrode on time (s).

بر پایه تر از ۸۹٪ به ۶۱٪ رسانده شد. همان طور که از نمودار مشخص است، سرعت کاهش رطوبت با افزایش گرادیان ولتاژ افزایش می‌یابد.

در شکل ۵ نیز درصد رطوبت آب‌انگور، طی فرآیند گرمایش اهمی برای الکتروود فولاد زنگ‌نزن در گرادیان ولتاژهای مختلف نشان داده شده است (در سایر الکتروودها روند تغییرات درصد رطوبت مشابه است). رطوبت اولیه آب انگور



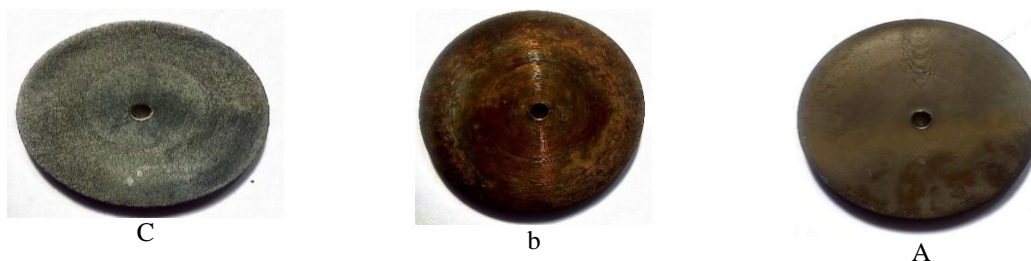
شکل (۵) درصد رطوبت آب انگور در الکتروود فولاد زنگ‌نزن در گرادیان‌های ولتاژی مختلف.

Fig (5) The moisture content of grape juice in stainless steel electrodes at different voltage gradients.

زمان فرآیند در الکتروود فولاد زنگ‌نزن ۱/۵ برابر کمتر از الکتروود آلومینیوم است. یکی از دلایل آن را می‌توان در شکل ۶ که الکتروودها را بعد از اتمام فرآیند در گرادیان‌ولتاژ ۱۰ V/cm نشان می‌دهد، جست‌وجو کرد. می‌بینیم که در الکتروود آلومینیومی، نسبت به بقیه الکتروودها، ماده غذایی روی آن رسوب بیشتری می‌کند و علاوه بر این، سطح الکتروود به صورت متخلخل در می‌آید. با رسوب ماده غذایی بر روی الکتروود، انتقال الکتریسته به ماده غذایی کاهش می‌یابد؛ لذا میزان تولید انرژی در داخل ماده غذایی پایین آمده و به تبع آن مدت‌زمان انجام فرآیند افزایش می‌یابد.

با افزایش گرادیان‌ولتاژ، شدت تولید انرژی گرمایی در داخل ماده غذایی افزایش می‌یابد؛ لذا آب با شدت بیشتری تبخیر می‌شود و در نتیجه آن مدت‌زمان کل فرآیند کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه (۹) میزان تولید انرژی گرمایی در داخل ماده غذایی با توان دوم گرادیان‌ولتاژ رابطه مستقیم دارد. با افزایش گرمای تولیدشده در داخل ماده غذایی تبخیر آب سریع‌تر رخ داده؛ لذا مدت‌زمان کل فرآیند کاهش می‌یابد. درویشی و همکاران، ترکیان و همکاران و کاسترو و همکاران نیز گزارش کردند که با افزایش گرادیان‌ولتاژ مدت‌زمان انجام فرآیند کاهش می‌یابد [۶، ۲۶، ۲۷].

شایان ذکر است که نوع الکتروود اثر معنی‌داری بر مدت کل فرآیند دارد؛ به‌عنوان مثال، در گرادیان‌ولتاژ ۱۰ V/cm مدت



شکل (۶) الکتروودهای به کار رفته بعد از اتمام فرآیند در گرادیان‌ولتاژ ۱۰ V/cm:

(a) الکتروود فولادی (b) الکتروود برنجی (c) الکتروود آلومینیومی.

Fig (6) Type of electrodes used in this study, after process in 10V/cm: a) Stainless steel electrode b) Brass electrode c) Aluminum electrode.

۳.۳. انرژی مصرفی و انرژی مصرفی ویژه

با اندازه‌گیری آمپر و ولتاژ و به کمک روابط (۴) الی (۸)، انرژی مصرفی و انرژی مصرفی ویژه محاسبه شد. با توجه به جدول ۳ تجزیه واریانس اثر متقابل الکتروود و گرادیان‌ولتاژ بر میزان انرژی مصرفی در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار است.

گیانپیر و همکاران بیان کردند که نوع الکتروود در گرمایش اهمی بستگی به خواص فیزیکی و شیمیایی ماده غذایی دارد و بر زمان گرمایش و همچنین انرژی مصرفی تأثیرگذار است [۲۸]. بنسال و همکاران نیز ابراز کردند، مشکلاتی همچون سوختگی مواد غذایی در اطراف الکتروود و کاهش رسانایی الکتروود، افزایش مدت‌زمان فرآیند را در پی دارد [۲۹].

جدول (۳) نتایج تجزیه واریانس تاثیر سطوح مختلف گرادیان و نوع الکتروود بر انرژی مصرفی (kJ).

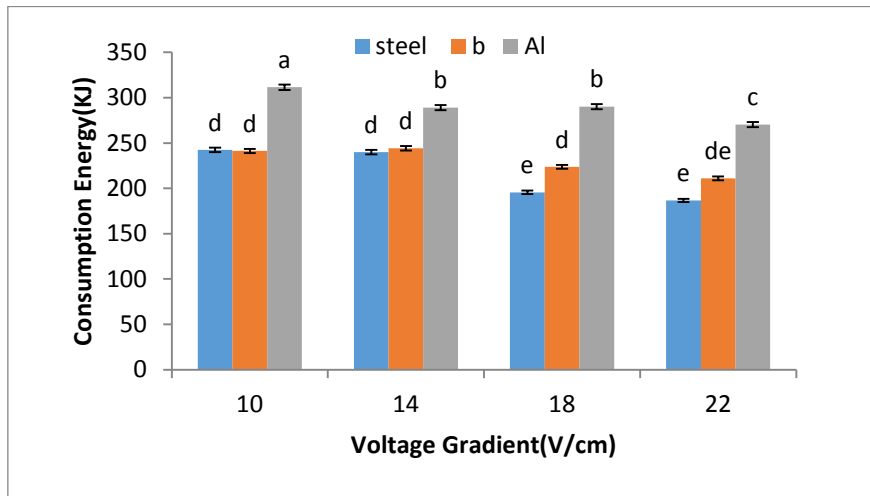
Table (3) Results of analysis of variance: The effect of different levels of gradient and type of electrode on Energy Consumption (kJ).

F	MS	SS	Df	
۳۸۶/۲۲**	۲۰۱۹/۹۳	۶۰۵۹/۷۹۱	۳	گرادیان
۲۴۵/۶۶**	۱۲۸۴/۸۰	۲۵۶۹/۶۰	۲	الکتروود
۱۸۰/۱۱**	۹۴۱/۹۷	۵۶۵۱/۸۵	۶	گرادیان × الکتروود
-	۵/۲۳	۱۲۵/۵۲	۲۴	خطا

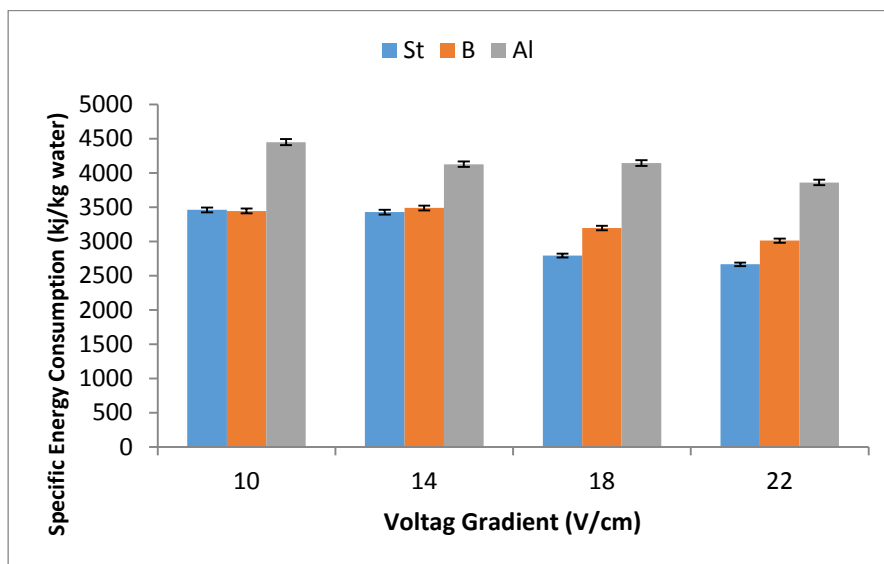
CV = % ۵/۲۲

** وجود اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪

در شکل‌های ۷ و ۸، مقایسه میانگین اثر گرادیان ولتاژ در نشان داده شده است: الکترودهای مختلف بر انرژی مصرفی و انرژی مصرفی ویژه



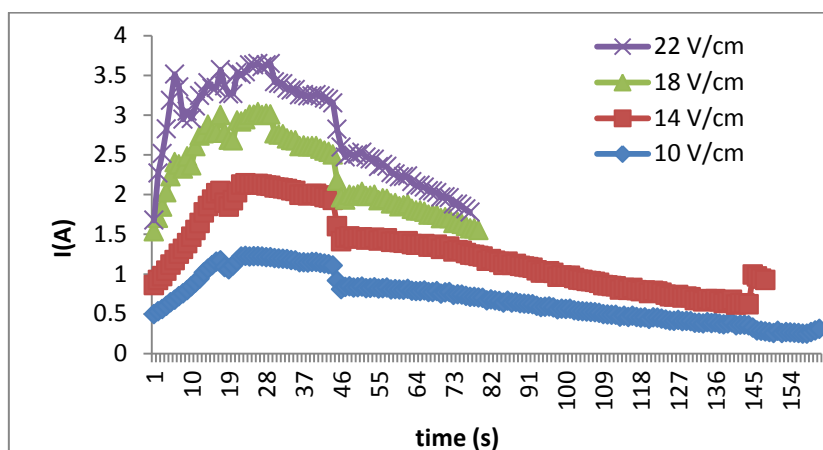
شکل (۷) مقایسه میانگین اثر گرادیان ولتاژ در الکترودهای مختلف بر انرژی مصرفی.
Fig (7) Effect of voltage gradient in different electrodes on energy consumption.



شکل (۸) مقایسه میانگین اثر گرادیان ولتاژ در الکترودهای مختلف بر انرژی مصرفی ویژه.
Fig (8) Effect of voltage gradient in different electrodes on Specific energy consumption

مشابه بود؛ اما همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، زمان انجام فرآیند با افزایش گرادیان ولتاژ از ۱۰V/cm به ۲۲V/cm نیز افزایش می‌یابد؛ در مجموع باید گفت، انرژی مصرف‌شده با افزایش گرادیان ولتاژ پایین می‌آید.

با توجه به رابطه (۴) و (۵)، علت این امر را می‌توان درک کرد. هرچند با توجه به شکل ۹، برای الکترود فولادی مقدار حداکثر آمپراژ مصرفی با افزایش گرادیان ولتاژ، افزایش می‌یابد (در سایر الکترودها روند تغییرات آمپراژ مصرفی



شکل (۹) آمپراژ مصرفی در الکترود فولاد زنگ‌زن در گرادیان‌های ولتاژی مختلف.

Fig (9) Consumption current intensity in stainless steel electrode in different voltage gradients.

مصرفی در سامانه گرمایش اهمی دارد و با افزایش گرادیان-ولتاژ، میزان انرژی مصرفی کاهش می‌یابد [۱۶، ۱۸، ۲۷]. همچنین ایسیس و همکاران و الحسین و همکاران نیز در مورد اثر معنی‌داری نوع الکترود بر روی انرژی مصرفی گزارش‌های مشابه دادند [۳۱، ۳۲].

۳.۴. عملکرد سامانه

با توجه به جدول ۴ اثر متقابل گرادیان‌ولتاژ و نوع الکترود در سطح احتمال ۱٪ بر روی عملکرد سامانه گرمایش اهمی معنی‌دار است.

از طرف دیگر، نوع الکترود نیز اثر معنی‌داری بر مصرف انرژی دارد به‌طوری‌که میزان مصرف انرژی در الکترود آلومینیوم و در گرادیان‌ولتاژی ۱۰ v/cm، نسبت به الکترود فولاد زنگ‌زن در همین گرادیان‌ولتاژی ۱/۲۲ برابر کاهش می‌یابد که این نشانگر اثر نوع الکترود بر انرژی مصرفی سامانه گرمایش اهمی است.

ایسیس و همکاران در اندازه‌گیری هدایت الکتریکی آب دریا به روش گرمایش اهمی، بیان داشتند که با افزایش گرادیان-ولتاژ انرژی مصرفی به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد [۳۰]. سانجای و همکاران، درویشی و همکاران و ایسیس و همکاران نیز بیان داشتند که گرادیان‌ولتاژ اثر معنی‌داری بر انرژی

جدول (۴) نتایج تجزیه واریانس تاثیر سطوح مختلف گرادیان و نوع الکترود بر عملکرد.

Table 4. Results of analysis of variance: The effect of different levels of gradient and type of electrode on the performance of system.

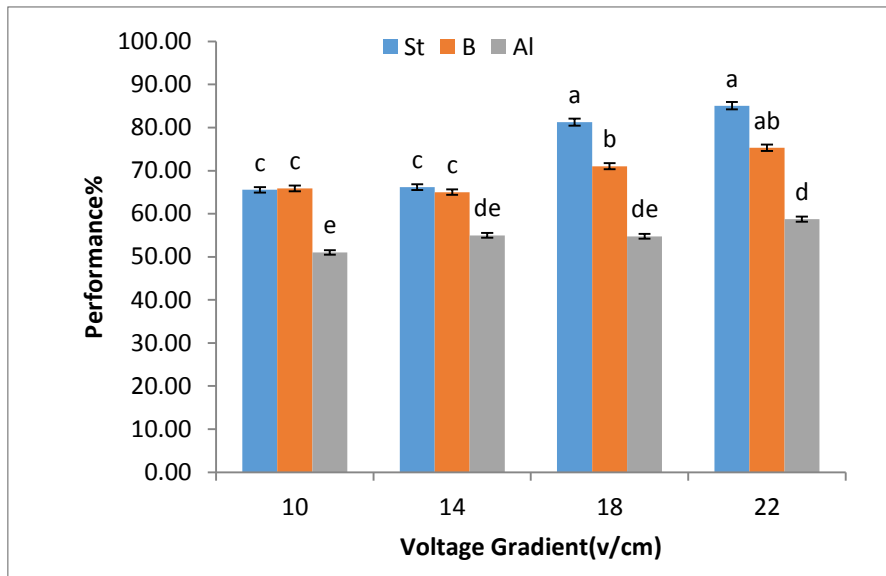
F	MS	SS	Df	
۱۵۶/۲۰**	۵۲۰/۱۴۶	۱۵۶۰/۴۳۸	۳	گرادیان
۹۰/۴۵**	۳۰۱/۱۹	۶۰۲/۳۹	۲	الکترود
۵۴/۳۵**	۱۸۰/۹۸	۱۰۸۵/۹۱	۶	گرادیان×الکترود
-	۳/۳۳	۷۹/۹۲	۲۴	خطا

CV= % ۵/۲۲

**وجود اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪

الکترودها با افزایش گرادیان‌ولتاژ عملکرد سامانه گرمایش اهمی بهبود می‌یابد.

مقایسه میانگین اثر گرادیان‌ولتاژ در الکترودهای مختلف بر روی عملکرد سامانه گرمایش اهمی، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است در تمامی



شکل (۱۰). مقایسه میانگین اثر گرادیان ولتاژ و نوع الکترود بر عملکرد سامانه گرمایش اهمی.

Fig (10) Comparison effect of voltage gradient and type of electrodes on the performance of system.

در کل زمان گرمایش اهمی و در مدت زمان افزایش دما تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد در گرادیان‌های ولتاژی مختلف برای الکترود فولاد زنگ‌نزن نشان داده شده است (برای سایر الکترودها نتایج مشابه به دست آمد). همان‌طور که از شکل‌ها پیداست در تمامی گرادیان‌های ولتاژی با افزایش دما، هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. همچنین در تمامی گرادیان‌های ولتاژی هدایت الکتریکی، روند افزایش تا انتهای فرآیند دارد. اگر معادلات (۲) تا (۵) را در نظر بگیریم می‌بینیم که هدایت الکتریکی با میزان چگالی و آمپراژ رابطه مستقیم و با ولتاژ اعمال‌شده و همچنین جرم ماده غذایی رابطه معکوس دارد. با گذشت زمان در فرآیند گرمایش اهمی چگالی به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد و از طرف دیگر، جرم نمونه به‌طور پیوسته کاهش نشان می‌دهد؛ هرچند آمپراژ مصرفی با توجه به شکل ۹ ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد، لذا با افزایش چگالی و کاهش جرم نمونه با گذشت زمان در طی فرآیند گرمایش اهمی، هدایت الکتریکی مدام رو به افزایش است.

با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که با افزایش گرادیان ولتاژ، هدایت الکتریکی نیز رو به کاهش است. با توجه به معادله (۵) و این‌که ولتاژ اعمال‌شده در مخرج معادله قرار دارد، می‌توان نتیجه گرفت که هدایت الکتریکی با افزایش

افزایش گرادیان ولتاژ و همچنین تغییر نوع الکترود باعث می‌شود که مدت‌زمان انجام فرآیند کاهش یابد، با کاهش مدت‌زمان انجام فرآیند میزان انرژی اتلافی که از طریق بدنه سلول اهمی به محیط منتقل می‌شود، کاهش می‌یابد؛ لذا عملکرد سامانه بهبود می‌یابد. علاوه‌براین رسوب ماده غذایی بر روی الکترود آلومینیومی باعث می‌شود که اتلاف انرژی بیشتری در خود الکترود رخ دهد.

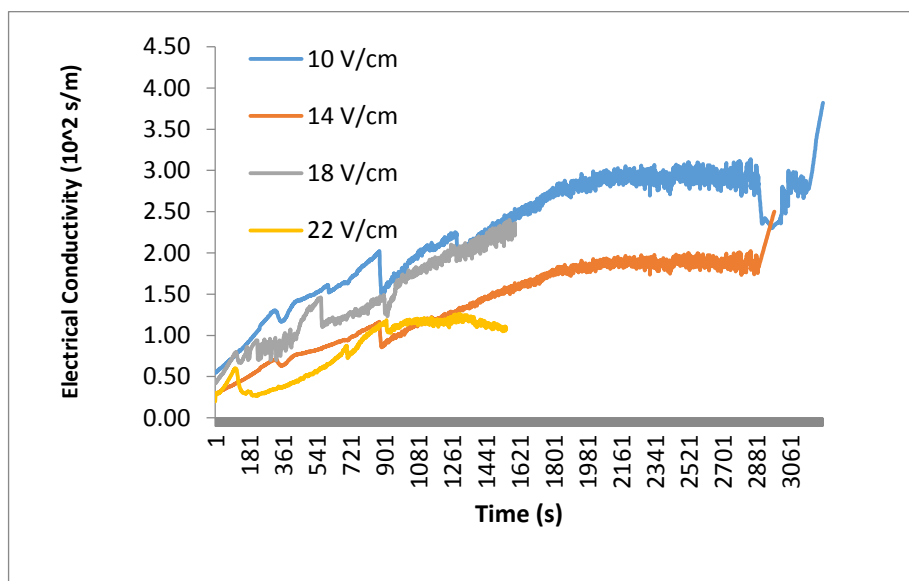
ایسیرو وایلیکالی گزارش کردند که ضریب کارایی برای پودر تیلوس^۱ و گوشت خردشده با افزایش گرادیان ولتاژ از ۱۰ تا ۵۰ V/cm افزایش یافت [۱۶]. هرچند درویشی و همکاران گزارش دادند که ضریب کارایی سامانه گرمایش اهمی برای آب‌لیمو در محدوده گرادیان ولتاژ ۳۰ تا ۵۵ V/cm کاهش پیدا می‌کند [۳۳]. ضریب عملکرد سامانه گرمایش اهمی توسعه‌یافته توسط کومار و همکاران (۲۰۱۸) برای پاستوریزاسیون آب انگور در محدوده ۰/۵۷-۰/۹۹ گزارش شد [۳۴].

۳.۵. هدایت الکتریکی

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، تغییرات هدایت الکتریکی آب‌انگور

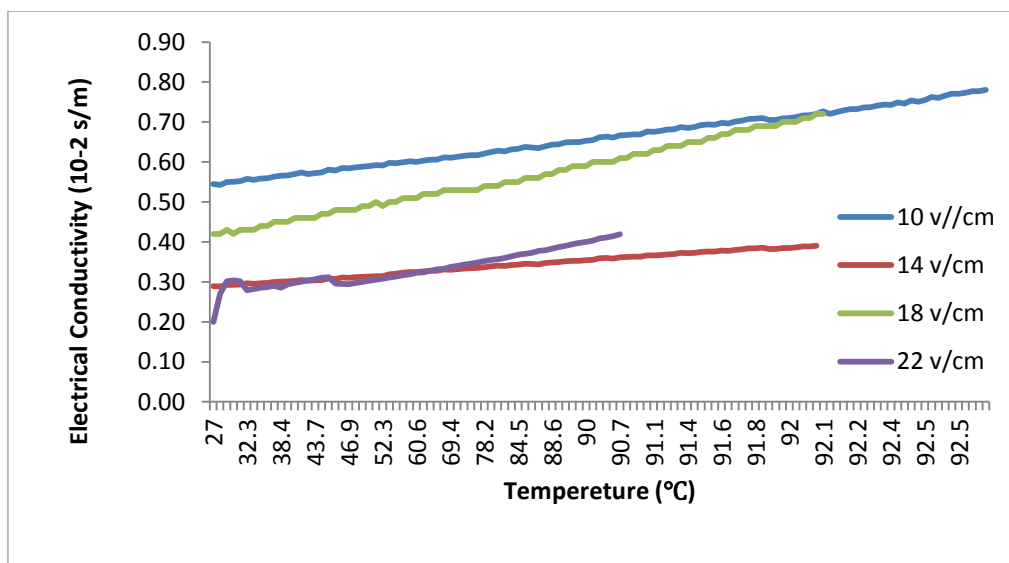
1. Tylose

ولتاژ اعمال شده کاهش می‌یابد.



شکل (۱۱) هدایت الکتریکی آب انگور در طی فرآیند گرمایش اهمی برای الکترود فولاد زنگ‌نزن.

Fig (11) Electrical conductivity grape juice during ohmic heating process for stainless steel electrodes.



شکل (۱۲) هدایت الکتریکی آب انگور در فاز افزایش دما تا ۹۰°C در الکترود فولاد زنگ‌نزن.

Fig (12) Electrical conductivity of grape juice in temperature rise up to 90°C in stainless steel electrode.

کمک سامانه گرمایش اهمی اندازه‌گیری کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش دما برای هر شش میوه، هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد [۱۸].

آسیری و همکاران بیان کردند که هدایت الکتریکی آب دریا نیز با افزایش دما افزایش می‌یابد، اما آنها بیان داشتند که با افزایش گرادیان ولتاژ هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد [۱۹]. سارانگ و همکاران هدایت الکتریکی شش میوه را به

آمد. بهترین راندمان نیز در الکتروود فولاد زنگ‌نزن و در گرادیان ولتاژی ۲۲۷/cm مشاهده شد؛ برابر با ۰.۸۵/۰۹٪ که عملکردی قابل قبول است. یکی از مشکلاتی که در این تحقیق گزارش شد، رسوب ماده غذایی بر روی الکتروودها به خصوص الکتروود آلومینیومی بود که باعث عملکرد ضعیف سامانه می‌شود.

تقدیر و تشکر

در پایان، از حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در قالب طرح پژوهشی شماره ۳ با شماره ۳۹۵۷۷، قدردانی می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

گرمایش اهمی، به‌عنوان یک فرآیند با عملکرد بالا می‌تواند در تغلیظ آب‌انگور به‌کار رود. در این تحقیق، مشخص شد که نوع الکتروود و همچنین میزان گرادیان ولتاژ تأثیر معنی‌داری بر مدت‌زمان فرآیند، انرژی مصرفی، انرژی مصرفی ویژه، عملکرد و هدایت الکتریکی دارد. بیشترین مدت‌زمان گرمایش و همچنین بیشترین انرژی مصرفی در الکتروود آلومینیومی و در گرادیان ولتاژ ۱۰V/cm مشاهده شد؛ در حالی که کمترین زمان گرمایش و کمترین انرژی مصرفی در الکتروود فولاد زنگ‌نزن و در گرادیان ولتاژ ۲۲۷/cm به‌دست

مراجع

- [1] Food and Agricultural Organization of United Nations. FAO. (2017). Production of Grape by countries.. Economic and Social Department: The statistical Division. Available from: <http://faostat.fao.org>.
- [2] Tavakolipur, H., Kalbasi Ashtari. A. (2013). Investigation of Rheological Properties of Grape Juice, *Nutritional Science and Industry Seasonal Publication*, 40(10), 129-137. [In Persian].
- [3] Rupasinghe, H.P.V., Yu, L. J. (2012). Emerging Preservation Methods for Fruit Juices and Beverages. *Food Additive, InTech*, pp 65-77.
- [4] Glevitzky, M., Bogdan, I., Brusturean, G.A., Silaghi-Perju. D. (2007). Use of pasteurization units or equivalent for the quality estimation of fruit juices submitted to different thermal treatments. *Chem Bull "POLITEHNICA" Univ. (Timișoara)*, 52, (66): 18-20.
- [5] Camargo M., Santos, C.A., Oliveira, A.A., Vessoni T.C. (2010). Ohmic heating a review. *Trends in Food Science & Technology*, 21, 436-441.
- [6] Torkian Boldaji, M., Borghei, A. M., Beheshti, B., Hosseini, S.E. (2015). The process of producing tomato paste by ohmic heating method. *Journal of Food Science and Technology*, 52(6), 3598-3606.
- [7] Sastry, S.K., and Barach, J.T. (2000). Ohmic and inductive heating. *Journal of Food Science, Supplement* 65(4), 42-46.
- [8] Abedelmaksoud, T., Mohsen, S.M., Duedahl-Olesen, L., Elnikeety, M.M., Feyissa, A.H. (2018). Effect of ohmic heating parameters on inactivation of enzymes and quality of not from-concentrate mango juice. *Asian Journal of Scientific Research*, 11(3), 383-392.
- [9] Srikalong P, Makrudin T, Sampavamontri P and Kovitthaya E (2011) Effect of ohmic heating on increasing guava juice yield. *2nd International Conference on Biotechnology and Food Science*.vol 7.
- [10] Sastry, S.K. (2008). Ohmic heating and moderate electric field processing. *Food Sci. Technol. Int.* 14, 419-422.
- [11] Fellow, P. (2000). *Food Processing Technology. Wood head publications limited*, pp 373-377.
- [12] Assawarachan, R. (2010). Estimation model for electrical conductivity of red grape juice. *Int J Agric & Biol Eng.*, 3(2), 52-57.
- [13] De Alwis, A.A.P., Fryer, P.J. (1990). A finite-element analysis of heat generation and transfer during ohmic heating of food. *Chemical Engineering Science*, 45(6), 1547-1559.
- [14] Zell, M.; Lyng, J.G., Morgon, D.J., Cornin, D.A., (2010). Minimising heat losses during batch ohmic heating of solid food. *Food and Bioproducts Processing*, 38, 1135-1142.
- [15] Stancl, J., Zitny, R. (2009). Milk fouling at direct ohmic heating. *Journal of Food Engineering*, 99, 437-444.
- [16] Icier, F., Ilicali, C. (2005a). Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Research. Int.* 38 (10), 1135-1142.
- [17] Icier, F., Ilicali, C., (2005b). Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Research International*, 38, 1135-1142.
- [18] Sarang, S., Sastry, S. K., Knipe, L. (2008). Electrical conductivity of fruits and meats during

- ohmic heating.
Journal of Food Engineering, 87, 351–356.
- [19] Assiry, A., Sastry, S.K., Samaranayake, C. (2003). Degradation kinetics of ascorbic acid during ohmic heating with stainless steel electrodes. *J. Appl. Electrochem*, 33(2), 187–196.
- [20] Yaacob, A.R., A.Razak, A., Abidin, M. Z. (2019). Electrical Characteristics Investigation of Ohmic Heating on Particulate Food Sterilization. *Journal of Information System and Technology Management*, 4(11), 34-44.
- [21] Sun, D.W. (2006). Thermal Food Processing: New Technologies and Quality Issues. *Taylor and Francis, Raton*, pp 19-48.
- [22] Darvishi, H., Zarein, M., Minaie, S., Khafajeh, H. (2014). Exergy and energy analyses, drying kinetics and mathematical modeling of white mulberry drying process. *International Journal of Food Engineering*, 10, 269-280.
- [23] Sharma G.P., Prasad, S. (2006) Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves. *J Food Eng.*, 75, 441–446.
- [24] 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.
- [25] Darvishi, H., Khostaghaza, H.K., Gholamhassan, N, (2013). Ohmic heating of pomegranate juice: Electrical conductivity and pH change. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 12, 101–108. [In Persian].
- [26] Castro, I., Teixeira, J.A., Salengke, S., Sastry, S.K., Vicente, A.A. (2004). Ohmic heating of strawberry products: electrical conductivity measurements and ascorbic acid degradation kinetics. *Innovative Food Science and Engineering Technologies* 5, 27-36.
- [27] Darvishi, H., Hosainpour, A., Nargesi, F. and Khostaghaza, M.H. (2011). Ohmic Processing: Temperature Dependent Electrical Conductivities of Lemon Juice. *Modern Applied Science* 5(1), 16-18.
- [28] Pataro, G., Barca, G.M.J., Pereira, R.N., Vicente, A.A., Teixeira, J.A., Ferrari, G. (2013). Quantification of metal release from stainless steel electrodes during conventional and pulsed ohmic heating. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 21, 66-73.
- [29] Bansal, B., Chen, X.D., Lin., S.X.Q. (2005). Skim milk fouling during ohmic heating. *ECI Symposium Series, Volume RP2: Proceedings of 6th International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning -Challenges and Opportunities*, Editors Hans Müller-Steinhagen, M. Reza Malayeri, and A. Paul Watkinson, *Engineering Conferences International, Kloster Irsee, Germany, June 5 – 10*.
- [30] Assiry, AM., Gaily, M.H., Alsamee, M., Sarfudin, A. (2010). Electrical conductivity of seawater during ohmic heating. *Desalination* 260, 9-17.
- [31] AlHussein M., Assiry, Sudhir, K. Sastry, Chaminda P. Samaranayake. (2006). Influence of temperature, electrical conductivity, power and pH on ascorbic acid degradation kinetics during ohmic heating using stainless steel electrodes. *Bioelectrochemistry* 68, 7-13.
- [32] Icier, F., Yildiz, H., Baysal, T. (2006). Peroxidase inactivation and color changes during ohmic blanching of pea puree. *J. Food Eng.*, 74, 424-429.
- [33] Icier, F. (2003). The Experimental Investigation and Mathematical Modeling of Ohmic Heating of Foods. *Ph.D thesis*, Ege University, Institute of Naturaland Applied Science, Food Engineering Section, in Turkish.
- [34] Kumar, T., Smith, D.D., Kumar, S., Vimla, B. (2018). Effect of Voltage Gradient and Temperature on Electrical Conductivity of Grape (*Vitis vinifera* L.) Juice during Ohmic Heating. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(05), 1914-1921.

*Research Article***Effects of Electrode Type and Voltage Gradient on Grape Juice Concentration by Ohmic Heating Method**

Mahdi Shafie¹, Mehdi Khojastehpour^{*2}, Mohammad Hossein Aghkhani³, Mehdi Torkian Boldaji⁴

- 1. PhD Student, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran**
- 2. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran**
- 3. Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran**
- 4. Assistant Professor, Department of Mechanics, Islamic Azad University, Varamin-Pishva, Iran**

Abstract

Nowadays, energy efficient systems are needed for concentrated juice production. Ohmic heating is one of these systems. In this study, the effect of ohmic heating technique on parameters such as: types of electrode (stainless steel, aluminum and brass), voltage gradient (10, 14, 18 and 22 V/cm), electrical conductivity, heating rate, pH and energy consumption of grape juice samples in the temperature range of 26-90°C was investigated. The results showed that the effect of voltage gradient was statistically significant on the electrical conductivity, ohmic heating time, heating rate, pH, energy consumption and system performance coefficient (SPC) ($p < 0.05$). The best efficiency (85.09%) was observed for stainless steel electrodes and 22V/cm voltage gradient. By increasing the voltage gradient in all three electrodes (stainless steel, aluminum and brass), the heating time and energy consumption decreased, but the performance of the system increased. As the voltage gradient increased, time, pH and specific energy consumption decreased. The increase in concentration of grape juice was significantly increased electrical conductivity. The effect of electrodes on the heating rate of grape juice concentrated was not statistically different.

Keywords: Electrical conductivity, Grape juice, Ohmic heating, Thermal conductivity

* Corresponding author: mkhpour@um.ac.ir