

## مقاله علمی - پژوهشی

# بررسی و ارزیابی خصوصیات مهندسی سامانه اهمیت طی فرایند پختن قارچ دکمه‌ای

مهدی قوانلو<sup>۱</sup>، محسن آزادبخت\*<sup>۲</sup>، فریال وارسته<sup>۳</sup> و محمد واحدی ترشیزی<sup>۴</sup>

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد؛ و دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران  
۳- استادیار گروه باغبانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران  
۴- دانشجوی دکتری گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۳۱

## چکیده

در این تحقیق از یک دستگاه حرارت‌دهی اهمیت برای ارزیابی عملکرد سامانه اهمیت در سه گرادیان ولتاژ (۷/۵، ۹/۲۵ و ۱۱/۵ ولت در سانتی‌متر)، سه نوع الکتروود (استیل، برنجی و آلومینیومی) و سه غلظت محلول اهمیت متشکل از ۲۰ میلی‌لیتر آب و سه مقدار نمک (۱، ۲ و ۳ گرم) برای پختن قارچ استفاده شد. در این فرایند جریان ورودی، ضریب هدایت الکتریکی و ضریب عملکرد سامانه در حین فرایند پختن قارچ محاسبه و داده‌های به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار آماری تحلیل گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که هر سه فاکتور گرادیان ولتاژ، نوع الکتروود و غلظت محلول تأثیر معنی‌داری بر فاکتورهای مورد بررسی داشته است و بیشترین تأثیر مربوط به گرادیان ولتاژ بوده و پس از آن نوع الکتروود و غلظت محلول اهمیت تأثیر معنی‌داری روی فاکتورهای جریان ورودی، ضریب هدایت الکتریکی و ضریب عملکرد سامانه داشته است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که بهترین نوع الکتروود استفاده شده الکتروود آلومینیوم و بهترین غلظت، ۳ گرم نمک و ۲۰ میلی‌لیتر آب بوده که بالاترین مقادیر جریان ورودی، ضریب هدایت الکتریکی و ضریب عملکرد در این غلظت و الکتروود به دست آمده است.

## واژه‌های کلیدی

خصوصیات ترمودینامیکی، غلظت محلول، گرادیان ولتاژ، نوع الکتروود

## مقدمه

ذرات جامد غذا نخواهد بود. در واقع حرارت‌دهی اهمی روش فرآوری حرارتی پیشرفته است که در آن ماده غذایی به عنوان مقاومت الکتریکی عمل می‌کند و با عبور جریان الکتریسیته از درون آن گرم می‌شود (Vahedi Torshizi et al., 2021). طی این عمل، انرژی الکتریکی به حرارت تبدیل می‌شود و در نتیجه حرارت‌دهی سریع و یکنواختی اتفاق می‌افتد

اهمیک روش حرارتی جایگزین بسیار سریع است که با عبور جریان الکتریکی از نمونه مورد نظر ایجاد می‌شود (Shynkaryk et al., 2010). در این روش حرارت‌دهی، به محض اعمال فرایند، حرارت به طور هم‌زمان و مستقیماً در تمامی مولکول‌های ماده غذایی پخش می‌شود، در نتیجه نیازی به انتقال حرارت از سطح مشترک محیط حرارتی به درون

دی‌الکتریکی می‌شود (Anwar *et al.*, 2015). در حالی که گرمایش اهمی به دلیل مقاومت الکتریکی ماده غذایی است که به سادگی جذب و به گرما تبدیل می‌شود و این روش سادگی مناسب‌تری دارد. در استفاده از ایجاد حرارت با مایکروویو فرکانس‌های میدان پایین‌تر به نفع گرمایش یونی هستند در حالی که فرکانس‌های بالاتر به نفع چرخش دوقطبی هستند که همین امر بر میزان گرمای ایجاد شده تأثیرگذار است (Kubo *et al.*, 2020). ولی در روش حرارت‌دهی اهمیک با استفاده از ولتاژ به طور یکنواخت میزان حرارت در سطح نمونه ایجاد می‌شود. از طرفی، بیشتر محصولات کشاورزی و غذایی دارای رطوبت هستند و تفاوت زیاد در خواص دی‌الکتریک ماده خشک و رطوبت‌دار در این مواد وجود دارد و همان‌طور که تکنیک‌های فرکانس امواج الکترومغناطیسی و مایکروویو برای سنجش میزان رطوبت این محصولات استفاده می‌شود، خصوصیات این روش به رطوبت محصولات وابسته است (Nelson & Bartley, 2000) اما در روش حرارت‌دهی به روش اهمیک مقاومت الکتریکی نمونه مدنظر است و می‌توان اکثر محصولات را بررسی کرد.

در مجموع، پردازش حرارتی به طور گسترده‌ای برای از بین بردن خطرهای بیولوژیکی در مواد غذایی استفاده می‌شود. در حرارت‌دهی متداول، انتقال گرما از طریق رسانایی و جابه‌جایی به دست می‌آید که باعث ایجاد لکه‌های سرد در نمونه‌ها می‌شود و وجود لکه‌های سرد در حین فرایند حرارت‌دهی سبب می‌شود تا میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا بتوانند زنده بمانند. بنابراین، فناوری‌های حرارتی جدید مانند گرمایش رادیویی، گرمایش مایکروویو و گرمایش اهمی به عنوان جایگزین پیشنهاد شده‌اند که گرمای سریع و یکنواخت را

که از این‌رو به حرارت‌دهی مقاومت الکتریکی نیز معروف است. این روش کاربردهای مختلفی در صنعت غذا دارد که می‌توان به کاربرد آن در آبگیری (خشک کردن) مواد غذایی، تبخیر آب برای کاهش سطح رطوبت مواد غذایی و به تأخیر انداختن شروع فساد شیمیایی و میکروبی، آنزیم‌بری، تخمیر و پیشگیری از خشک شدن اشاره کرد (Li *et al.*, 2004; Icier & Ilicali, 2005). حرارت‌دهی اهمیک، در مقایسه با روش‌های مرسوم حرارتی، مزایایی مانند حفظ رنگ و ارزش تغذیه‌ای مواد غذایی، کوتاه شدن زمان فرایند و راندمان بالا دارد (Threlfall *et al.*, 2005; Weber & Larsen, 2017). این روش دارای گرمایش سریع و یکنواخت است و محصولی باکیفیت بالا با حداقل تغییرات خواص ساختاری و تغذیه‌ای تولید می‌کند و با محیط‌زیست نیز سازگار است. داشتن بازده بالا و کاهش مصرف انرژی به همراه استفاده نکردن از سوخت‌های فسیلی یکی دیگر از ویژگی‌های مهم این روش است که مورد توجه محققان قرار گرفته و برنامه‌های زیادی وجود دارد که می‌تواند با تکنولوژی گرمایی مانند بلانچینگ، تبخیر، خشک شدن، تخمیر، استخراج، عقیق‌سازی و پاستوریزاسیون غذاها اجرا شود (Saberian *et al.*, 2017; Azadbakht *et al.*, 2020).

تفاوت اساسی میان روش‌های حرارتی مانند مایکروویو و دیگر روش‌های حرارتی را می‌توان در دریافت اثر حرارتی بیان نمود. برای دستیابی به اثر حرارتی مایکروویو، باید فرکانس آن به گونه‌ای تنظیم شود که در یک میدان الکتریکی متناوب، اختلاف فاز بین چرخش دوقطبی‌ها و جهت‌گیری میدان، منجر به اصطکاک مولکولی و برخورد شود که این برخورد و اصطکاک مولکولی، باعث گرمایش

گرادیان ولتاژ مقدار ضریب هدایت الکتریکی و دما تطابق بالایی با حالت واقعی دارد.

قاسمی و همکاران (Ghasemi *et al.*, 2014) با ارزیابی خواص مکانیکی دو رقم گوجه‌فرنگی (پتوارلی سی‌اچ و نیوتن) بر اساس ضریب هدایت الکتریکی در سه سطح زمانی ۱، ۳ و ۵ روز مشاهده کردند که ضریب هدایت الکتریکی هر دو رقم با افزایش زمان نگهداری کاهش می‌یابد. این محققان می‌افزایند روابط معنی‌داری در سطح ۱ درصد میان ضریب هدایت الکتریکی و خواص مکانیکی به جز تغییر شکل شکست رقم پتوارلی سی‌اچ یافت شده است و در میان پارامترهای مکانیکی نیروهای گسیختگی و انرژی گسیختگی هر دو رقم با ضریب هدایت الکتریکی همبستگی دارند. اوتکر و همکاران (Kautkar *et al.*, 2015) رفتار الکتریکی وابسته به درجه حرارت رطوبت زنجبیل را در حرارت اهمیت و گرادیان ولتاژ ۵، ۷، ۹، ۱۱ و ۱۳ ولت بر سانتی‌متر تا دمای ۸۰ درجه سلسیوس مطالعه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که ضریب هدایت الکتریکی با افزایش دما و زمان گرمایش افزایش می‌یابد.

با توجه به استفاده فراوان قارچ در فراورده‌های مختلف غذایی، ارزیابی دستگاه و تجهیزات پختن این محصول اهمیت بالایی دارد زیرا علاوه بر تأثیرات یک دستگاه بر خصوصیات محصول، نیازمند آگاهی درباره خصوصیات این دستگاه طی این فرایند خواهد بود. در این تحقیق به بررسی خصوصیات مهندسی فرایند اهمیت طی پختن قارچ پرداخته شده تا عملکرد این دستگاه به هنگام استفاده از الکترودها، گرادیان ولتاژ و غلظت‌های مختلف ارزیابی و تحلیل شود، زیرا شاکله اصلی فرایند اهمیت استفاده از الکتریسیته است که تغییرات گرادیان ولتاژ در این بررسی اهمیت بالایی خواهد داشت. استفاده از

فراهم می‌کنند. در میان این فناوری‌های جایگزین، گرمادهی اهمیت به خصوص در گرمای یکنواختی، هزینه و بهره‌وری انرژی، مزایایی بسیار خوبی دارد (Samprovalaki *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2017).

محققان مختلفی با توجه به اهمیت این روش روی این مورد کار کردند: درویشی و همکاران (Darvishi *et al.*, 2013) روی حرارت‌دهی اهمیت آب انار با استفاده از ۴ ولتاژ (۳۰، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ ولت) و در گستره حرارتی ۲۰ تا ۸۵ درجه سلسیوس آزمایش کردند. در این تحقیق اثر دما بر ضریب هدایت الکتریکی، سرعت نفوذ حرارت و عملکرد سامانه بررسی و نشان داده شد که زمان حرارت‌دهی و ضریب هدایت الکتریکی به شیب ولتاژ استفاده شده وابسته است و با افزایش ولتاژ عملکرد سامانه کاهش و ضریب هدایت الکتریکی نمونه‌ها با افزایش دما افزایش می‌یابد.

درویشی (Darvishi, 2012) در تحقیقی روی حرارت‌دهی رب گوجه‌فرنگی در ۵ ولتاژ متفاوت در محدوده حرارتی ۲۶ تا ۹۶ درجه سلسیوس نشان داد که در همه نمونه‌ها با افزایش دمای فرایند مقدار ضریب هدایت الکتریکی تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد و اثر گرادیان ولتاژ بر زمان حرارت‌دهی از نظر آماری معنی‌دار است. زو و همکاران (Zhu *et al.*, 2010) طی مطالعه‌ای به شبیه‌سازی ضریب هدایت الکتریکی هویج، سیب‌زمینی، اسفناج و گوشت گاو با فرایند گرمایش اهمی در گرادیان ولتاژهای ۵۰-۱۰ ولت بر سانتی‌متر و محدوده دمایی ۲۵ تا ۱۲۵ درجه سلسیوس پرداختند. در این مطالعه، سلول مورد استفاده از جنس تفلون بود و ذرات به مربع‌هایی به طول ۲ سانتی‌متر خرد شده بودند. نتایج این گزارش نشان داد که با افزایش دما و

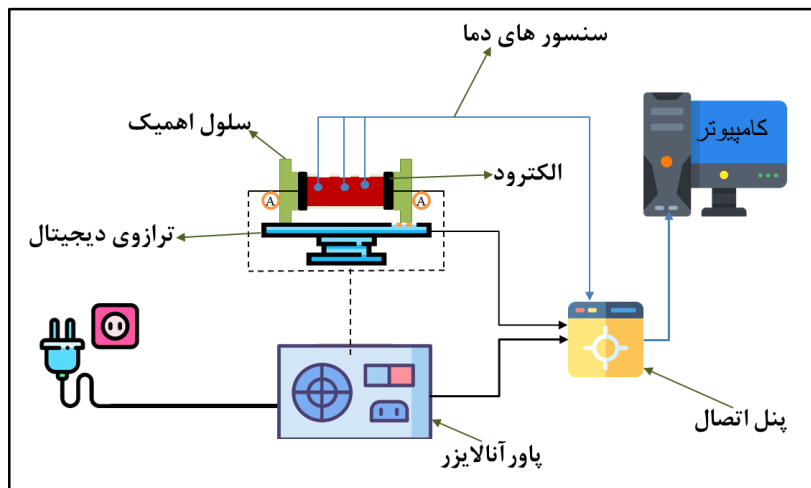
انتخاب شوند. پس از یکسان‌سازی ابعاد، نمونه‌ها شست‌وشو شدند و در دسته‌های مختلف برای آزمایش قرار گرفتند. در این تحقیق، سه گرادیان ولتاژ ۷/۵، ۹/۲۵ و ۱۱/۵ ولت بر سانتی‌متر، سه نوع الکترود استیل، برنجی و آلومینیمی و سه غلظت محلول اهمیک متشکل از آب و نمک ( $\frac{1}{20}$ ،  $\frac{2}{20}$ ،  $\frac{3}{20}$  میلی لیتر گرم) انتخاب شد. مشخصات دستگاه اهمیک طراحی شده در این آزمایش در جدول ۱ آورده شده و شکل ۱ نیز شماتیک این دستگاه را نمایش می‌دهد.

الکترودهای مختلف که سبب انتقال الکتریسیته و ایجاد گرمایش می‌گردد نیز در این تحقیق تحلیل شد. در مجموع، هدف تحقیق ارزیابی این فاکتورهای مؤثر طی فرایند پختن قارچ دکمه‌ای است.

## مواد و روش‌ها

### آماده‌سازی و روش انجام آزمایش

نمونه‌های قارچ دکمه‌ای از بازار خریداری شد. نمونه‌ها برای یکسان‌سازی از نظر ابعاد با استفاده از کولیس اندازه‌گیری شدند تا نمونه‌های یک اندازه



شکل ۱- شماتیک سامانه اهمیک این آزمایش

Fig. 1- Schematic of the ohmic system of this experiment

جدول ۱ - مشخصات سامانه اهمیک در این آزمایش

Table 1- Specifications of the ohmic system in this experiment

English	Persian	English	Persian
Cylindrical tube	لوله استوانه PTF	Ohmic cell type	جنس سلول اهمی
Steel_Aluminum_Brass	استیل_آلومینیم_برنج	Material of electrodes	جنس الکترودها
150 mm		Ohmic cell length	طول سلول اهمی
50 mm		The inner diameter of the ohmic cell	قطر داخلی سلول اهمی
60 mm		Outer ohmic cell diameter	قطر خارجی سلول اهمی
4 mm		The diameter of the holes on the ohmic cell	قطر سوراخ‌های روی سلول اهمی
49.9 mm		Diameter of electrodes	قطر الکترودها
2 mm		Thickness of electrodes	ضخامت الکترودها
80 mm		The distance between the two electrodes	فاصله بین دو الکترودها
2 mm		Electrode interface rod diameter	قطر میله رابط الکترودها

### ضریب هدایت الکتریکی

برای محاسبه ضریب هدایت الکتریکی، از رابطه ۱ استفاده شد. در این رابطه، فاصله بین دو الکترود اهمیت بالایی دارد و افزایش آن به همراه افزایش ولتاژ سبب کاهش ضریب هدایت الکتریکی می شود (Castro et al., 2004; Cappato et al., 2017):

$$\sigma = \frac{LI}{AV} \quad (1)$$

که در آن،

$\sigma$  = ضریب هدایت الکتریکی نمونه (زیمنس بر متر)؛  $L$  = فاصله دو الکترود از یکدیگر (متر)؛  $A$  = سطح مقطع صفحات (متر مربع)؛  $V$  = ولتاژ ورودی (ولت)؛ و  $I$  = جریان ورودی (آمپر).

در خلال گرمایش، سطح تماس بین نمونه‌ها و الکترود به دلیل خروج بخار کاهش می‌یابد، سطح تماس با استفاده از رابطه ۲ حساب می‌شود که  $\rho_t$  را می‌توان با استفاده از رابطه ۳ محاسبه کرد (Darvishi et al., 2015):

$$A = \frac{M_t}{\rho_t L} \quad (2)$$

$$\rho_t = 1340 - 3.26M_t^2 \quad (3)$$

که در آنها،

$M_t$  = مقدار رطوبت در هر لحظه (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک)؛ و  $\rho_t$  = چگالی نمونه آنی (کیلوگرم بر مترمکعب).

### توان مصرفی

توان مصرفی نیز با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود (Kanjanapongkul, 2017):

$$P = VI = I^2 R \quad (4)$$

که در آن،

$P$  = توان مصرفی (وات).

انرژی داده شده به سامانه طبق رابطه‌های ۵ و ۶ ارائه شده توسط (Icier & Ilicali, 2005) به شرح زیر محاسبه می‌شود (Srivastava et al., 2014):

$$E_{given} = E_{taken} + E_{loss} \quad (5)$$

$$\sum (VI)t = mc_p(T_f - T_i) + E_{loss} \quad (6)$$

که در آنها،

$E_{given}$  = انرژی داده شده به سامانه (ژول)؛  $E_{taken}$  = انرژی گرفته شده از سامانه (ژول)؛  $E_{loss}$  = انرژی تلف شده در سامانه (ژول)؛ و  $T_i$  و  $T_f$  = دمای اولیه و نهایی (درجه سلسیوس).

انرژی اتلافی سامانه برابر مجموع انرژی لازم برای افزایش دمای سلول، انرژی اتلافی به محیط از طریق جابه‌جایی و انرژی الکتریکی که به حرارت تبدیل می‌شود. در رابطه‌های بالا مقدار ولتاژ مشخص است و مقادیر آمپر و زمان با نرم‌افزار محاسبه شد. مقادیر دمای اولیه و دمای نهایی قارچ با ترمومتر اندازه‌گیری و جرم آب موجود در قارچ با ترازو محاسبه شد.

### ضریب عملکرد سامانه

ضریب کارایی سامانه برابر است با نسبت انرژی مصرفی توسط سامانه به انرژی داده شده و از رابطه ۷ محاسبه می‌شود (Darvishi et al., 2013):

$$SPC = \frac{E_{taken}}{E_{given}} \quad (7)$$

$$SPC = \frac{mc_p(T_f - T_i)}{\sum (VI)t}$$

که در آن،

$t =$  زمان (ثانیه)؛  $SPC =$  ضریب عملکرد سامانه؛ و  $m =$  جرم نمونه (کیلوگرم).

### تحلیل آماری

در این تحقیق گرادیان ولتاژ، نوع الکتروود و غلظت محلول اهمیت به‌عنوان متغیر مستقل و جریان ورودی، ضریب هدایت الکتریکی و ضریب عملکرد سامانه در حین فرایند پختن قارچ به‌عنوان فاکتور وابسته در نظر گرفته شد که داده‌های به دست آمده در نرم‌افزار صفحه گسترده اکسل مرتب شدند. تمامی آزمایش‌ها در سه تکرار و نتایج با استفاده از آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS تحلیل شدند.

### نتایج و بحث

جدول ۲ تأثیر فاکتورهای گرادیان ولتاژ غلظت محلول و نوع الکتروود را بر جریان الکتریسیته در فرایند اهمیت قارچ نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲ گرادیان ولتاژ و نوع الکتروود در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار و غلظت محلول در سطح آماری ۵ درصد معنی‌دار شده است. در بررسی اثر متقابل فاکتورها که در جدول ۲ نشان داده شده است، اثر متقابل گرادیان ولتاژ و نوع الکتروود در سطح ۵ درصد معنی‌دار و اثر متقابل غلظت محلول با دو فاکتور گرادیان ولتاژ و نوع الکتروود معنی‌دار نشده است. با توجه به شکل ۲-الف افزایش گرادیان ولتاژ سبب افزایش معنی‌داری مقدار جریان عبوری در فرایند شده و بین هر سه گرادیان ولتاژ از نظر آماری تفاوت

معنی‌داری وجود داشته است. بیشترین مقدار جریان عبوری ۳/۹۰۷ آمپر در گرادیان ولتاژ ۱۱/۲۵ و نوع الکتروود آلومینیمی و کمترین مقدار نیز در گرادیان ولتاژ ۷/۵ و نوع الکتروود استیل با مقدار ۱/۶۵ آمپر بوده است. در یک گرادیان ولتاژ ثابت برای هر سه گرادیان ولتاژ به ترتیب کمترین جریان عبوری برای الکتروود استیل و پس از آن به ترتیب برای الکتروود برنجی و آلومینیمی بوده است که در گرادیان ولتاژ ۷/۵ تفاوت معنی‌داری بین الکتروود آلومینیمی و برنجی دیده نمی‌شود و این حالت برای گرادیان ولتاژ ۱۱/۲۵ برای الکتروود استیل و برنجی مشاهده شده است. نتایج به دست آمده را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که ضریب هدایت الکتریکی و جریان ورودی با هم رابطه مستقیم دارند و با تبخیر آب حجم نمونه‌ها کمتر شده و تماس الکتروودها از این طریق کاهش پیدا کرده است. سارنگ و همکاران (Sarang *et al.*, 2008) روی گوشت و میوه (سیب قرمز، سیب طلایی، هلو و گلابی) نیز مشابه همین نتایج را با روش اهمیت به دست آوردند. از طرفی، با نتایج به دست آمده توان مصرفی افزایش پیدا کرده و با توجه به اینکه جریان ورودی و توان مصرفی با هم رابطه مستقیم دارند، میزان جریان ورودی با افزایش گرادیان و درصد کاهش افزایش پیدا کرده است؛ جاگر و همکاران (Jaeger *et al.*, 2016) که روی تأثیر فرایند حرارت‌دهی اهمیت بر تیمار مواد غذایی کار کرده بودند به این موضوع اشاره داشته‌اند (Vahedi *et al.*, 2020). افزایش غلظت نمک در محلول نیز سبب افزایش میزان جریان ورودی به نمونه شده است که نتایج در شکل ۲ نشان داده شده است.

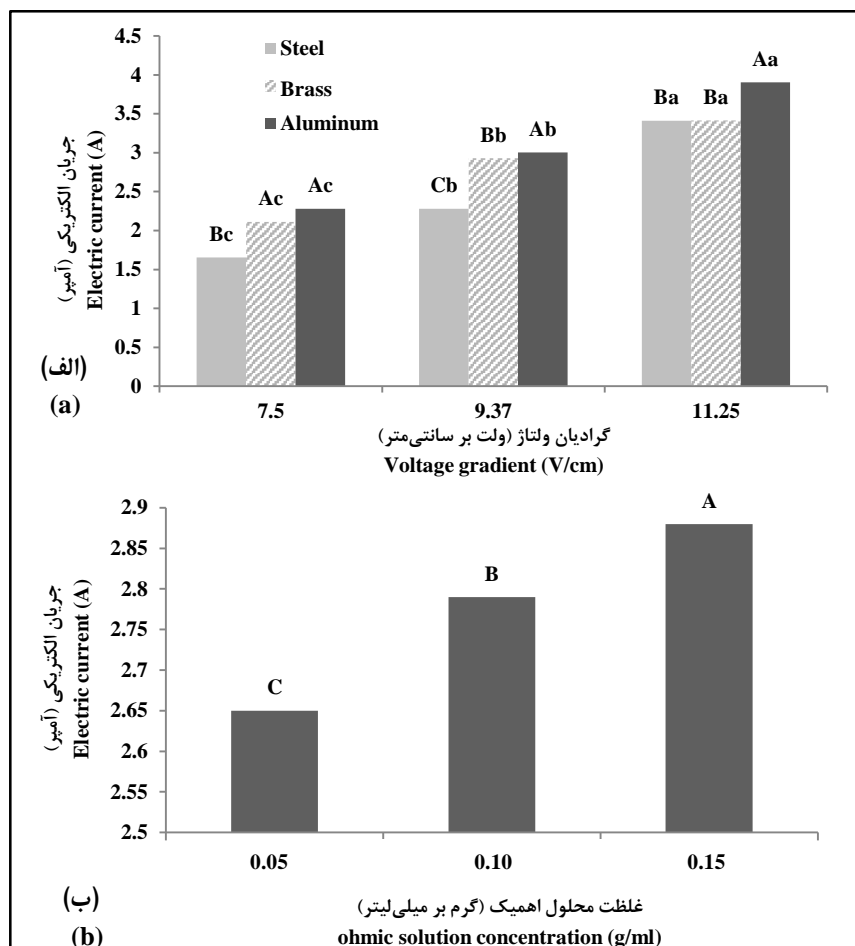
جدول ۲- آنالیز واریانس جریان عبوری طی فرایند اهمیک

Table 2- Analysis of variance of passing current during ohmic process

F value	میانگین مربعات average of squares	درجه آزادی DF		
135.83**	16.48	2	Voltage gradient	گرادیان ولتاژ
18.33**	2.22	2	Electrode type	نوع الکترود
3.02*	0.366	2	Concentration of ohmic solution	غلظت محلول اهمیک
3.64*	0.441	4	Voltage gradient × electrode type	گرادیان ولتاژ × نوع الکترود
0.01	0.0009	4	Voltage gradient × electrode type	گرادیان ولتاژ × نوع الکترود
0	0.000003	4	Electrode type × Concentration of ohmic liquid	نوع الکترود × غلظت مایع اهمیک
	0.121	18	Error	خطا
CV= 12.53		R= 0.841		

\*\* Significance at 1% level, \* Significance at 5% level

\*\* معنی داری در سطح ۱ درصد، \* معنی داری در سطح ۵ درصد



شکل ۲- الف) اثر متقابل فاکتور گرادیان ولتاژ و نوع الکترود بر روی میزان جریان عبوری و

ب) مقایسه میانگین اثر غلظت محلول اهمیک بر روی جریان عبوری

Fig. 2- a) Interaction of voltage gradient factor and electrode type on the amount of current passing and b) Comparison of the average effect of ohmic solution concentration on the flow rate

Similar letters indicate lack of significance

حروف مشابه روی ستون‌ها نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

افزایش گرادیان ولتاژ، شدت توان مصرفی افزایش پیدا کرده و همین امر سبب افزایش میزان توان مصرفی در فرایند حرارت‌دهی شده است. بلداجی و همکاران (Torkian Boldaji *et al.*, 2017) روی رب گوجه‌فرنگی طی فرایند اهمیت نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند. بیشترین مقدار توان مصرفی در الکتروود نوع آلومینیم و گرادیان ولتاژ ۱۱/۲۵ با مقدار ۳۰۲/۵۹ وات و کمترین مقدار توان مصرفی در الکتروود نوع استیل و گرادیان ولتاژ ۷/۵ با مقدار ۱۱۵/۰۶ به دست آمده است. با توجه به مقایسه میانگین غلظت محلول اهمیت، با افزایش میزان غلظت مقدار توان مصرفی نیز افزایش پیدا کرده که در شکل ۳-ب نشان داده شده است.

نتایج حاصل از آنالیز واریانس توان مصرفی برای گرادیان ولتاژ، نوع الکتروود و غلظت محلول اهمیت در جدول ۳ نشان داده شده است. طبق جدول، غلظت محلول اهمیت و گرادیان ولتاژ در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار و نوع الکتروود نیز در سطح آماری ۵ درصد معنی‌دار است. برای اثر متقابل فاکتورها که در جدول ۳ نشان داده شده، فقط اثر متقابل گرادیان ولتاژ و نوع الکتروود در سطح ۵ درصد معنی‌دار و نتایج حاصل در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، روندی افزایشی با افزایش گرادیان ولتاژ به دست آمده و با توجه به اینکه توان مصرفی با ولتاژ و جریان ورودی رابطه مستقیم دارد با افزایش ولتاژ و جریان ورودی مقدار توان مصرفی نیز زیاد خواهد شد. با

جدول ۳ - آنالیز واریانس توان مصرفی طی فرایند اهمیت

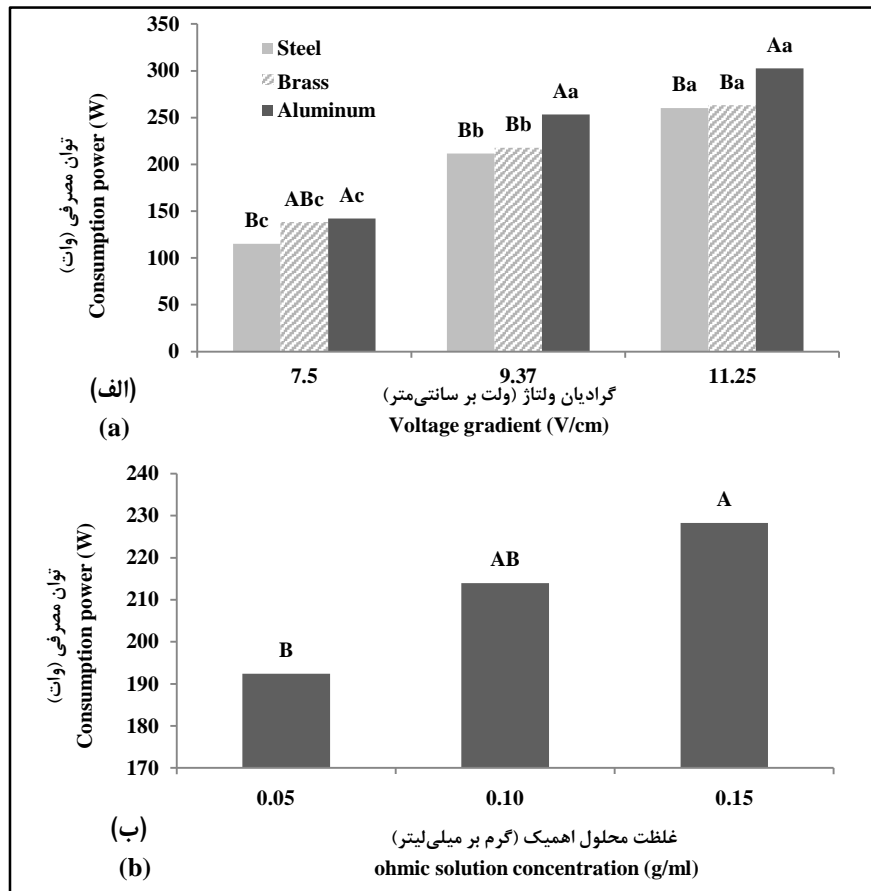
Table 3- Analysis of variance of power consumption during ohmic process

F value	میانگین مربعات average of squares	DF درجه آزادی		
135.50**	143969.30	2	Voltage gradient	گرادیان ولتاژ
4.28*	4550.25	2	Electrode type	نوع الکتروود
8.26**	8773.98	2	Concentration of ohmic solution	غلظت مایع اهمیت
3.31*	3513.27	4	Voltage gradient × electrode type	گرادیان ولتاژ × نوع الکتروود
0.09ns	95.21	4	Voltage gradient × electrode type	گرادیان ولتاژ × نوع الکتروود
0.58ns	615.80	4	Electrode type × Concentration of ohmic liquid	نوع الکتروود × غلظت مایع اهمیت
	1062.52	18	Error	خطا
<b>CV=12.53</b>		<b>R=0.841</b>		

\*\* معنی‌داری در سطح ۱ درصد، \* معنی‌داری در سطح ۵ درصد و ns معنی‌دار نبودن

\*\* Significance at 1% level, \* Significance at 5% level and ns not significant





شکل ۳- الف) اثر متقابل فاکتور گرادیان ولتاژ و نوع الکترود بر میزان توان مصرفی و

ب) مقایسه میانگین اثر غلظت محلول اهمیتیک بر توان مصرفی

**Fig. 3- a) Interaction of voltage gradient factor and electrode type on Consumption power and b) Comparison of the average effect of ohmic solution concentration on consumption power**

Similar letters indicate lack of significance

حروف مشابه روی ستون‌ها نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

شده و در هر سه گرادیان ولتاژ الکترود نوع آلومینیم بیشترین مقدار را داشته و پس از آن به ترتیب الکترود برنج و استیل قرار دارند. بیشترین و کمترین مقدار نیز به ترتیب ۲/۳۷ و ۱/۷۲ در گرادیان ولتاژ ۱۱/۲۵ و ۷/۵ و نوع الکترود آلومینیمی و استیل به دست آمده است. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توصیف کرد که فرایند اهمیتیک سبب تغییر بافت بیولوژیکی و افزایش دمای محصول گردیده و همین امر سبب افزایش تحرک الکترون‌ها و یون‌ها شده و ضریب هدایت الکتریکی نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. نتایج مشابه این تحقیق در تحقیقات پالانیپان و ساستری (Palaniappan & Sastry, 1991) روی

در جدول ۴، تأثیر فاکتورهای آزمایش بر میزان ضریب هدایت الکتریکی نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده گرادیان ولتاژ، نوع الکترود و غلظت مایع هر سه در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار شده‌اند. در بین اثر متقابل فاکتورها، فقط اثر متقابل گرادیان ولتاژ و نوع الکترود در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار شده که در جدول ۴ نشان داده شده است. برای اثرهای متقابل دیگر معنی‌داری به دست نیامده است. نتایج حاصل از اثر متقابل نوع الکترود و گرادیان ولتاژ در شکل ۴-الف نشان داده شده است. با توجه به این شکل افزایش گرادیان ولتاژ سبب افزایش مقدار ضریب هدایت الکتریکی

عملکرد سامانه در گرادیان ولتاژ ۷/۵ و نوع الکترود استیل با مقدار ۰/۹۲۶ و کمترین مقدار نیز در نوع الکترود آلومینیومی و گرادیان ولتاژ ۱۱/۲۵ با مقدار ۰/۶۳ به دست آمده است. بین گرادیان‌های ولتاژ در هر سه نوع الکترود نیز تفاوت معنی‌داری از نظر آماری وجود دارد. می‌توان گفت که با توجه به اینکه در ولتاژهای بالا جریان بیشتر است و با توجه به رابطه ضریب عملکرد سامانه، هرچه این مقدار بزرگ‌تر باشد مخرج کسر کمتر می‌شود و این امر میزان ضریب عملکرد سامانه را کاهش می‌دهد. نتایج به دست آمده با نتایج تحقیقات ایسیر و ایلکالی (Icier & Ilicali, 2005) روی پوره میوه طی فرایند حرارت‌دهی اهمیک و درویش (Darvishi, 2012) روی رفتار رب گوجه‌فرنگی طی فرایند حرارت‌دهی همخوانی دارد. این محققان به این نتیجه دست یافته بودند که میزان ضریب عملکرد سامانه به ۰/۹ می‌رسد. با توجه به بررسی مقایسه میانگین غلظت محلول اهمیک، با افزایش میزان غلظت مقدار ضریب عملکرد سامانه نیز افزایش پیدا کرده است که در شکل ۵-ب نشان داده شده است.

آب پرتقال در فرایند اهمیک و آمیالی و همکاران (Amiali et al., 2006) روی مایع تخم‌مرغ طی فرایند اهمیک است که افزایش ضریب هدایت الکتریکی را با افزایش دما گزارش کرده‌اند. با توجه به بررسی مقایسه میانگین غلظت محلول اهمیک، با افزایش میزان غلظت مقدار ضریب هدایت الکتریکی نیز افزایش پیدا کرده که در شکل ۴-ب نشان داده شده است.

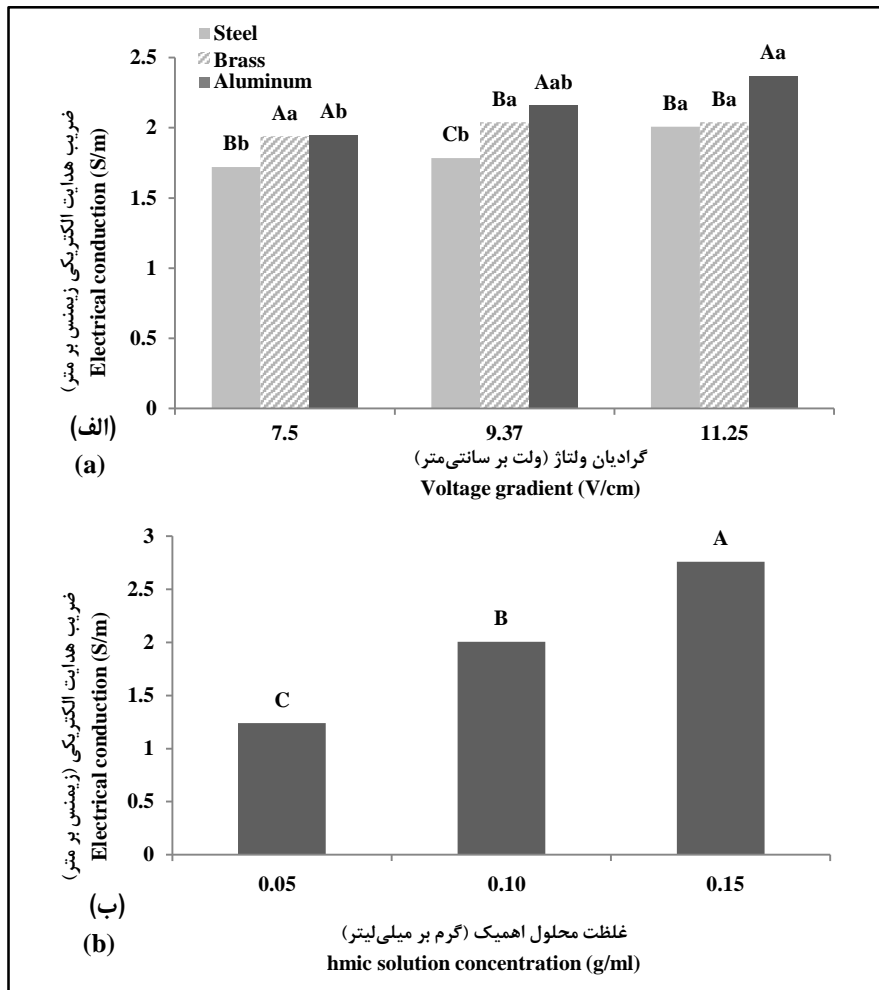
نتایج آنالیز واریانس برای ضریب عملکرد سامانه در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به این جدول، گرادیان ولتاژ، نوع الکترود و غلظت مایع هر سه در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار هستند و در بین اثر متقابل فاکتورها فقط اثر متقابل گرادیان ولتاژ و نوع الکترود در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار شده و برای اثرهای متقابل دیگر معنی‌داری به دست نیامده است. همان‌طور که در شکل ۵-الف نشان داده شده است، برای ضریب عملکرد سامانه روندی کاهشی با افزایش گرادیان ولتاژ به دست آمده که با توجه به شکل، در هر سه گرادیان ولتاژ تفاوت معنی‌داری بین نوع الکترودها مشاهده شده است. با توجه به این شکل بیشترین مقدار ضریب

جدول ۴ - آنالیز واریانس ضریب هدایت الکتریکی طی فرایند اهمیک  
Table 4. Analysis of variance of electrical conductivity during ohmic process

F value	میانگین مربعات average of squares	DF درجه آزادی		
38.61**	0.479	2	Voltage gradient	گرادیان ولتاژ
42.36**	0.525	2	Electrode type	نوع الکترود
54.76**	15.57	2	Concentration of ohmic liquid	غلظت مایع اهمیک
13.59**	0.168	4	Voltage gradient × electrode type	گرادیان ولتاژ × نوع الکترود
0.93	0.006	4	Voltage gradient × electrode type	گرادیان ولتاژ × نوع الکترود
0.53	0.018	4		نوع الکترود × غلظت مایع اهمیک
			Electrode type × Concentration of ohmic liquid	
	0.012	18	Error	خطا
<b>CV=15.65</b>		<b>R=0.977</b>		

\*\* Significance at 1% level

\*\* معنی‌داری در سطح ۱ درصد



شکل ۴- الف) اثر متقابل فاکتور گرادیان ولتاژ و نوع الکترود بر میزان ضریب هدایت الکتریکی و

ب) مقایسه میانگین اثر غلظت محلول اهمیک بر ضریب هدایت الکتریکی

**Fig. 4- a) Interaction of voltage gradient factor and electrode type on electrical Conduction coefficient and b) Comparison of the mean effect of ohmic solution concentration on electrical Conduction coefficient**

Similar letters indicate lack of significance

حروف مشابه روی ستون‌ها نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

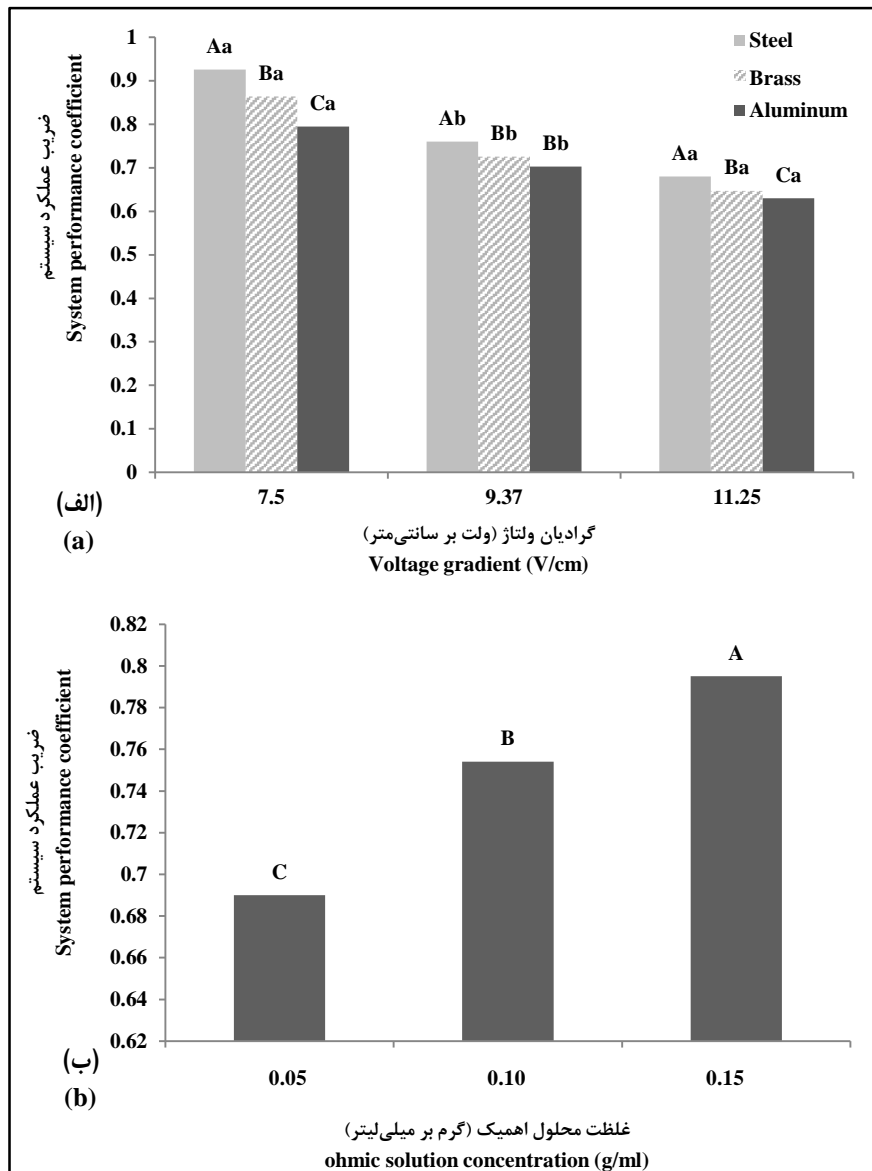
جدول ۵- آنالیز واریانس ضریب عملکرد سامانه طی فرایند اهمیک

**Table 5. Analysis of variance of system performance coefficient during ohmic process**

F value	میانگین مربعات average of squares	DF درجه آزادی		
895.45**	0.295	2	Voltage gradient	گرادیان ولتاژ
145.02**	0.047	2	Electrode type	نوع الکترود
195.18**	0.064	2	Concentration of ohmic liquid	غلظت مایع اهمیک
12.23**	0.004	4	Voltage gradient × electrode type	گرادیان ولتاژ × نوع الکترود
0.74ns	0.0002	4	Voltage gradient × electrode type	گرادیان ولتاژ × نوع الکترود
0.06ns	0.00001	4	Electrode type × Concentration of ohmic liquid	نوع الکترود × غلظت مایع اهمیک
0.00032		18	Error	خطا
<b>CV=12.41</b>		<b>R=0.976</b>		

\*\* Significance at 1% level and ns not significant

\*\* معنی‌داری در سطح ۱ درصد و ns معنی‌داری نبودن



شکل ۵- الف) اثر متقابل فاکتور گرادیان ولتاژ و نوع الکترود بر میزان ضریب عملکرد سامانه و

ب) مقایسه میانگین اثر غلظت محلول اهمیک بر میزان ضریب عملکرد سامانه

Fig. 5- a) Interaction of voltage gradient factor and electrode type on system performance coefficient and b) Comparison of the average effect of ohmic solution concentration on System performance coefficient

Similar letters indicate lack of significance

حروف مشابه روی ستون‌ها نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

الکتروود آلومینیمی سبب افزایش میزان جریان عبوری به مقدار ۲۰ درصد نسبت به الکترودهای دیگر شده و افزایش مقدار برای توان مصرفی حدود ۱۶ و برای ضریب هدایت الکتریکی حدود ۱۵ درصد است که استفاده از الکترود آلومینیمی سبب افزایش مقدار آن‌ها شده است. استفاده از

### نتیجه‌گیری

امروزه به دلیل کاربرد روش‌های حرارتی مختلف نیاز خواهد بود هر روش در حالات مختلف بررسی شود. در این تحقیق از سه نوع الکترود مختلف استفاده شد زیرا پارامترهای مهندسی با استفاده هر الکترود متفاوتند. نتیجه آزمایش‌ها نشان داد استفاده از

الکتروود آلومینیمی حدود ۱۲ درصد مقدار ضریب عملکرد سامانه را کاهش داده و بیشترین مقدار آن در الکتروود نوع استیل بوده است. از غلظت‌های مختلف آب و نمک نیز در این تحقیق استفاده شد تا بررسی شود ناخالصی وارد شده در آب آیا تأثیر مثبت دارد یا خیر. در مجموع می‌توان گفت که افزایش غلظت توانسته سبب بهبود پارامترهای مهندسی سامانه شود و این مقدار با استفاده از الکتروود استیل نیز مشاهده شده است.

## مراجع

- Amiali, M., Ngadi, M. O., Raghavan, V. G., & Nguyen, D. H. (2006). Electrical conductivities of liquid egg products and fruit juices exposed to high pulsed electric fields. *International Journal of Food Properties*, 9(3), 533-540. Doi:10.1080/10942910600596456.
- Anwar, J., Shafique, U., Waheed-uz-Zaman, R., Salman, M., Dar, A., Anzano, J. M., Ashraf, U., & Ashraf, S. (2015). Microwave chemistry: Effect of ions on dielectric heating in microwave ovens. *Arabian Journal of Chemistry*, 8(1), 100-104. Doi:10.1016/j.arabjc.2011.01.014.
- Azadbakht, M., Vahedi Torshizi, M. V., & Kashaninejad, M. (2020). Application of the response surface method in the analysis of ohmic heating process performance in sour orange juice processing. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 22(3), 250-261.
- Cappato, L. P., Ferreira, M. V. S., Guimaraes, J. T., Portela, J. B., Costa, A. L. R., Freitas, M. Q., & Cruz, A. G. (2017). Ohmic heating in dairy processing: Relevant aspects for safety and quality. *Trends in Food Science and Technology*, 62, 104-112. Doi: 10.22067/Jam.V7i1.47150. (in Persian)
- 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 Emerging Technologies*, 5(1), 27-36. Doi:10.1016/J.Ifset.2003.11.001.
- Darvishi, H., (2012). Ohmic Heating Behaviour and Electrical Conductivity of Tomato Paste. *Journal of Nutrition & Food Sciences*, 2(9), 1000167. Doi: 10.4172/2155-9600.1000167.
- 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. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 31, 73-82. Doi:10.1016/j.ifset.2015.06.012.
- Darvishi, H., Khostaghaza, M. H., & Najafi, G. (2013). Ohmic heating of pomegranate juice: Electrical conductivity and pH change. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 12(2), 101-108. Doi:10.1016/j.jssas.2012.08.003.
- Ghasemi, M., Khojastehpour, M., & Aghkhani, M. H. (2014). Evaluating the Mechanical Properties of Tomato Based on Electrical Conductivity. *Journal of Agricultural Machinery*, 4(2), 314-323. Doi:10.22067/jam.v4i2.34825. (in Persian)
- Icier, F., Ilicali, C. (2005). Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Research*, 38, 135-1142. Doi:10.1016/j.foodres.2005.04.003.
- Jaeger, H., Roth, A., Toepfl, S., Holzhauser, T., Engel, K. H., Knorr, D., Rudi F. Vogel, R. F., Bandick, N., Kulling, S., Heinz, Volker., & Steinberg, P. (2016). Opinion on the use of ohmic heating for the treatment of foods. *Trends in Food Science & Technology*, 55, 84-97. Doi:10.1016/j.tifs.2016.07.007.

- Kanjanapongkul, K. (2017). Rice cooking using ohmic heating: Determination of electrical conductivity, water diffusion and cooking energy. *Journal of Food Engineering*, 192, 1-10. Doi:10.1016/j.jfoodeng.2016.07.014.
- Kautkar, S., Pandey, R. K., Richa, R., & Kothakota, A. (2015). Temperature dependent electrical conductivities of ginger paste during ohmic heating. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 8(1), 21-27. DOI:10.5958/2230-732X.2015.00003.0.
- Kim, S. S., Choi, W., & Kang, D. H. (2017). Application of low frequency pulsed ohmic heating for inactivation of foodborne pathogens and MS-2 phage in buffered peptone water and tomato juice. *Food Microbiology*, 63, 22-27. Doi:10.1016/j.fm.2016.10.021.
- Kubo, M. T., Siguemoto, É. S., Funcia, E. S., Augusto, P. E., Curet, S., Boillereaux, L., Sastry, S. K., & Gut, J. A. (2020). Non-thermal effects of microwave and ohmic processing on microbial and enzyme inactivation: a critical review. *Current Opinion in Food Science*, 35, 36-48. Doi:10.1016/j.cofs.2020.01.004.
- Li, F. D., Li, L. T., Li, Z., & Tatsumi, E. (2004). Determination of starch gelatinization temperature by ohmic heating. *Journal of Food Engineering*, 62(2), 113-120. Doi:10.1016/S0260-8774(03)00199-7.
- Nelson, S. O., & Bartley, P. Jr. (2000). Measuring frequency-and temperature-dependent dielectric properties of food materials. *Transactions of the ASAE*, 43, 1733-1736. Doi: 10.13031/2013.3075.
- Palaniappan, S., & Sastry, S. K. (1991). Electrical conductivity of selected juices: influences of temperature, solids content, applied voltage, and particle size. *Journal of Food Process Engineering*, 14(4), 247-260. Doi:10.1111/j.1745-4530.1991.tb00135.x.
- Saberian, H., Hamidi-Esfahani, Z., Ahmadi Gavlighi, H., & Barzegar, M. (2017). Optimization of pectin extraction from orange juice waste assisted by ohmic heating. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 117, 154-161. Doi:10.1016/j.cep.2017.03.025
- Samprovalaki, K., Bakalis, S., & Fryer, P. J. (2007). *Ohmic heating: models and measurements*. In: Yanniotis, S. and B, Sunden (Eds) *Heat transfer in food processing*. WIT Press. Southampton, 159-186.
- Sarang, S., Sastry, S. K., & Knipe, L. (2008). Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. *Journal of Food Engineering*, 87, 351-356. Doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.12.012.
- Shynkaryk, M. V., Ji, T., Alvarez, V. B., & Sastry, S. K. (2010). Ohmic heating of peaches in the wide range of frequencies (50 Hz to 1 MHz). *Journal of Food Science*, 75(7), E493-E500. Doi: 10.1111/j.1750-3841.2010.01778.x.
- Srivastava, G., Das, C. K., Das, A., Singh, S. K., Roy, M., Kim, H., Sethy, N., Kumar, A., Sharma, R. K., Singh, S. K., Philip, D., & Das, M. (2014). Seed treatment with iron pyrite (FeS<sub>2</sub>) nanoparticles increases the production of spinach. *RSC Advances*, 4(102), 58495-58504. Doi:10.1039/C4RA06861K.
- Threlfall, R. T., Morris, J. R., Howard, L. R., Brownmiller, C. R., & Walker, T. L. (2005). Pressing effects on yield, quality, and nutraceutical content of juice, seeds, and skins from black beauty and sunbelt grapes. *Journal of Food Science*, 70, S167-S171. Doi:10.1111/j.1365-2621.2005.tb07152.x.
- Torkian Boldaji, M. T., Borghae, A. M., Beheshti, B., & Hosseini, S. E. (2017). Investigation of voltage gradient and electrode type effects on processing time, energy consumption and product quality in production of Tomato Paste by ohmic heating. *Journal of Agricultural Machinery*, 7, 152-164. Doi: 10.22067/Jam.V7i1.47150.

- Vahedi Torshizi, M. V., Azadbakht, M., & Kashaninejad, M. (2021). Investigation of some energy and exergy factors during ohmic heating processing of sour orange. *Journal of Agricultural Machinery*, 11(2), 435-445. Doi:10.22067/jam.v11i2.80760. (in Persian)
- Weber, F., & Larsen, L. R. (2017). Influence of fruit juice processing on anthocyanin stability. *Food Research International*, 100, 354-365. Doi:10.1016/j.foodres.2017.06.033.
- Zhu, S. M., Zareifard, M. R., Chen, C. R., Marcotte, M., & Grabowski, S. (2010). Electrical conductivity of particle–fluid mixtures in ohmic heating: Measurement and simulation. *Food Research International*, 43(6), 1666-1672. Doi:10.1016/j.foodres.2010.05.009.

## Research Paper

# Investigation and Evaluation of Engineering Characteristics of Ohmic Process System During the Button Mushroom Cooking Process

**M. Qavanloo, M. Azadbakht\*, F. Varasteh and M. Vahedi Torshizi**

\*Corresponding Author: Associate Professor, Department of Bio-System Mechanical Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: [azadbakht@gau.ac.ir](mailto:azadbakht@gau.ac.ir)

Received: 27 January 2023, Accepted: 21 May 2023

[http://doi: 10.22092/AMSR.2023.361338.1440](http://doi:10.22092/AMSR.2023.361338.1440)

### Abstract

In this research, for cooking of mushrooms, an ohmic heating device was used to evaluate the performance of the ohmic system in three voltage gradients (7.5, 9.25 and 11.5 V/cm), three types of electrodes (steel, brass and aluminum) and three concentrations of the ohmic solution, 20 ml of water and three amounts of salt (1, 2 and 3g). Also, in this process, the input current, electrical conductivity coefficient and system performance coefficient during the mushroom cooking process were calculated and the obtained data were analyzed using statistical software. Results showed that all three factors of voltage gradient, electrode type and solution concentration had a significant effect on the investigated factors and the greatest effect was shown in voltage gradient and then the electrode type and ohmic solution concentration had a significant effect on the input current factors, electrical conductivity coefficient and system performance coefficient. Based on results, it can be stated that the best type of electrode used is aluminum electrode and the best concentration is 3 grams of salt and 20 milliliters of water. The highest values of input current, electrical conductivity coefficient and performance coefficient are obtained in this concentration with this electrode.

**Keywords:** Electrode type, Solution Concentration, Thermodynamic Properties, Voltage Gradient



© 2022 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)