

## بررسی اثر گرادیان ولتاژ و نوع الکتروود بر زمان فرآیند، انرژی مصرفی و کیفیت محصول در تولید رب گوجه‌فرنگی به روش گرمایش اهمی

مهدی ترکیان بلداجی<sup>۱</sup> - علی محمد برقی<sup>۲\*</sup> - بابک بهشتی<sup>۳</sup> - سید ابراهیم حسینی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۷

### چکیده

گرمایش اهمی یک روش جدید در فرآوری مواد غذایی است که در آن از جریان الکتریکی برای ایجاد گرما استفاده می‌شود. گرادیان ولتاژ اعمال شده و نوع الکتروود نقش به‌سزایی در این سامانه دارد. در این تحقیق اثر گرادیان ولتاژ و نوع الکتروود در گرمایش اهمی رب گوجه‌فرنگی بر زمان گرمایش، میزان مصرف انرژی و کیفیت محصول مورد بررسی قرار گرفته است. گرادیان‌های ولتاژی  $5, 7, 9$  و  $11$  و چهار نوع الکتروود گرافیت، فولاد ضد زنگ، برنج و آلومینیوم به کار برده شد. نتایج نشان داد که بین میزان مصرف انرژی، زمان گرمایش و کیفیت محصول با گرادیان ولتاژ رابطه معنی‌داری در سطح احتمال  $1\%$  و با نوع الکتروود در سطح احتمال  $5\%$  وجود دارد. همچنین اثر متقابل این دو تیمار بر روی سه فاکتور زمان، انرژی مصرفی و کیفیت محصول معنی‌دار بود. کمترین مدت زمان و کمترین مصرف انرژی با الکتروود گرافیتی و در گرادیان ولتاژ  $11 \text{ V cm}^{-1}$  و بیشترین مدت زمان و بیشترین مصرف انرژی در الکتروود آلومینیومی و در گرادیان ولتاژ  $5 \text{ V cm}^{-1}$  مشاهده گردید. اما بهترین کیفیت محصول با الکتروود فولادی ضد زنگ و در گرادیان ولتاژ  $11 \text{ V cm}^{-1}$  به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آلومینیوم، جریان الکتریکی، سلول اهمی، فولاد ضد زنگ، عملکرد، گرافیت

### مقدمه

کشاورزی از فرآیندهای مهم در صنعت فرآوری مواد غذایی هستند که با کاهش فعالیت آبی، موجب پایداری ماده غذایی می‌گردند. (Ghanbarzadeh, 2004)

بر اساس آمارهای سازمان فائو<sup>۷</sup>، تولید سالیانه گوجه‌فرنگی در جهان  $141/400$  میلیون تن بوده و ایران با تولید سالیانه  $5/88$  میلیون تن، رتبه هفتم جهانی تولید این محصول را به خود اختصاص داده است (Fao, 2013). بخش عمده گوجه فرنگی جهان در راستای تولید رب گوجه فرنگی فرآوری و مصرف می‌شود (Valencia et al., 2003). مهمترین روش تولید رب گوجه‌فرنگی در ایران استفاده از دیگ‌های بخار و روش گرمایش هدایتی است که مهم‌ترین عیب این نوع سامانه علاوه بر مصرف انرژی بالا، عدم توزیع یکنواخت گرما در هنگام پخت و پز می‌باشد. این عدم یکنواختی باعث می‌شود که محصول با کیفیت پایین‌تر تولید گردد. همچنین در روش‌های حرارت‌دهی مرسوم (هدایت حرارتی) به دلیل پایین بودن ضریب هدایت حرارتی، دما به صورت یکنواخت در داخل محصول منتشر نشده، لذا زمان فرآوری افزایش می‌یابد و به تبع آن انرژی مصرفی افزایش و کیفیت محصول کاهش پیدا می‌کند. با توجه به نکات ذکر

جمعیت جهان رو به افزایش است و این جمعیت نیاز به غذا دارد و می‌بایست محصولات کشاورزی که معمولاً در فصل کشت (بهار و تابستان) تولید می‌شوند را فرآوری کرد تا بتوان از آن‌ها در فصل‌های دیگر استفاده نمود. علاوه بر این معمولاً محصولات کشاورزی به دلیل واکنش‌های شیمیایی همواره در معرض فساد هستند و امکان نگهداری آن‌ها بدون در نظر گرفتن شرایط مناسب و فرآوری امکان‌پذیر نیست. تغلیظ<sup>۵</sup>، خشک کردن و آبگیری<sup>۶</sup> از محصولات

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران
- ۲- استاد گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران
- \*- نویسنده مسئول: (Email: borghae@ut.ac.ir)
- ۳- استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران
- ۴- استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

DOI: 10.22067/jam.v7i1.47150

5- Concentrate  
6- Dehydration

7- Food and Agriculture Organization of the United Nations

گوشه گاو در محدوده دمایی °C ۲۵ تا ۱۲۵ مورد مطالعه قرار گرفت و بیان گردید که با افزایش دما و گرادیان ولتاژ، ضریب هدایت الکتریکی به طور خطی برای این محصولات افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش گرادیان ولتاژ مدت زمان فرآوری کاهش می‌یابد (Zhu et al., 2010).

در تحقیقی دیگر به بررسی هدایت الکتریکی ترکیب توت‌فرنگی-سیب در محدوده دمایی °C ۲۵ تا ۱۰۰ و گرادیان ولتاژهای ۲۵، ۴۰، ۵۵ و  $70 \text{ V cm}^{-1}$  طی فرآیند گرمایش اهمی پرداخته شد. نتایج حاکی از این بود که با افزایش دما هدایت الکتریکی ترکیب توت‌فرنگی-سیب به صورت خطی افزایش پیدا خواهد کرد (Castro et al., 2002). در مطالعه گرمایش اهمی شیر، بیان گردید که به کارگیری الکتروود فولادی در مقایسه با الکتروود تیتانیوم باعث کاهش قابل توجهی در انرژی مصرفی و مدت زمان گرمایش خواهد شد. همچنین الکتروود فولادی با روکش تیتانیومی دارای خوردگی کمتری نسبت به الکتروودهای فولادی و تیتانیومی می‌باشد (Stancel and Zitny., 2010).

طراحی مؤثر سیستم گرمایش اهمی به ضریب هدایت الکتریکی ماده غذایی وابستگی زیادی دارد و میزان مصرف انرژی به شدت تحت تأثیر گرادیان ولتاژ و ضریب هدایت حرارتی ماده غذا می‌باشد و نوع الکتروود می‌تواند علاوه بر تأثیرگذاری بر روی عملکرد سامانه در کیفیت نهایی محصول تولید شده نیز مؤثر باشد (Sanjay et al., 2008). علاوه بر این نوع الکتروود اثر زیادی بر راندمان حرارتی، انرژی مصرفی و مدت زمان فرآیند گرمایش اهمی دارد (Zell et al., 2009).

هدایت الکتریکی یک ماده غذایی، عکس مقاومت ماده در مقابل عبور جریان الکتریکی از داخل دیواره مولکولی آن می‌باشد. هدایت الکتریکی در مواد غذایی به غلظت و میزان نمک موجود در ماده وابسته است (Icier et al., 2009). در این تحقیق تکنولوژی جدید گرمایش اهمی که در برخی کشورها برای فرآوری مواد غذایی استفاده شده، به منظور کاهش مصرف انرژی و همچنین افزایش کیفیت محصول نهایی مورد بررسی قرار می‌گیرد تا با طراحی و ارزیابی این سامانه، امکان بهروری از انرژی را افزایش داده و همچنین امکان طراحی سامانه‌های کنترلی دقیق، آسان‌تر و امکان پذیرتر شود. اهداف این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱- بررسی تأثیر گرادیان ولتاژ و نوع الکتروود بر انرژی مصرفی، زمان فرآیند و کیفیت محصول
- ۲- تعیین بهترین گرادیان ولتاژ و نوع الکتروود برای تولید رب گوجه‌فرنگی

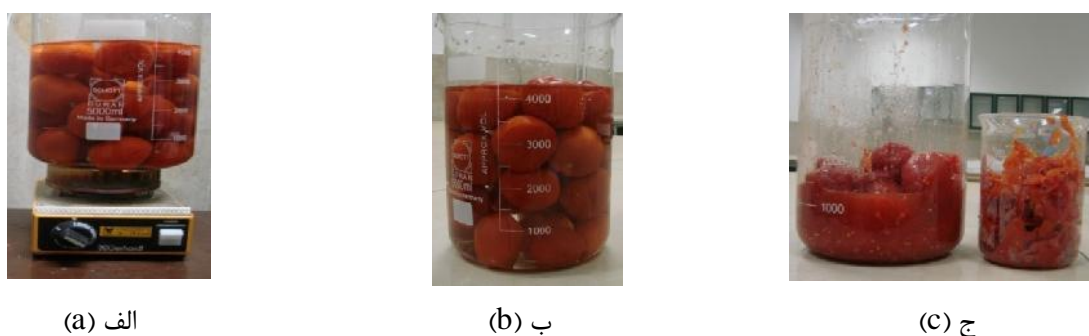
شده، ارائه راه کارهای جدید جهت کاهش مصرفی انرژی همراه با کیفیت بالای محصول امری ضروری است (Chang et al., 2006). گرمایش اهمی یک فرآیند حرارتی است که با عبور جریان متناوب از میان ماده غذایی، منجر به تولید گرما می‌گردد. این سامانه گرمایشی از لحاظ تولید گرما و انتقال حرارت و همچنین از لحاظ توزیع دما که در طول گرمایش اتفاق می‌افتد، با روش‌های مرسوم گرمایش متفاوت است (Castro et al., 2004). مطالعات نشان می‌دهند که این روش دارای یکنواختی حرارتی بسیار بالا، دوست‌دار محیط زیست، راندمان بالا و کنترل آسان نسبت به دیگر روش‌های حرارتی رایج است (Shirsat et al., 2004). مقدار گرمای تولید شده در گرمایش اهمی به طور مستقیم به میزان مقاومت الکتریکی ماده و گرادیان ولتاژ اعمالی بستگی دارد (Bozkurt and Icier., 2009b). استفاده از فرآیند گرمایش اهمی سهم عمده‌ای در کاهش میزان مصرف انرژی داشته و از مناسب‌ترین روش‌های حرارتی جهت به کارگیری در صنعت مواد غذایی، شیمیایی، دارویی و خانگی می‌باشد (Lei et al., 2007).

در سال ۲۰۰۴ پوست‌کنی گوجه‌فرنگی برای تولید رب گوجه و سایر محصولات به روش‌های اسیدی، گرمایشی و همیک، با هم مقایسه گردید و بیان شد که روش اهمی دارای عملکرد بهتری می‌باشد (Pisit wongsa-Ngarsa, 2004).

تحقیقی در خصوص وابستگی بین ضریب هدایت الکتریکی و دما به روش گرمایش اهمی در سال ۲۰۰۵ انجام شد. در این تحقیق خشک کردن پوره زردآلو و هلو به روش گرمایش اهمی در گرادیان‌های ولتاژ بین ۲۰ تا  $70 \text{ V cm}^{-1}$  انجام شد و مشخص گردید که بین ضریب هدایت الکتریکی پوره‌ها و دما یک رابطه خطی برقرار است. همچنین گزارش گردید که عمل جوشش پوره‌ها در بالاترین گرادیان در دمای °C ۶۰ رخ می‌دهد و ضریب هدایت الکتریکی با زیاد شدن دما افزایش می‌یابد. هر چند سرعت تغییرات دما در پوره زردآلو بیشتر از پوره هلو بود. علاوه بر این نشان داده شد که حباب‌های جوشش مایع در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و در گرادیان‌های بالا اتفاق می‌افتد و ضریب هدایت الکتریکی در گرمایش اهمی پارامتر مهمی در طراحی سلول گرمایش است (Icier and Ilicali., 2005a).

در سال ۲۰۰۸ در تحقیقی دیگر به بررسی تأثیر گرمایش اهمی بر فرآوری میوه‌ها پرداخته شد. در این مطالعه تأثیر تغییرات دما بر هدایت الکتریکی شش میوه تازه هلو، سیب‌گلدن، سیب قرمز، توت‌فرنگی و آناناس مورد ارزیابی قرار گرفت. از میوه‌های انتخابی نمونه‌های استوانه‌ای شکل جدا و بین دو الکتروود قرار داده شد. نتایج این تحقیق نشان می‌داد که دما و هدایت الکتریکی با افزایش گرادیان ولتاژ افزایش می‌یابند (Sanjay et al., 2008).

همچنین شبیه‌سازی گرمایش اهمی هویج، سیب زمینی، اسفناج و



شکل ۱- عمل پوست‌کنی گوجه‌فرنگی به روش حمام گرمایش و سرمایش (الف: گرم کردن ب: حمام آب سرد ج: گوجه پوست‌کنده شده)  
**Fig.1.** Peeling of tomato paste by hot-cool method (a: Heating b: Cooling c: Peeled tomato)

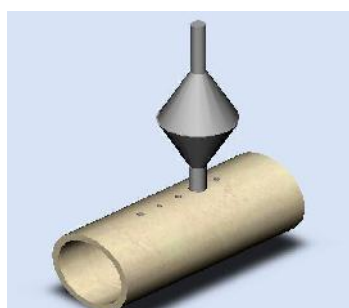
### مواد و روش‌ها

**انتخاب واریته گوجه‌فرنگی:** به‌منظور تولید رب از گوجه‌فرنگی، واریته کال جی ان ۱۳ که جزء بهترین واریته‌های مناسب برای تهیه رب می‌باشد، استفاده گردید. این واریته از گلخانه‌های اطراف شهرستان ورامین تهیه گردید.

**آماده‌سازی پوره:** ابتدا عمل پوست‌کنی گوجه‌فرنگی به روش تیمار گرمایش و سرمایش (مطابق شکل ۱ ابتدا گوجه‌فرنگی‌ها در آب داغ قرار داده می‌شوند، سپس بلافاصله گوجه‌فرنگی‌ها از حمام داغ به حمام آب سرد انتقال می‌یابند. بر اثر این تنش حرارتی پوست گوجه‌فرنگی ترک برداشته و به‌راحتی از میوه جدا می‌گردد) انجام شد. سپس به‌منظور تهیه مخلوط همگن از یک همزن مکانیکی (made in Germany IKA Eurostar power control-visc 6000) استفاده شد و با دور ۵۰۰ rpm پالپ گوجه‌فرنگی به‌هم زده شد تا یک محلول یکنواخت به نام پوره به‌دست آید. به‌منظور جداسازی دانه، پوره از صافی با مش ۱ mm عبور داده شد. در مرحله بعد به پوره تولید شده نمک خوراکی (کلرید سدیم) به‌میزان یک درصد وزنی اضافه شد. این میزان نمک با توجه به‌میزان استاندارد در صنعت رب گوجه‌فرنگی انتخاب گردید (Hosainpour *et al.*, 2013).

### ساخت سیستم گرمایش اهمی

بدنه سلول گرمایش اهمی از جنس تفلون و به شکل یک استوانه توخالی ساخته شد. قطر داخلی استوانه ۵۰ mm و طول آن ۱۰۰ mm در نظر گرفته شد. بر روی بدنه دو سوراخ به قطر ۱۰ mm و سه سوراخ به قطر ۴ mm ایجاد گردید. سوراخ‌های ۴ میلی‌متری جهت قرارگیری ترموکوپل تعبیه شدند. یکی از سوراخ‌های ۱۰ میلی‌متری برای نصب برجک بخار و دیگری به‌منظور وارد کردن ماده غذایی به داخل سلول مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۲).

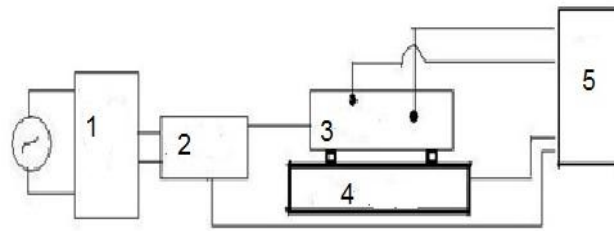


شکل ۲- طرح‌واره‌ی بدنه سلول گرمایش اهمی  
**Fig. 2.** A schematic of ohmic heating cell used in this study

الکترودهای به‌کار رفته در این سامانه از جنس‌های استیل زنگ‌زن، آلومینیوم، برنج و گرافیت و مطابق شکل ۳ به‌صورت استوانه استوانه با قطر ۵۰ mm و به ضخامت ۳ mm در نظر گرفته شد.



شکل ۳- نمونه شکل الکتروود استفاده شده در این تحقیق  
**Fig. 3.** A shape of electrode used in this study



**شکل ۴- طرح‌واره سامانه گرمایش اهمی:** ۱- رگلاتور ولتاژ ۲- پاور آنالیزور ۳- سلول اهمی ۴- ترازوی دیجیتالی ۵- کامپیوتر  
**Fig. 4.** A schematic of ohmic heating: 1- Voltage regulator 2- Power analyzer 3- Ohmic cell 4- Digital balance 5- pc

۱۰۰ میلی‌متری بین دو الکتروود گرادیان ولتاژهای اعمالی ۵، ۷، ۹ و  $11\text{ V cm}^{-1}$  به‌دست‌آمد.

$$W = \frac{V}{d} \quad (1)$$

$\nabla V$ : گرادیان ولتاژ ( $\text{V m}^{-1}$  یا  $\text{V cm}^{-1}$ )،  $V$ : ولتاژ (V) و  $d$ : فاصله بین دو الکتروود برحسب m یا cm.

برای تولید رب می‌بایست رطوبت پوره که ۹۱٪ (wt) به‌دست آمده را به میزان ۷۰٪ بر پایه تر رساند تا ربی با کیفیت تولید شود (Hosainpour et al., 2013). بعد از اعمال ولتاژ دمای سلول رو به افزایش می‌گذارد و سریعاً به ۹۳-۹۱ درجه سلسیوس می‌رسد و پوره شروع به جوشش کرده و رطوبت خود را از دست می‌دهد. تولید رب به روش اهمی در ولتاژهای مختلف و با الکتروودهای مختلف در سه تکرار انجام شد و داده‌های: زمان، دمای پوره، ولتاژ، شدت جریان، وات مصرفی، شاخص رنگی  $a/b$  و  $E$  و وزن نمونه‌ها ثبت گردید.

### اندازه‌گیری هدایت الکتریکی

مطابق رابطه (۲) هدایت الکتریکی مواد غذایی از روابط بین ولتاژ و جریان به‌دست می‌آید که معکوس مقاومت ویژه رسانا است (Icier et al., 2009).

$$\sigma = \frac{LI}{VA} \quad (2)$$

: هدایت الکتریکی ( $\text{S m}^{-1}$ )؛  $V$ : ولتاژ بر حسب ولت (V)؛  $I$ : شدت جریان بر حسب آمپر (A)؛  $L$ : فاصله بین الکتروود برحسب متر (m)؛  $A$ : مساحت مقطع مؤثر الکتروود برحسب متر مربع ( $\text{m}^2$ ). ولتاژهای ورودی و آمپر در حین انجام آزمایشات اهمی توسط پاور آنالیزور ثبت شده و سطح مؤثر نیز براساس تغییرات جرم نسبت به زمان و چگالی پوره محاسبه شد.

حجم مؤثر سلول  $196/25\text{ cm}^3$  بود. برای اندازه‌گیری دما در داخل سلول گرمایش اهمی از ترمومتر مدل Dual input RTD 804U (ساخت کشور تایلند) استفاده شد. همچنین به‌منظور تبدیل ولتاژ ۲۲۰ ولت (ولتاژ رایج در شبکه برقی ایران) به ولتاژهای مورد نیاز از دستگاه رگولاتور ولتاژ (واریاک) ساخت شرکت امرسان ایران استفاده گردید. برای ثبت داده‌هایی مانند شدت جریان، ولتاژ، توان مصرفی و اختلاف فاز از دستگاه پاور آنالیزور<sup>۱</sup> طراحی شده توسط محقق استفاده شد و همچنین برای ثبت داده در رایانه، نرم افزار لب ویو<sup>۲</sup> و کارت دک<sup>۳</sup> (USB DAQ V3.0) ساخت شرکت کنترل دیجیتال نوین ایران) به‌کار گرفته شد. از یک ترازوی دیجیتالی مدل GF-6000 با دقت ۰/۰۱ گرم برای ثبت تغییرات وزن در حین انجام پروسه گرمایشی استفاده شد. طرح‌واره سامانه گرمایش اهمی به‌کار برده شده در شکل ۴ نشان داده شده است.

### اندازه‌گیری رطوبت پوره گوجه‌فرنگی

به‌منظور اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌ها از روش آون استفاده شد. بدین منظور ابتدا نمونه وزن گردید. سپس در داخل آون در دمای  $110^\circ\text{C}$  قرار داده شد تا به وزن ثابت برسد (Darvishi et al., 2012; Hosainpour et al., 2013). سپس مجدداً نمونه خشک شده وزن گردید و رطوبت نمونه محاسبه شد. دستگاه آون مورد استفاده مدل Memmert, Beshickung-Loading Model 100-800 ساخت کشور آلمان بود.

### تولید رب به کمک سامانه گرمایش اهمی

ابتدا سامانه گرمایش اهمی به‌صورت شکل ۵ آماده گردید. حجم داخلی سلول به‌میزان ۱۰۰ سی‌سی از پوره پر شده و ولتاژهای ۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ ولت به سلول اعمال شد. با توجه به رابطه (۱) و فاصله

1- Power Analyzer  
 2- Labview 2011  
 3- Data Acquisition



شکل ۵- مجموعه سامانه گرمایش اهمی

Fig.5. Ohmic heating setup

### محاسبات انرژی

توان الکتریکی مصرف شده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود و یکای آن  $J s^{-1}$  معادل یک وات (W) می‌باشد.

$$P = RI^2 = \frac{V^2}{R} = VI \quad (3)$$

$V$ : ولتاژ بر حسب ولت (V)،  $I$ : شدت جریان بر حسب آمپر (A)  
 $P$ : توان الکتریکی (W)

مقدار انرژی مصرفی (E) از رابطه (۴) قابل محاسبه است.

$$E = Pt = RI^2t = \frac{V^2}{R}t = Vit \quad (4)$$

همچنین انرژی داده شده به سیستم طبق رابطه ارائه شده توسط آیسیر و همکاران در سال ۲۰۰۵ براساس رابطه (۵) و (۶) محاسبه می‌شود (Icier and Ilicali, 2005):

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

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

در رابطه (۵)،  $E_{given}$ : انرژی داده شده به سیستم،  $E_{taken}$ : انرژی جذب شده توسط سیستم،  $E_{loss}$ : انرژی اتلافی یا از دست رفته در سیستم،  $t$ : زمان (s)،  $m$ : جرم آب موجود (kg)،  $c_p$ : ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت ( $J kg^{-1} K^{-1}$ )،  $T_f$ : دمای نهایی نمونه ( $^{\circ}C$ ) و بالاخره  $T_i$ : دمای اولیه نمونه ( $^{\circ}C$ ).

انرژی اتلافی سیستم شامل مجموع انرژی لازم برای افزایش دمای سلول، انرژی اتلافی به محیط از طریق جابه‌جایی و انرژی الکتریکی که در داخل الکتروود به حرارت تبدیل می‌شود و از دست می‌رود، می‌باشد (Icier and Ilicali, 2005).

### اندازه‌گیری کیفیت محصول

پارامتر رنگ یکی از ویژگی‌های مهم در تولید رب گوجه‌فرنگی می‌باشد. به طوری که این محصول براساس رنگ آن ارزیابی و تجارت می‌گردد (Mazaheri Tehrani *et al.*, 2009; Dolores Rodrigo *et al.*, 2007). برای به دست آوردن رنگ محصول و همچنین مقایسه محصول به دست آمده از تیمارهای مختلف با یکدیگر، از فضای رنگی

$L^*a^*b^*$  استفاده گردید. برای به دست آوردن پارامترهای  $L^*$  (روشنایی)،  $a^*$  (میزان قرمزی-سبزی) و  $b^*$  (میزان زردی-آبی) از رنگ‌سنج مدل (Lutron 1200lab) ساخت کشور تایوان استفاده شد. دو شاخصه مهم برای ارزیابی کیفیت رب گوجه‌فرنگی عبارتند از  $a^*$  و  $b^*$ . برای محاسبه  $E$  می‌توان از رابطه (۷) استفاده کرد (Dolores Rodrigo *et al.*, 2007).

$$\Delta E = \sqrt{(a - a_0)^2 + (b - b_0)^2 + (L - L_0)^2} \quad (7)$$

که در آن  $L_0$ ،  $b_0$ ،  $a_0$  پارامترهای رنگی محصول اولیه و  $a$ ،  $b$  و  $L$  پارامترهای رنگی محصول تولید شده می‌باشد.

قابل ذکر است که خشک کردن پوره گوجه‌فرنگی در آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در ۴ گرادیان ولتاژ و ۴ الکتروود مختلف در سه تکرار صورت گرفت و پارامترهایی نظیر مدت زمان فرآیند، انرژی مصرفی و شاخص رنگی اندازه‌گیری شد. برای تعیین معنی‌دار بودن اختلاف‌ها و مقایسه میانگین‌ها از روش آزمون دانکن استفاده شد و تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS 2013 انجام گردید.

### نتایج و بحث

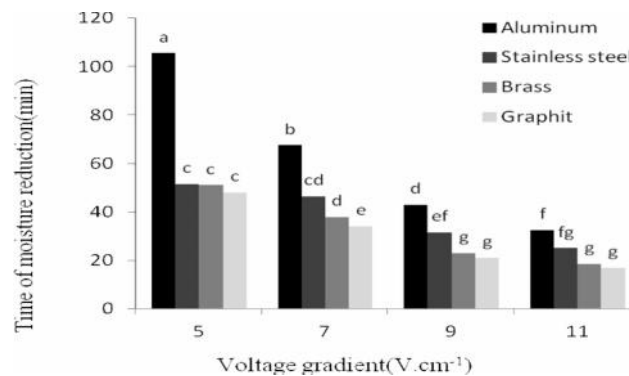
#### اثر متقابل الکتروود و گرادیان ولتاژ بر روی مدت زمان فرآیند

در شکل ۶ مدت زمان کاهش رطوبت برای الکتروودهای مختلف در گرادیان‌های ولتاژی متفاوت در غلظت نمک ۱w/w٪ نشان داده شده است. اثر متقابل دو تیمار الکتروود و گرادیان ولتاژ بر روی مدت زمان کاهش رطوبت در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار می‌باشد.

جدول ۱- تیمارهای استفاده شده در این تحقیق و سطوح آنها

Table 1- Examined treatments in this study

تیمار				گرادیان ولتاژ (Voltage gradient) (Vcm <sup>-1</sup> )			
نوع الکترود (Electrod type)		نوع الکترود (Electrod type)		11	9	7	5
آلومینیوم	فولاد زنگ نزن	برنج	گرافیت				
Aluminum	Stainless steel	Brass	Graphite				



شکل ۶- اثر متقابل گرادیان ولتاژ و نوع الکترود بر مدت زمان کاهش رطوبت  
 Fig.6. Interaction of voltage gradients and electrode type on moisture reduction time

ولتاژ (V m<sup>-1</sup> یا V cm<sup>-1</sup>). در گرادیان ۵ V cm<sup>-1</sup> تفاوت معنی داری بین الکترودهای گرافیتی، برنجی و فولادی دیده نشد. در واقع به دلیل ولتاژ اعمالی کم و همچنین نزدیکی هدایت الکتریکی الکترودها تفاوت اساسی وجود ندارد، اما الکترود آلومینیوم به دلیل جرم گرفتی دارای مدت زمان فرآوری بیشتری بود. علاوه بر این الکترود گرافیتی در گرادیان ولتاژ ۵ V cm<sup>-1</sup> عملکردی مشابه الکترود فولادی در گرادیان ولتاژ ۷ V cm<sup>-1</sup> دارد. این می تواند به دلیل اختلاف هدایت الکتریکی دو الکترود باشد. از آنجایی که گرافیت هدایت الکتریکی بهتری نسبت به فولاد دارد، لذا می تواند انتقال جریان الکتریکی را بهتر انجام دهد. برای جبران این پدیده در الکترود فولادی مجبوریم از گرادیان ولتاژ بالاتری استفاده کنیم. این پدیده در گرادیان ولتاژی دیگر نیز مشاهده شده است. به عنوان مثال الکترود برنجی در گرادیان ولتاژ ۹ V cm<sup>-1</sup> عملکردی مشابه به الکترود فولادی در گرادیان ولتاژ ۱۱ V cm<sup>-1</sup> دارد. با افزایش گرادیان ولتاژ عملکرد الکترودها بیشتر به هم نزدیک می شود. این پدیده را می توان در شدت تشکیل رسوب حاصل از گرمایش اهمی روی الکترودها و همچنین افزایش خوردگی در سطح الکترودها که منجر به کاهش هدایت الکتریکی آنها می شود، جستجو کرد. با اینکه الکترود استیل ضد زنگ هدایت کمتری نسبت به گرافیت دارد، ولی به دلیل افزایش خوردگی سطحی الکترود گرافیتی هدایت الکتریکی آن کاهش یافته، لذا در گرادیان ولتاژی بالا اختلاف

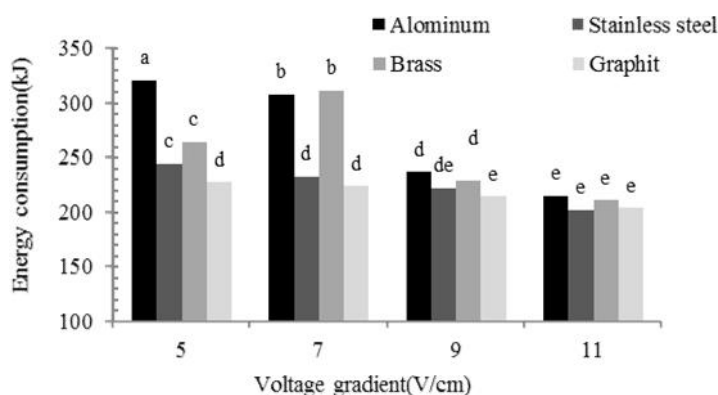
در همه گرادیان های ولتاژی، الکترود گرافیتی کمترین مدت زمان فرآیند را دارا می باشد و بعد از آن به ترتیب الکترود برنجی و فولاد زنگ نزن قرار می گیرند و در انتها الکترود آلومینیومی قرار دارد. کمترین مدت زمان در گرادیان ولتاژ ۱۱ V cm<sup>-1</sup> با الکترود گرافیتی به مدت ۱۷ دقیقه و بیشترین مدت زمان در الکترود آلومینیومی و در گرادیان ولتاژ ۵ V cm<sup>-1</sup> به میزان ۱۰۵/۶ دقیقه مشاهده گردید. یکی از مشکلات استفاده از سامانه گرمایش اهمی در پاستوریزاسیون شیر رسوب مواد جامد بر روی الکترودهاست که این امر موجب بروز مشکلاتی از جمله سوختگی مواد غذایی در اطراف الکترود و کاهش رسانایی الکترود می گردد که در نتیجه آن مدت زمان فرآیند نیز افزایش می یابد (Bansal et al., 2005). در اینجا نیز به دلیل رسوب مواد غذایی بر روی الکترود آلومینیومی رسانش آن کم شده در نتیجه مدت زمان فرآوری با الکترود آلومینیوم افزایش یافته است. از طرف دیگر با توجه به رابطه (۸) با افزایش ولتاژ اعمال شده به ماده غذایی مقدار انرژی تبدیل شده به گرما افزایش یافته و با افزایش گرمای تولیدی، شدت تخییر افزایش و به تبع آن مدت زمان انجام فرآیند کاهش می یابد (Assiry et al., 2010).

$$u = \dagger \times \nabla V^2 \quad (8)$$

: نرخ تولید گرما، σ: هدایت الکتریکی (s m<sup>-1</sup>)، ∇V: گرادیان

### اثر متقابل الکتروود و گرادیان ولتاژ بر روی انرژی مصرفی

اثر متقابل دو تیمار الکتروود و گرادیان ولتاژ بر انرژی مصرفی در سطح ۵٪ معنی‌دار است. در شکل ۸ ملاحظه می‌گردد که در تمامی الکتروودها با افزایش گرادیان ولتاژ انرژی مصرفی کاهش پیدا می‌کند. بیشترین میزان انرژی مصرفی مربوط به الکتروود آلومینیوم در گرادیان ولتاژی  $5 \text{ V cm}^{-1}$  اتفاق افتاد که برابر با  $321 \text{ kJ}$  به‌دست آمد. و کمترین انرژی مصرفی در الکتروود گرافیتی و با گرادیان ولتاژی  $11 \text{ V cm}^{-1}$  روی داد که مقدار آن  $203/85/12 \text{ kJ}$  محاسبه گردید (شکل ۸).



شکل ۸- اثر گرادیان ولتاژ در الکتروودهای مختلف بر انرژی مصرفی

Fig.8. Interaction of voltage gradients and electrode type on energy consumption

مصرفی سامانه از  $7/5 \text{ kJ}$  به  $4/9 \text{ kJ}$  کاهش می‌یابد (Darvishi *et al.*, 2012). اسیسیر و همکاران در فرآوری پوره هلو و زردآلو به روش گرمایش اهمی بیان داشتند که با افزایش گرادیان ولتاژ انرژی مصرفی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (Icier *et al.*, 2005). اسیسیری 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 (Assiry *et al.*, 2010). زل و همکاران در فرآوری گوشت قرمز به نتایج مشابهی دست یافتند (Zell *et al.*, 2010). در پژوهشی دیگر بیان شد که با افزایش گرادیان ولتاژ هدایت الکتریکی میوه‌جات بهبود پیدا می‌کند و در نتیجه آن انرژی مصرفی کاهش می‌یابد. ولی در مورد گوشت با افزایش درصد چربی گوشت میزان هدایت الکتریکی کاهش و در نتیجه انرژی مصرفی افزایش می‌یابد (Sanjay sarang *et al.*, 2008).

اسیسیری و همکاران بیان کردند که استفاده از الکتروودهای تیتانیوم به دلیل واکنش کمتر طی فرآیند شیمیایی باعث افزایش کیفیت محصول و کاهش انرژی مصرفی می‌گردد (Assiry *et al.*, 2010).

معنی‌داری بین دو الکتروود مشاهده نمی‌شود. اسیسیر و همکاران اثر گرادیان‌های ولتاژی مختلف را در فرآوری پوره میوه‌جات مختلف مورد مطالعه قرار دادند. آنها بیان داشتند که با افزایش گرادیان ولتاژ مدت زمان فرآوری به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا می‌کند (Icier and Ilicali, 2005).

درویشی و همکاران برای فرآوری آب انار از چهار سطح گرادیان ولتاژی ۳۰، ۳۵، ۴۵ و  $55 \text{ V cm}^{-1}$  بهره بردند و بیان داشتند که با افزایش گرادیان ولتاژی زمان فرآوری کاهش می‌یابد (Darvishi *et al.*, 2012). کاسترو و همکاران گرادیان‌های ولتاژی ۲۵، ۴۰، ۵۵ و  $70 \text{ V cm}^{-1}$  را برای فرآوری هویج استفاده نمودند و نتایج مشابهی را گزارش کردند (Castro *et al.*, 2004).

در گرادیان ولتاژ  $5 \text{ V cm}^{-1}$  الکتروود گرافیتی عملکرد مناسبی دارد و در کل می‌توان بیان داشت که الکتروود گرافیتی به‌طور متوسط عملکرد بهتری در زمینه میزان مصرف انرژی نسبت به بقیه الکتروودها دارد و الکتروود آلومینیومی عملکرد مناسبی ندارد. با افزایش گرادیان ولتاژ عملکرد الکتروودها شبیه به هم می‌شود. زیرا با افزایش گرادیان ولتاژ، شدت توان مصرفی در الکتروودها افزایش می‌یابد و شتاب این افزایش برای الکتروودهای مختلف متفاوت است. به‌همین دلیل به‌عنوان مثال تفاوت معنی‌داری بین مصرف انرژی در الکتروود فولاد در دو گرادیان ولتاژ ۷ و  $9 \text{ V cm}^{-1}$  دیده نمی‌شود. و یا به‌همین دلیل تفاوتی بین دو الکتروود آلومینیومی و گرافیتی در دو گرادیان ولتاژ ۹ و  $11 \text{ V cm}^{-1}$  وجود ندارد. در گرادیان ولتاژ بالاتر الکتروودها عملکرد مشابه دارند که نشان می‌دهد برای انتخاب الکتروود پارامترهای دیگری مانند خوردگی الکتروود و کیفیت محصول تولید شده باید مد نظر قرار بگیرند. درویشی و همکاران گزارش کردند که با افزایش گرادیان ولتاژ انرژی مصرفی سامانه به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد به‌طوری‌که با افزایش گرادیان ولتاژ از ۳۰ به  $50 \text{ V cm}^{-1}$  انرژی

آنکیت و همکاران اثر فرآیندهای حرارتی و همچنین فرآیندهای فشار بالا بر روی خواص پوره گوجه‌فرنگی و هویج را مورد بررسی قرار دادند و بیان داشتند نوع عملیات حرارتی اثر معنی‌داری بر روی خواص رنگی از جمله  $a$ ،  $L$  و  $b$  دارد (Ankit *et al.*, 2009). در تحقیقی دیگر بیان گردید که با افزایش مدت زمانی پاستوریزه کردن رب گوجه‌فرنگی در هریک از دماهای ۹۰، ۹۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد شاخص رنگی  $E$  افزایش می‌یابد. به طوری که افزایش مدت زمان ۵ دقیقه گرمایش رب گوجه‌فرنگی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد باعث افزایش شاخص رنگی  $E$  به میزان ۱/۲ برابر می‌شود (Zanoni *et al.*, 2003).

دولورس رودریگو و همکاران بیان داشتند که هم مدت زمان عملیات حرارتی و هم درجه حرارت فرآیند بر روی شاخص‌های رنگی رب گوجه تولیدی تأثیرگذار است. به طوری که با کاهش مدت زمان فرآیند و همچنین افزایش سرعت رسیدن به دمای نهایی فرآوری، شاخص‌های  $a$  و  $L$  کاهش می‌یابد (Dolores Rodrigo *et al.*, 2007).

### نتیجه‌گیری

برای تولید رب گوجه‌فرنگی بایستی رطوبت ۹۱ درصد پوره به ۷۰ درصد کاهش پیدا کند. مشاهده می‌شود که با افزایش گرادیان ولتاژ از ۵ به  $11V\ cm^{-1}$  مدت زمان لازم برای کاهش این میزان رطوبت به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که اثر متقابل این دو تیمار گرادیان ولتاژ و نوع الکتروود، بر مدت زمان فرآیند معنی‌دار است. کمترین مدت زمان در گرادیان ولتاژی  $11V\ cm^{-1}$  با الکتروود گرافیتی به مدت ۱۷ دقیقه و بیشترین مدت زمان با الکتروود آلومینیومی و گرادیان ولتاژ  $5V\ cm^{-1}$  به میزان ۱۰۵/۶ دقیقه به دست آمد.

با افزایش گرادیان ولتاژ میزان مصرف انرژی به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. علاوه بر این نوع الکتروود نیز در سطح اثر معنی‌داری بر انرژی مصرفی دارد که این می‌تواند به دلیل خواص الکتریکی الکتروود و برهم‌کنش بین الکتروود و ماده غذایی باشد. اثر متقابل این دو تیمار بر انرژی مصرفی نیز معنی‌دار است. به طوری که بیشترین انرژی مصرفی در الکتروود آلومینیومی در گرادیان ولتاژ  $5V\ cm^{-1}$  به میزان  $321kJ$  و کمترین انرژی مصرفی در الکتروود گرافیتی با گرادیان ولتاژ  $11V\ cm^{-1}$  به میزان  $203/85kJ$  مشاهده گردید. دو شاخص رنگی  $a/b$  و  $E$  به عنوان ارزیابی کیفیت محصول مورد بررسی قرار گرفت. اثر متقابل تیمارهای مورد مطالعه روی این دو شاخص کیفی معنی‌دار است. انتخاب بهترین تیمار براساس کمترین انرژی مصرفی و بهترین کیفیت محصول انجام می‌گیرد. با توجه به این که در تولید محصولات کشاورزی کیفیت شاخص بسیار مهمی

در تحقیقی دیگر، توان مصرفی در سامانه گرمایش اهمی با الکتروودهای مختلف مورد بررسی قرار داده شد. آنها نشان دادند که در سامانه گرمایش اهمی با الکتروود فولاد زنگ نزن توان مصرفی با افزایش غلظت نمک کاهش می‌یابد (Alhussien *et al.*, 2006). در تحقیقی دیگر سه نوع الکتروود فولاد زنگ نزن، آلومینیوم و تیتانیوم با روکش پلاتینی مورد بررسی قرار گرفت و بیان گردید علاوه بر نوع الکتروود، ابعاد و ضخامت الکتروود نیز بر انرژی مصرفی تأثیرگذار است و مشخص گردید که الکتروود تیتانیوم با روکش پلاتینی عملکرد بهتری نسبت به سایر الکتروودها دارد (Zell *et al.*, 2011). دی‌آلویز و همکاران نوع الکتروود را یکی از عوامل تأثیرگذار در گرمایش اهمی معرفی کرد و نشان دادند که با افزایش هدایت الکتریکی الکتروود میزان انرژی هدر رفته در سامانه کاهش و به تبع آن انرژی مصرفی کل نیز کاهش می‌یابد (De Alwies *et al.*, 1990).

### اثر متقابل الکتروود و گرادیان ولتاژ بر روی کیفیت رنگ

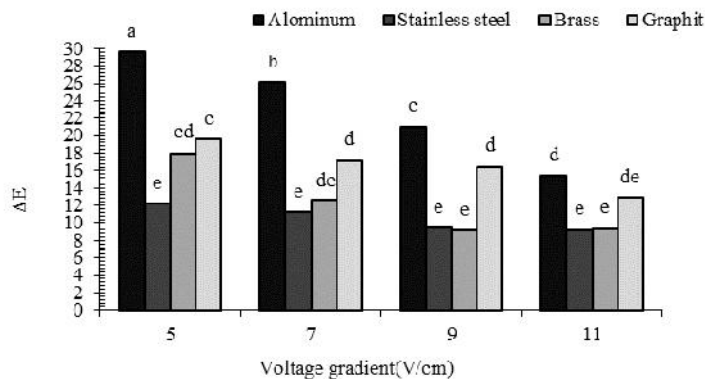
اثر متقابل الکتروود و گرادیان ولتاژ بر روی شاخص  $E$  در شکل ۹ نشان داده شده است ( $sig < 0.01$ ). در گرادیان‌های ولتاژی ۵، ۷ و  $11V\ cm^{-1}$  الکتروود فولادی بهترین عملکرد را دارد. در حالی که در گرادیان ولتاژ  $9V\ cm^{-1}$  الکتروود برنجی کمی بهتر است. خوردگی ایجاد شده در الکتروود گرافیتی و مهاجرت کربن آزاد شده به داخل ماده غذایی باعث گردیده است که تغییرات رنگی به وجود آمده با این الکتروود نسبت به دو الکتروود فولادی و برنجی وضعیت بدتری داشته باشد، هرچند این الکتروود داری مدت زمان فرآیند کمتر می‌باشد. در شکل ۱۰ اثرات متقابل دو تیمار الکتروود و گرادیان ولتاژ بر شاخص رنگی  $a/b$  نشان داده شده است ( $sig < 0.05$ ). با افزایش گرادیان ولتاژ مدت زمان فرآیند کاهش می‌یابد و این امر باعث می‌شود که رنگ قرمز محصول درصد بالاتری داشته باشد. با افزایش رنگ قرمز شاخص رنگی  $a/b$  بهبود می‌یابد.

در بین چهار نوع الکتروود، فولاد زنگ‌نزن بهترین عملکرد را روی شاخص  $a/b$  دارد. مدت زمان کوتاه و همچنین حداقل مهاجرت یون‌های آن به داخل ماده غذایی بر اثر خوردگی کمتر باعث می‌شود که شاخص  $a$  افزایش پیدا کرده و در نتیجه شاخص  $a/b$  افزایش یابد. ملاحظه می‌شود که فولاد ضدزنگ دارای عملکرد خوبی در گرادیان‌های ولتاژی مختلف می‌باشد. اگر دو شاخص  $a/b$  و  $E$  را با هم در نظر بگیریم، الکتروود فولاد زنگ نزن در مجموع عملکرد بهتری از لحاظ کیفیت رنگی دارد. بلقیسی و همکاران گزارش دادند که فرآیندهای حرارتی با مدت زمان زیاد باعث از بین رفتن و تغییر رنگ لیکوپین<sup>۱</sup> موجود در رب گوجه‌فرنگی می‌شود و منجر به تیره شده محصول نهایی می‌گردد (Belghysi and Taslimi, 2008).



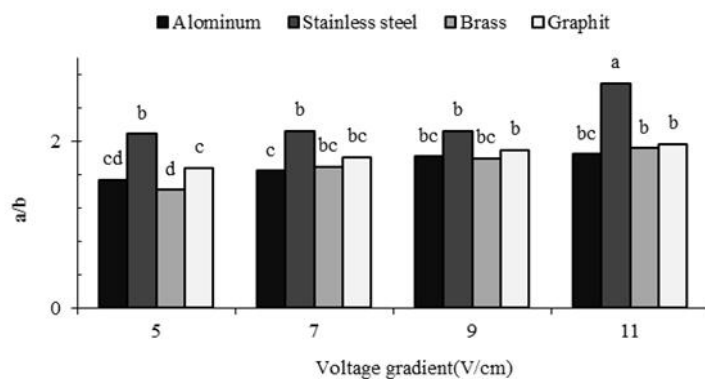
زنگ‌نزن انرژی مصرفی نزدیک به هم دارند. لذا با توجه به عملکرد کیفیتی بهتر الکتروود فولادی با صرف‌نظر از انرژی مصرفی، نسبت به سایر الکتروودها ترجیح داده می‌شود.

است، در صورتی که انرژی مصرفی دو تیمار نزدیک به هم باشد، تیماری که بهترین کیفیت را دارد، ارجحیت دارد. لذا با توجه به این که در گرادیان ولتاژی  $11 \text{ V cm}^{-1}$  دو نوع الکتروود گرافیتی و فولاد



شکل ۹- اثر متقابل الکتروود و گرادیان ولتاژ بر روی شاخص رنگی E

Fig.9. Interaction of electrode type and voltage gradient on E color index



شکل ۱۰- اثر متقابل الکتروود و گرادیان ولتاژ بر روی شاخص a/b

Fig.10. Interaction of electrode type and voltage gradient on a/b index

t: زمان (s)  
 m: جرم آب موجود (kg)  
 $C_p$ : ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )  
 $T_f$ : دمای نهایی نمونه ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_i$ : دمای اولیه نمونه ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 G: سرعت گرمایش ( $^{\circ}\text{C/s}$ )  
 $\nabla V$ : گرادیان ولتاژ ( $\text{V cm}^{-1}$ )  
 : هدایت گرمایی ماده  
 DR: نرخ کاهش رطوبت  
 M: مقدار رطوبت  
 : انرژی گرمایی تولیدشده (J)

#### نمادها:

V ولتاژ (V)  
 d فاصله بین الکتروودها (cm)  
 $\sigma$ : هدایت الکتریکی ( $\text{S m}^{-1}$ )  
 V: ولتاژ بر حسب ولت (v)  
 I: شدت جریان بر حسب آمپر (A)  
 L: فاصله بین الکتروود (m)  
 A: مساحت مقطع مؤثر الکتروود ( $\text{m}^2$ )  
 p: توان الکتریکی (w)  
 $E_{given}$ : انرژی داده شده به سیستم (J)  
 $E_{taken}$ : انرژی جذب شده توسط سیستم (J)  
 $E_{loss}$ : انرژی اتلافی یا از دست رفته در سیستم (J)

## References

1. AlHusseini, M., K. Assiry, S. K. Sastry, and P. Chaminda 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.
2. Patras, A., N. Brunton, S. D. Pieve, F. Butler, and G. Downey. 2009. Effect of thermal and high pressure processing on antioxidant activity and instrumental colour of tomato and carrot purées. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 10: 16-22.
3. Assiry, A. M., S. K. Sastry, and C. Samaranayake. 2010. Influence of temperature, electrical conductivity, power and pH on ascorbic acid degradation kinetics during heating using stainless steel electrodes. *Bioelectrochem* 68: 7-13.
4. Bansal, B., X. D. Chen, and S. X. Q. Lin. 2005. Skim Milk Fouling During Ohmic Heating. ECI Symposium Series, Volume RP2: Proceedings of 6<sup>th</sup> 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, KlosterIrsee, Germany, June 5-10.
5. Belghysi, S., and A. Taslimi. 2008. Effects of processing on tomato linchpin. Eighteen national Conference of food science and industrial, Iran, Mashhad.
6. Bozkurt, H., and F. Icier. 2009b. Electrical conductivity changes of minced beef-fat blends during ohmic cooking. *Journal of Food Engineering* 96: 86-92.
7. Castro, I., J. A. Teixeira, S. Salengke, S. K. Sastry, and A. A. Vicente. 2004. Ohmic heating of strawberry products: electrical conductivity measurements and ascorbic acid degradation kinetics. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 5: 27-36.
8. Castro, I., O. Gonc alves, J. A. Teixeira, and A. A. Vicente. 2002. Comparative study between Selva strawberries and other varieties for industrialization. *Journal of Food Science* (forthcoming).
9. Chang, C. H., H. Y. Lin, C. Y. Chang, and Y. C. Liu. 2006. Comparisons on the antioxidant properties of fresh, freeze-dried and hot-air-dried tomatoes. *Journal of Food Engineering* 77: 478-485.
10. Darvishi, H., A. Hosainpour, F. Nargesi, M. H. Khoshtaghza, and H. Torang. 2012. Ohmic processing: temperature dependent electrical conductivities of lemon juice. *Modern Applied Science* 5 (1): 210-216.
11. De Alwis, A. A. P., and P. J. Fryer. 1990. A finite-element analysis of heat generation and transfer during ohmic heating of food. *Chemical Engineering Science* 45 (6): 1547-1559.
12. Rodrigo D., A. Van Loey, and M. Hendriks. 2007. Combined thermal and high pressure colour degradation of tomato puree and strawberry juice. *Journal of Food Engineering* 79: 553-560.
13. Ghanbarzadeh, B., and S. Ghanbarzadeh. 2004. Physical properties of food and processing system. Tehran: Arvan. (In Farsi).
14. Pataro, G., M. J. B. Giuseppe, N. P. Ricardo, A. V. António, A. T. José, and G. Ferrari. 2013. Quantification of metal release from stainless steel electrodes during conventional and pulsed ohmic heating. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 15e: 721-730.
15. Hosainpour, A., H. Darvishi, F. Nargesi, and A. Fadavi. 2013. Ohmic pre-drying of tomato paste. *Food Science and Technology International Journal*. SG-FSTJ130080.3d. 1-12
16. Icer, F., and C. Ilicali. 2005. Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Research International* 38: 1135-1142.
17. Icier, F., M. Engin, and H. Bozkurt. 2009. Investigation of Applications of Ohmic Thawing and Ohmic Cooking in Meat Processing. Project Report: TUBITAK TOVAG 107O898, p. 171. (in Turkish).
18. Icier, F., and C. Ilicali. 2005. The use of tylose as a food analog in ohmic heating studies. *Journal of Food Engineering* 69: 67-77.
19. Lei, L., H. Zhi, Z. Xiujin, I. Takasuke, and L. Zaigui. 2007. Effects of different heating methods on the production of protein\_lipid film. *Journal of Food Engineering* 82: 292-297.
20. Sanjay Sarang, S., S. K. Sastry, and L. Knipe. 2008. Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. *Journal of Food Engineering* 87: 351-356.
21. Mazaheri Tehrani, M., and S. A. Mortazavi. 2005. Optimization of initial conditions heating in order to optimize the production of tomato paste. *Food Science and Technology* 11: 61-74.
22. Pisit Wongsu, N. 2004. Ohmic Heating of Biomaterials: Peeling and Effects of Rotating Electric Field, Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for The Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of The Ohio State University.
23. Shirsat, N., J. G. Lyng, N. P. Brunton, and B. McKenna. 2004. Ohmic processing: electrical conductivities of pork cuts. *Meat Science* 67: 507-514.
24. Stancl, J., and R. Zitny. 2010. Direct ohmic Heating and Fouling of Milk. *Journal of Food Engineering* 99 (4): 437-444.

25. Valencia, C., M. C. Sanchez, A. Ciruelos, A. Lattore, J. M. Madiedo, and C. Gallegos. 2003. Non-linear viscoelasticity modeling of tomato paste products. *Food Research Int.* 36: 911-919.
26. [www.Fao.org/Faostat/en/#ranking/countries by commodity/2013](http://www.Fao.org/Faostat/en/#ranking/countries%20by%20commodity/2013).
27. Zaroni, B., E. Pagliarini, G. Giovanelli, and V. Lavelli. 2003. Modelling the effects of thermal sterilization on the quality of tomato puree, *Journal of Food Engineering* 56: 203-206.
28. Zareifard, M. R., H. S. Ramaswamy, M. Trigui, and M. Marcotte. 2003. Ohmic heating behaviour and electrical conductivity of two-phase food systems. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 4 (1): 45-55.
29. Zell, M., J. G. Lyng, D. J. Morgon, and D. A. Cornin. 2010. Minimising heat losses during batch ohmic heating of solid food. *Food and Bioproducts Processing* 38: 1135-1142.
30. Zell, M., J. G. Lyng, D. J. Morgan, and D. A. Cronin. 2011. Minimising heat losses during batch ohmic heating of solid food. *Food and Bioproducts Processing* 89: 128-134.
31. Zell, M., J. G. Lyng, D. A. Cronin, and D. J. Morgan. 2009. Ohmic cooking of wholebeef muscle – Optimisation of meat preparation. *Meat Science* 81 (4): 693-698.
32. Zhu, S. M., M. R. Zareifard, C. R. Chen, M. Marcotte, and M. Grabowski. 2010. Electrical conductivity of particle–fluid mixtures in ohmic heating: Measurement and simulation. *Food Research International Journal* 43: 1666-1672.

## Investigation of voltage gradient and electrode type effects on processing time, energy consumption and product quality in production of Tomato Paste by ohmic heating

M. Torkian Boldaji<sup>1</sup>- A. M. Borghae<sup>2\*</sup>- B. Beheshti<sup>3</sup>- S. E. Hosseini<sup>4</sup>

Received: 27-05-2015

Accepted: 31-01-2016

### Introduction

Thermal processing has a huge impact on the textural attribute of the final food product and texture is a major factor contributing the overall quality of food. Ohmic heating is an advanced thermal processing method in which heat is internally generated within foods by passing an alternating electric current through them. Ohmic heating can volumetrically heat the entire mass of a food system, resulting in faster heating, better quality and less energy consumption than conventional thermal processing. Gradient voltage and electrode type have high effect on ohmic heating system.

### Materials and Methods

In this study, the effect of voltage gradient and electrode type on moisture reduction time,  $a/b$ ,  $E$  color indexes and energy consumption were studied. For this purpose, four levels of voltage gradients (5, 7, 9 and 11  $V\ cm^{-1}$ ) and four electrode types (Aluminum, Stainless steel, Brass and Graphite) was investigated by ohmic heating in tomato paste processing. Tomato used in this study was purchased from a local market. The whole tomatoes were washed, crushed and mixed in a way that a red less-viscous liquid obtained (Fig. 1). This liquid was considered as tomato samples in the remainder of the article. Ohmic cooking experiments were conducted in laboratory scale ohmic heating system consists of a power supply, a variable transformer, power analyzer, a microcomputer, digital scale (GF-6000) and thermometer (Dual input RTD 804U) (Fig. 3). The ohmic cell had a PTF cylinder with an inner diameter of 0.05 m, a length of 0.10 m and two electrodes on both side of the cell. A hole with 3 mm diameter to insert the thermocouple was created and two holes with 5 mm diameter was created on surface of cell. One of them was used for pouring tomato puree and other for exiting steam from cell.

Temperature uniformity was checked during previous heating experiments by measuring the temperatures at different locations in the test cell. Ohmic heating was accomplished till the moisture content of the tomato samples reduced from initial moisture content of as 91(wet basis) to a safer level of 70 (wet basis). Moisture reduction time,  $a/b$  and  $E$  color indexes, temperature and energy consumption were measured.

### Results and Discussion

The results of the nonlinear mathematical model showed that the effect of different voltage gradient levels on moisture reduction time,  $E$  parameters and energy consumption had a good agreement ( $P < 0.01$ ) as well as voltage gradient had a significant effect on  $a/b$  color index ( $P < 0.05$ ). Electrode type had significant effect on processing time,  $E$  ( $P < 0.01$ ), on energy consumption and  $a/b$  index ( $P < 0.05$ ). Interaction of voltage gradient and electrode type was significant on processing time, energy consumption,  $a/b$  and  $E$  ( $P < 0.05$ ). In all electrodes by increasing the voltage gradient, processing time and energy consumption were reduced. For example by increasing the voltage gradient from 5 to 11  $V\ cm^{-1}$ , processing time and energy consumption were decreased on average 38% and 23%, respectively. Minimal processing time and minimal energy consumption

1- Ph.D. Student, Department of Mechanic of Agricultural Machinery, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Professor, Department of Mechanic of Agricultural Machinery, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of Mechanic of Agricultural Machinery, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4- Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(\*- Corresponding Author Email: borghae@ut.ac.ir)

were observed in  $11 \text{ V cm}^{-1}$  with graphite electrode that were 17 min and 203 kJ, respectively. As well as maximum processing time and maximum energy consumption were obtained in  $5 \text{ V cm}^{-1}$  with aluminum electrode that were 105.21 min and 321 kJ, respectively. But maximum a/b parameter and minimal E index were observed with stainless steel electrode in  $11 \text{ V cm}^{-1}$ . In determining the best electrode, in addition to the processing time and energy consumption, product quality is also an important parameter. However, graphite electrode has better performance in terms of time and energy consumption, but stainless steel electrode has better performance in term of product quality. Since the production of food, quality is an important parameter, and also the two electrodes graphite and steel are similar in terms of energy consumption and processing time, but stainless steel electrode is better in term of quality, so stainless steel electrode is selected for ohmic heating tomato paste.

## Conclusions

Different voltage gradients and Electrode type have a significant effect on processing time, energy consumption, E and a/b color indexes. Minimal processing time and minimal energy consumption were observed in  $11 \text{ V cm}^{-1}$  with graphite electrode that were 17 min and 203 kJ, respectively. But maximum a/b parameter and minimal E index were observed with stainless steel electrode in  $11 \text{ V cm}^{-1}$ . Stainless steel electrode and  $11 \text{ V cm}^{-1}$  voltage gradient were the best condition for tomato paste processing by ohmic heating.

**Keywords:** Aluminum, Efficiency, Electricity flow, Graphite, Ohmic cell, Stainless steel