



## تخمین هدایت الکتریکی رب گوجه‌فرنگی در حین گرمایش اهمیک

مهدی ترکیان بلداجی\*

استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد وارمین-پیشوا، ایران، وارمین  
(mhdorkian@yahoo.com)

### چکیده

گرمایش اهمی یک روش جدید در فرآوری محصولات کشاورزی می‌باشد که با عبور جریان متناوب از میان ماده غذایی در داخل آن تولید گرما نموده و باعث گرم شدن آن می‌شود. در این تحقیق یک سیستم گرمایش اهمی با قابلیت تغییر ولتاژ طراحی و ساخته شد. چهار سطح گرادیان ولتاژ ۵، ۷، ۹ و ۱۱ v/cm، چهار سطح درصد نمک ۰، ۱، ۱/۵ و ۲٪ w/w مورد استفاده قرار گرفت و در آخر سه معادله رگرسیونی برای تخمین هدایت الکتریکی رب گوجه‌فرنگی ارائه گردید. نتایج نشان داد که اثر گرادیان ولتاژ بر روی هدایت الکتریکی معکوس می‌باشد هر چند در برخی از درصدهای نمک اثر معنی‌داری به دست نیامد. اما مقایسه میانگین اثر گرادیان ولتاژ بر روی شیب معادله رگرسیونی هدایت الکتریکی در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود.

**کلمات کلیدی:** پوره گوجه‌فرنگی، گرمایش اهمی، گرادیان ولتاژ. هدایت الکتریکی

نویسنده مسئول: mhdorkian@yahoo.com



## تخمین هدایت الکتریکی رب گوجه‌فرنگی در حین گرمایش اهمیک

## مقدمه:

استفاده از تکنولوژی گرمایش اهمی از لحاظ تاریخی به قرن نوزدهم برمی‌گردد ولی کاربردهای تجارتي بسیار موفق آن در فرآیند حرارتی مواد غذایی از دهه ۱۹۰۰ به بعد شکل گرفت. در این زمان برای اولین بار گرمایش اهمی برای پاستوریزه کردن شیر استفاده شد و به فرآیند الکتروپور<sup>۱</sup> شهرت یافت [۲]. هرچند در اوایل قرن ۱۹ به دلیل هزینه‌های زیاد الکتریسته و مشکلات الکترولیز فرآیند گرمایش اهمی موفقیت چندانی نداشت و به عنوان یک روش صنعتی به آن پرداخته نشد ولی از سال ۱۹۸۰ تحقیقات بر روی گرمایش اهمی شروع و از این تکنولوژی برای تولید محصولات صنعتی، غذایی و مصرفی به‌ویژه مواد غذایی نوشیدنی استفاده شد [۱۱]. از زمانی که USDA<sup>۲</sup> و FDA<sup>۳</sup> استفاده از تکنولوژی‌های اهمیک را برای مواد غذایی قابل پمپاژ پیشنهاد کردند، کاربرد تجاری آن در جهان (آمریکا، انگلستان، ایتالیا، ژاپن، فرانسه و مکزیک) برای پاستوریزاسیون مواد غذایی قابل پمپاژ (آب‌میوه‌ها، تخم‌مرغ، شیر و ...) افزایش یافته است [۷]. دقت گرمایش اهمیک به شدت تحت تأثیر هدایت الکتریکی ماده غذایی است که این ویژگی خواص انتقال جرم و حرارت را به مقدار زیادی، تحت تأثیر قرار می‌دهد. هدایت الکتریکی ماده غذایی نیز به دما، ولتاژ، نوع ماده غذایی، غلظت الکترولیت، میزان فرکانس مصرفی، نوع و شدت میدان الکتریکی بستگی دارد [۱۸].

مقادیر لحظه‌ای ثبت شده‌ی ولتاژ و جریان، در طول گرمایش اهمیک، منجر به تعیین هدایت الکتریکی در دماهای مختلف و با سلول اهمی با ابعاد مشخص، می‌شود که می‌توان مقدار آن را به کمک فرمول (۱) محاسبه نمود [۱۰].

$$\sigma = \frac{L}{A \times R}$$

هدایت الکتریکی، با دما به صورت خطی افزایش می‌یابد. در حالی که غلظت مواد جامد محلول و نامحلول، بر غیر خطی بودن آن اثر می‌گذارند [۱۲، ۱۳، ۱۴].

وابستگی دمایی به هدایت الکتریکی محصولات مایع، بسته به نوع محصول مورد آزمایش، روابط خطی و یا درجه‌ی دو را دنبال می‌کنند. وارد کردن گرادیان ولتاژ به معادله‌ی هدایت الکتریکی، بهبود ناچیزی در مدل‌های پیش‌بینی، ایجاد خواهد کرد [۵]. ضریب هدایت الکتریکی غذاها، عموماً همراه با افزایش دما افزایش می‌یابد. برای رسیدن به دماهای بالاتر نیاز است که جریان و یا ولتاژ را زیاد کنیم و یا از فاصله‌ی کمتری بین الکترودها استفاده کنیم [۴].

هدایت الکتریکی به تجزیه‌ی یونی و میکروساختار مواد غذایی تحت گرمایش، بستگی دارد. ممکن است برخی از ترکیبات مثل شکر و چربی، بسته به ویژگی‌های الکترولیتیکی‌شان، هدایت الکتریکی نمونه را تحت تأثیر قرار دهند. در آب‌میوه‌ها، اصلی‌ترین ترکیب حل شده که فاقد هرگونه رفتار الکترولیتیکی می‌باشد، شکر است. محتوای متفاوت شکر و طبیعت سایر ترکیبات، ممکن است باعث تفاوت در هدایت الکتریکی آب‌میوه‌های دارای غلظت یکسان شود. به علاوه، نرخ گرمایش اهمیک مواد غذایی سیال، وابسته به مقادیر هدایت الکتریکی می‌باشد. برای گرادیان ولتاژی مختلف در حتی اسیدیته و محتوای پالپ مشابه، هدایت الکتریکی بین آب‌میوه‌ها و پوره‌های گوناگون، تفاوت می‌کند و مستقیماً، بر نرخ گرمایش اهمیک آن‌ها، اثر می‌گذارد [۱۹].

1. Electropure  
2. United State Department of Agriculture  
3. Food & Drug Administration



فرکانس و شکل موج ولتاژ به کار رفته، مقادیر هدایت الکتریکی و فرآیند گرمایش نمونه‌های غذایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هدایت الکتریکی مشاهده شده با استفاده از موج‌های سینوسی و دنده اره‌ای در فرکانس‌های پایین (۴ Hz)، نسبت به مقادیر مشاهده شده در استفاده از موج‌های مربعی، بیشتر است [۷].

آمیالی و همکاران گزارش کردند که ضریب هدایت حرارتی آب‌میوه‌ها (سیب، پرتقال و آناناس) به صورت خطی با دما افزایش پیدا می‌کند [۱۵و۱].

کریستینا و همکاران نشان دادند که هدایت الکتریکی به غلظت و دمای آب لیمو بستگی دارد. در فرآیند گرمایش اهمی استفاده از گرادیان ولتاژ پایین باعث کاهش انرژی مصرفی و افزایش راندمان سیستم گرمایش اهمی می‌گردد [۱۵]. سانجای سارانگ و همکاران به بررسی رسانایی الکتریکی میوه‌ها و گوشت‌ها به روش گرمایش اهمی پرداختند. آن‌ها اعلام کردند که در همه نمونه‌ها ضریب هدایت الکتریکی با افزایش دما افزایش می‌یابد و ضریب هدایت الکتریکی میوه‌ها نسبت به نمونه‌های گوشت بیشتر است [۲۲].

## مواد و روش‌ها

### سیستم گرمایش اهمی

یک سیستم گرمایش اهمی در واقع یک مدار الکتریکی می‌باشد لذا شامل سه قسمت اصلی است: منبع تغذیه متناوب، سلول اهمی که ماده در داخل آن قرار می‌گیرد و الکترودها که جریان را به ماده غذایی منتقل می‌کنند. اتصالات فرعی که در شکل (۱) مشاهده می‌شود عبارت است از: پاورآنالایزر، ترمومتر، رایانه، ترازوی دیجیتالی، رگولاتور ولتاژ، سیم‌های رابط و ترموکوپل که در زیر مشخصات هر یک بیان خواهد شد.



شکل ۱: نمایی از سیستم گرمایش اهمی به کار رفته در این تحقیق

سلول اهمی محل قرارگیری ماده غذایی برای گرمایش است. ماده غذایی مورد نظر در داخل بدنه سلول ریخته شده و الکترودها به بدنه سلول پیچ می‌شوند. این سلول به شکل استوانه و با قطر داخلی ۵ cm و طول ۱۱۰cm از جنس PTF (تفلون فشرده) ساخته شد.

در این تحقیق الکترودها از جنس فولاد زنگ نزن استفاده شد. الکترودها به کمک میله‌ای از جنس خود الکترودها بر روی تویی سوار شده و در داخل سیستم گرمایش اهمی قرار می‌گیرد. به منظور ایجاد تغییرات در ولتاژ ورودی به سیستم گرمایش اهمی از



یک عدد دستگاه رگولاتور ولتاژ<sup>۴</sup> (مدل امرسان ساخت ایران، شکل ۳-۱۴) با قابلیت تولید ولتاژ ۰ تا ۳۲۰ ولت و با توان ۳kW استفاده گردید. برای اندازه‌گیری توان، آمپر و ولتاژ مصرفی و محاسبه انرژی مصرفی از دستگاه پاور آنالایزر<sup>۵</sup> ساخت ایران استفاده شد.

اندازه‌گیری دمای در سلول گرمایشی با ترموکوپل<sup>۶</sup> مدل PT100 انجام شد که به یک ترمومتر مدل Dual input RTD 804U (ساخت کشور تایلند) با قابلیت اتصال به درگاه رایانه متصل می‌شود. تغییرات جرم در طول فرآیند اهمیت با ترازوی دیجیتال<sup>۷</sup> مدل A&D GF-6000 ساخت کشور ژاپن اندازه‌گیری شد.

### آماده‌سازی نمونه:

گوجه‌فرنگی واریته کال جی ان ۳ انتخاب گردید. در مرحله اول عمل شستشو و پوست‌کنی انجام شد. سپس به کمک همزن با دور ۵۰۰ rpm گوجه‌ها مخلوط شدند تا پالپ گوجه‌فرنگی حاصل شود. این پالپ از صافی با مش ۱mm عبور داده شد. مخلوط به دست آمده به چهار قسمت تقسیم شده و به هر قسمت نمک طعام (NaCl) به نسبت‌های وزنی ۰، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد اضافه شد.

### بررسی گرادیان ولتاژ

یکی از پارامترهای بسیار مهم که بر عملکرد سیستم گرمایشی اهمیت و هم بر هدایت الکتریکی ماده غذایی مؤثر است قدرت میدان الکتریکی یا همان گرادیان ولتاژ می‌باشد که با توجه به رابطه ۲ قابل محاسبه است.

$$\nabla V = \frac{V}{L} \quad (2)$$

V: ولتاژ اعمال شده بر دو سر سلول اهمی، L: فاصله بین دو الکترود  
در این تحقیق چهار سطح ولتاژ ۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ ولت انتخاب گردید و با توجه به طول سلول (۱۰cm) به ترتیب گرادیان‌های ولتاژی ۵، ۷، ۹ و ۱۱ V/cm به دست آمد. در هر آزمایش مقدار ۱۰۰ گرم پوره در داخل سلول ریخته شده و تا رسیدن وزن پوره به وزن محاسبه شده در گرادیان‌های مختلف تحت گرمایشی اهمی قرار گرفت.

### هدایت الکتریکی:

اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در یک الکترولیت کمی متفاوت با رسانای فلزی می‌باشد. زیرا در یک الکترولیت با توجه به اینکه الکترودهای آزاد عامل انتقال الکتریسته باشند یا یون‌های آزاد میزان مقاومت و همچنین هدایت الکتریکی قدری متفاوت خواهد بود. مقادیر لحظه‌ای ثبت شده‌ی ولتاژ و جریان، در طول گرمایشی اهمیت، منجر به تعیین هدایت الکتریکی در دماهای مختلف و با سلول اهمی با ابعاد مشخص، می‌شود که می‌توان مقدار آن را به کمک فرمول (۳) محاسبه نمود. آیسیر و همکاران اعلام کردند که هدایت الکتریکی در مواد غذایی به غلظت و میزان نمک ماده وابسته است..

$$\sigma = \frac{LI}{VA} \quad (3)$$

(σ): هدایت الکتریکی (S/m)، (V): ولتاژ بر حسب ولت (v)، (I): شدت جریان بر حسب آمپر (A)  
(L): فاصله بین الکترود بر حسب متر (m)، (A): مساحت مقطع مؤثر الکترود بر حسب متر مربع (m<sup>2</sup>)

4-Voltage Regulator  
5-Power Analyzer  
6. Thermocouple  
7. Digital Scale



کاسترو و همکاران جهت به دست آوردن هدایت حرارتی در مواد غذایی مایع روابط ۴ و ۵ را ارائه دادند.

$$\sigma = B_1 T + C_1 \quad (۴)$$

$$\sigma = E_2 (Con\%)^{N_2} + B_2 T + C_2 \quad (۵)$$

در این معادلات  $B_1$  و  $C_1$  و  $E_2$  و  $N_2$  و  $B_2$  و  $C_2$  ضرایب ثابت می‌باشند و  $Con\%$  غلظت مواد محلول ( $w/w$ ) را نشان می‌دهد. وابستگی دمایی به هدایت الکتریکی محصولات مایع، بسته به نوع محصول مورد آزمایش، روابط خطی و یا درجه‌ی دو را دنبال می‌کنند [۴].

همچنین آیسری و همکاران (۲۰۱۰) برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی آب دریا فرمول ۶ را پیشنهاد دادند

$$\frac{dT}{dt} = \nabla V^2 \frac{\sigma}{\rho c_p} \quad (۶)$$

$dT/dt$  نرخ گرمایش،  $V$ : گرادیان ولتاژ،  $\sigma$ : هدایت الکتریکی،  $\rho$ : چگالی و  $c_p$ : گرمای ویژه  
همچنین آن‌ها بیان داشتند که با توجه به خطی بودن رابطه هدایت الکتریکی و دما می‌توان رابطه (۷) را برای مدل‌سازی ریاضی هدایت الکتریکی در نظر گرفت.

$$\sigma = \sigma_0 + mT \quad (۷)$$

$\sigma_0$ : هدایت الکتریکی اولیه،  $m$  عدد ثابت و  $T$  دما می‌باشد.

همچنین آیسری و همکاران (۲۰۰۵) معادله (۸) را ارائه دادند که وابستگی هدایت الکتریکی به دما و گرادیان ولتاژ را بیان می‌نمود.

$$\sigma = D(\nabla V)^n + BT + C \quad (۸)$$

که در آن  $D, n, B$  و  $C$  اعداد ثابت می‌باشند.

## تحلیل آماری و مدل‌سازی

تحلیل بر اساس آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS16 انجام شد و کلیه میانگین‌ها (سه تکرار) توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح یک و پنج درصد با یکدیگر مقایسه شدند. نمودارهای سه بعدی توسط نرم‌افزار Table Curve 3D و Mathematica ترسیم شد. سطوح بهینه (کمینه مقدار انرژی مصرفی، زمان کاهش رطوبت، تغییرات کلی رنگ، بریکس). برای هر یک از استراتژی‌های مورد بررسی به روش سطح پاسخ به دست آمد.

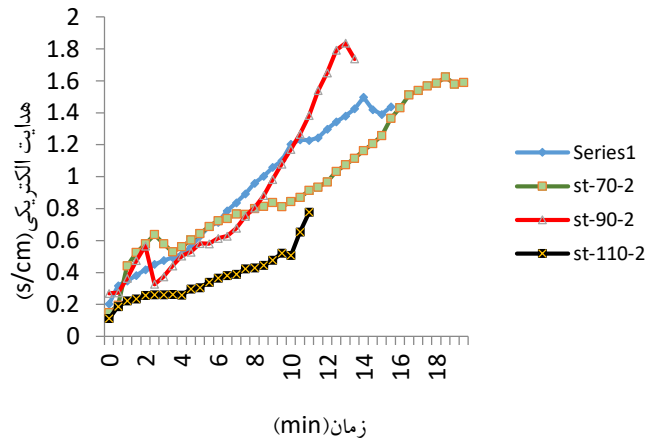
## بحث و نتیجه‌گیری

هدایت الکتریکی پوره گوجه‌فرنگی در حین گرمایش اهمی به کمک فرمول (۳) محاسبه گردید. شکل ۲ و ۳ نشان‌دهنده اثر گرادیان ولتاژ بر روی هدایت الکتریکی در پوره گوجه‌فرنگی می‌باشد.

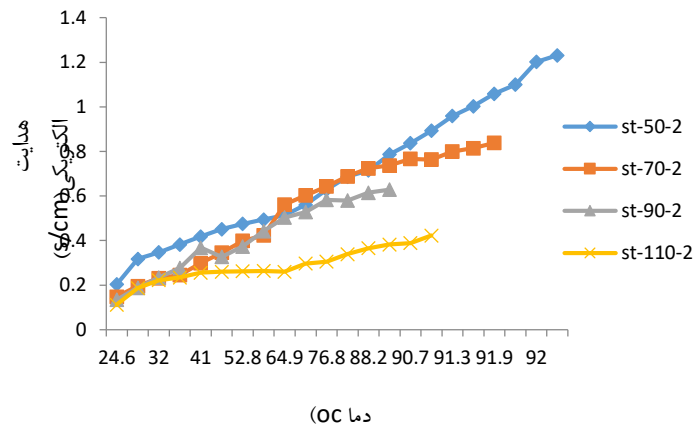
هدایت الکتریکی در مراحل اولیه فرآیند به‌فروم خطی با افزایش دما افزایش می‌یابد. این نتایج با نتایج به دست آمده با دیگر محققین هم‌خوانی دارد [۱، ۸، ۹، ۱۶، ۱۷، ۲۳].

با ادامه فرآیند ضریب هدایت حرارتی کاهش می‌یابد. این کاهش هم می‌تواند به دلیل کاهش مقدار جزئی دما باشد و هم می‌تواند به دلیل افزایش غلظت ماده که اجازه حرکت آزاد را به یون‌های حامل بار الکتریکی نمی‌دهد.

در دو نمودار هدایت الکتریکی با افزایش گرادیان ولتاژ از ۵ به  $11V/cm$  کاهش می‌یابد. به دلیل اینکه با افزایش گرادیان ولتاژ تبخیر آب با شدت بیشتری افزایش می‌یابد لذا حرکت یون‌های آزاد محدودتر شده و هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد.



شکل ۲: اثر گرادیان ولتاژ بر هدایت الکتریکی در درصد نمک طعام ۲٪ (st): الکتروود فولاد، ۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ ولتاژهای مختلف و ۲: درصد نمک طعام)



شکل ۳: اثر گرادیان ولتاژ بر هدایت الکتریکی بر حسب دما در الکتروولیت ۲٪ (st): الکتروود فولاد، ۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ ولتاژهای مختلف و ۲: درصد نمک طعام)

با گذشت زمان و با افزایش دما هدایت الکتریکی جسم افزایش می‌یابد. اثر گرادیان ولتاژ بر روی هدایت الکتریکی معکوس ارزیابی گردید. هرچند در برخی از درصدهای نمک اثر معنی‌داری به دست نیامد. با تبخیر آب در داخل ماده غذایی درصد نمک طعام در داخل آن زیاد می‌شود افزایش درصد نمک طعام درصد وجود یون به جرم را افزایش داده لذا هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. سانجای سارانگ و همکاران هدایت الکتریکی شش میوه را به کمک سیستم گرمایش اهمی اندازه‌گیری کردند و بیان داشتند که با افزایش دما برای هر شش میوه هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد [۲۲].



درویشی و همکاران رابطه بین هدایت الکتریکی و گرادیان ولتاژ را مسقیم ارزیابی کردند و بیان داشتند که با افزایش گرادیان ولتاژ هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها بیان کردند که با افزایش دمای ماده غذایی هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد [۸].

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 [۳].

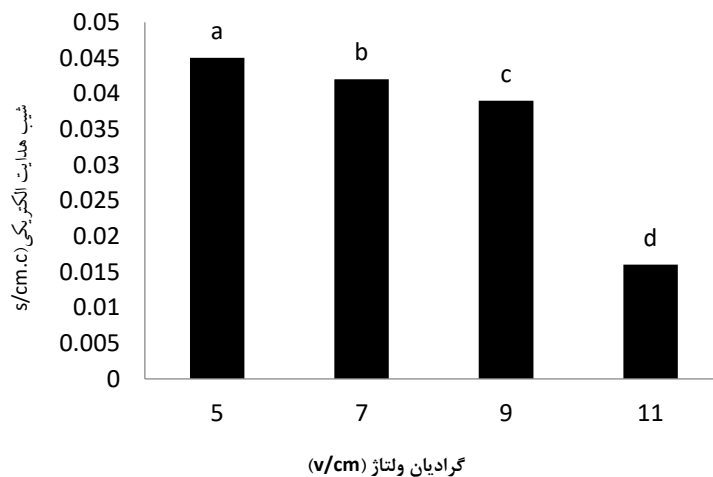
ایسیر و همکاران نیز بیان کردند که با افزایش دما هدایت الکتریکی برای همه گرادیان‌های ولتاژی افزایش می‌یابد ولی با افزایش گرادیان ولتاژ هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد هرچند این کاهش معنی‌دار نیست [۵].

اگر تغییرات هدایت الکتریکی نسبت به دما را به صورت خطی در نظر بگیریم معادله (۹) می‌تواند هدایت الکتریکی در دماهای مختلف را تخمین بزند.

$$\sigma = 0.04T + 0.120 \quad R^2 = 0.92 \quad (9)$$

مقایسه میانگین اثر گرادیان ولتاژ بر روی شیب هدایت الکتریکی در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود. البته لازم به یادآوری است که اثر گرادیان ولتاژ بر روی تغییرات دما معنی‌دار است و تأثیر دما بر روی هدایت الکتریکی نیز معنی‌دار است به همین دلیل گرادیان ولتاژ بر روی تغییرات هدایت الکتریکی اثر معنی‌داری دارد.

مقایسه میانگین اثر گرادیان ولتاژ بر روی تغییرات هدایت الکتریکی در شکل ۴ نشان دهند معنی‌دار بودن اثر گرادیان ولتاژ بر روی آن است. کمترین شیب متعلق به گرادیان ولتاژ ۱۱ و بیشترین شیب برای گرادیان ولتاژ ۵ می‌باشد.



شکل ۴: مقایسه میانگین اثر گرادیان ولتاژ بر شیب هدایت الکتریکی

برای هدایت الکتریکی در الکتروود فولاد ضدزنگ در برابر تغییرات دما و با گذشت زمان می‌توان یک رابطه رگرسیونی درجه اول و یک رابطه درجه دوم به دست آورد که با تقریب خوبی میزان هدایت الکتریکی را می‌توان تخمین زد. ضرایب معادلات (۱۰) و (۱۱) و  $R^2$  آن‌ها در جدول (۱) برای محدوده‌های مختلف دمایی ارائه شده‌اند.

$$\sigma = \sigma_0 + mT \quad (10)$$

$$\sigma = \sigma_0 + mT + nT^2 \quad (11)$$

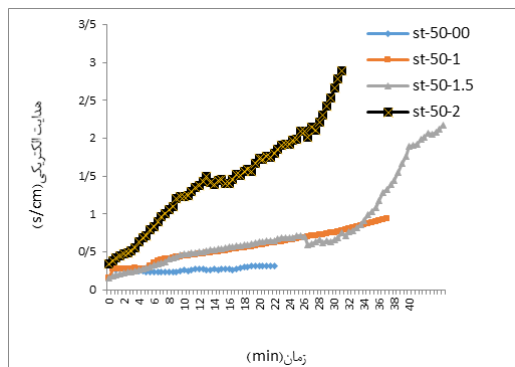
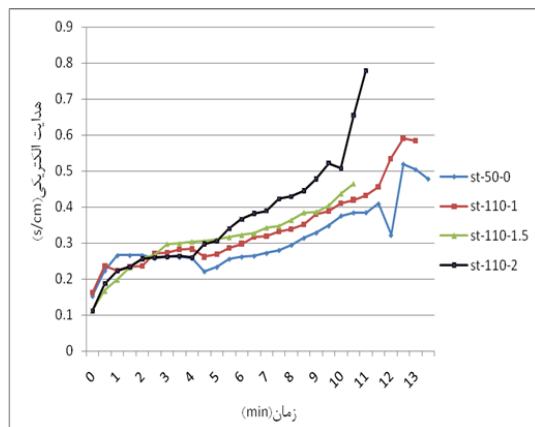
که در آن،  $\sigma_0$  هدایت الکتریکی اولیه (S/m)،  $m$  فاکتور دما (S/m.°C)،  $n$  ثابت دما (S/m.°C<sup>2</sup>) و  $T$  دما نمونه می‌باشد.



جدول ۱: نتایج از تجزیه آماری برای مدل هدایت الکتریکی - دما در گرادیان ولتاژهای مختلف

Voltage (V/cm)	Linear ( $\sigma_0 + mT$ )			Non linear ( $nT^2 + mT + \sigma_0$ )			
	m	$\sigma_0$	R <sup>2</sup>	n	m	$\sigma_0$	R <sup>2</sup>
۵	۰/۰۴۶	۰/۲۸۲۶	۰/۹۹۹	$2 \times 10^{-10}$	$-2 \times 10^{-10}$	۰/۸۶۹۷	۰/۹۱۱۵
۷	۰/۰۴۱۲	۰/۳۴۴۵	۰/۹۹۹۳	$5 \times 10^{-10}$	$-9 \times 10^{-10}$	۰/۷۹۸۹	۰/۹۵۸۶
۹	۰/۰۳۹	۰/۳۵۰۸	۰/۹۹۵۸	$7 \times 10^{-10}$	۰/۰۰۰۳	۰/۷۲۴۴	۰/۹۵۱۹
۱۱	۰/۰۱۶	۰/۳۵۳۷	۰/۹۹۹۸	$4 \times 10^{-10}$	$-0/۰۰۰۳$	۰/۷۰۵۷	۰/۹۵۳۳

علاوه بر این هدایت الکتریکی رابطه مستقیم با درصد نمک طعام در ماده غذایی دارد. در شکل ۵ تغییرات هدایت الکتریکی در درصد نمک طعام مختلف بر حسب زمان گرمایش در دو گرادیان ولتاژی (دو گرادیان ولتاژی دیگری رفتار مشابه دارند) نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که به افزایش درصد نمک طعام در پوره گوجه‌فرنگی هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. به دلیل اینکه با افزایش درصد نمک طعام یون‌های آزاد بیشتری در پوره گوجه‌فرنگی وجود خواهند داشت و به همین دلیل هدایت الکتریکی بهبود می‌یابد.



شکل ۵: اثر تغییرات درصد نمک طعام بر روی هدایت الکتریکی در دو ولتاژی ۵۰ و ۱۱ V در الکتروود فولاد زنگ نزن





از آنجایی که هدایت الکتریکی هم به گرادیان ولتاژ و هم به درصد نمک طعام موجود در ماده غذایی وابسته است لذا تخمین آن برای بهینه‌سازی بهتر سیستم‌های گرمایش اهمی لازم است. تأثیر غلظت نمک بر هدایت الکتریکی و همچنین بر سایر خواص سیستم گرمایش اهمی توسط محققین زیادی مورد ارزیابی قرار گرفته است. آسیری و همکاران گزارش دادند که با افزایش غلظت نمک در آب دریا هدایت الکتریکی آن افزایش می‌دهد [۳].

ژو و همکاران نیز رابطه‌ای به منظور برازش داده‌های هدایت الکتریکی با دما و درصد نمک طعام ارائه دادند و بیان داشتند که با افزایش درصد نمک طعام در ماده و با افزایش دما بیشترین مقدار هدایت الکتریکی به دست می‌آید [۱۹، ۲۳].

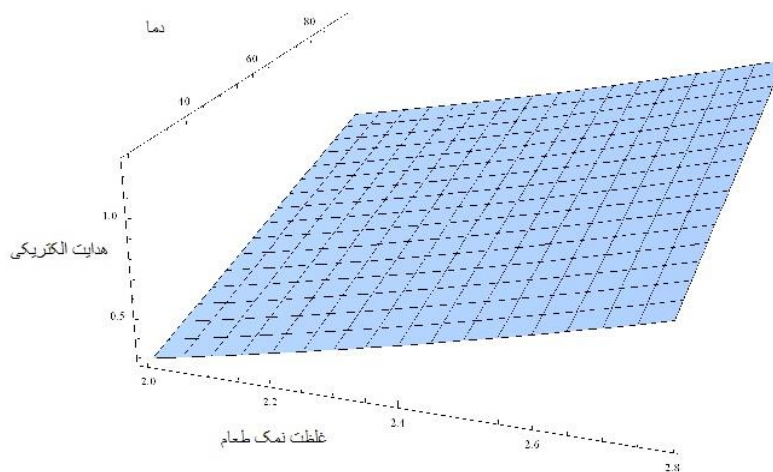
مدل ریاضی به کمک نرم‌افزار mathematical برای محاسبه هدایت الکتریکی برحسب دو فاکتور دما و درصد غلظت نمک طعام به دست آمد که به صورت زیر بیان می‌شوند  $R^2=0.993$

$$\sigma = -0.477 + 0.151C^2 + 0.0061T^2 \quad 12$$

ضریب  $R^2$  برای این معادله ۰/۹۶۷ به دست آمد. نمودار سه بعدی هدایت الکتریکی برحسب دما و غلظت نمک طعام در شکل ۷ مشاهده می‌گردد.

با گذشت زمان از شروع فرایند و با تبخیر آب و کاهش وزن پوره گوجه‌فرنگی غلظت نمک طعام در آن افزایش می‌یابد. با توجه به افزایش غلظت نمک طعام و افزایش دما انتظار می‌رود که هدایت الکتریکی افزایش یابد. با توجه به نمودار مدل برازش شده مشاهده می‌شود که مطابق انتظار با افزایش غلظت نمک و دمای ماده غذایی هدایت الکتریکی آن بهبود می‌یابد.

این مدل به دلیل سادگی و ضریب  $R^2$  بالا جهت تخمین هدایت الکتریکی مناسب است. همان‌طور که از نمودار ۷ نیز مشخص است با افزایش غلظت نمک طعام از ۲٪ به ۲/۸٪ و با افزایش دما از ۲۰ به ۹۰ درجه سلسیوس هدایت الکتریکی از ۰/۱۸۲ S/cm به ۱/۷۳ S/cm افزایش می‌یابد.



شکل ۷: پیش‌بینی هدایت الکتریکی برحسب درصد نمک طعام و دمای فرآیند معادله تجربی

### نتیجه‌گیری کلی:

در این تحقیق اثر دو فاکتور گرادیان ولتاژ و غلظت نمک طعام بر روی هدایت الکتریکی رب گوجه‌فرنگی در گرمایش اهمی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مشخص گردید که هر دوی این تیمارها بر روی هدایت الکتریکی رابطه معنی‌داری دارند. اما



آنچه جالب توجه بود رابطه معکوس گرادیان ولتاژ و هدایت الکتریکی بود. از طرف دیگر با افزایش دما هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد و گرادیان ولتاژ بر روی شدت افزایش دما اثر مستقیم دارد اما بعد از رسیدن نمونه‌ها به دمای ثابت، افزایش گرادیان ولتاژ تأثیر معکوس بر ضریب هدایت الکتریکی خواهد داشت.

سه معادله رگرسیونی تخمین هدایت الکتریکی در این تحقیق نیز بیان شد که دو تای آنها هدایت الکتریکی را برحسب دمای محصول در حین گرمایش اهمی بیان می‌کنند و یکی از آنها، هدایت حرارتی را برحسب دو پارامتر دما و درصد نمک طعام مورد تخمین قرار می‌دهد که هر سه این معادلات می‌تواند به دقت قابل قبولی هدایت الکتریکی را پیش‌بینی نماید.

### منابع

1. Amiali, M.; Ngadi, M.; Raghavan, V. G. S.; Nauyen, D. H., 2006. Electrical conductivity of liquid egg product and fruit juices exposed to high pulsed electric field. *International Journal of Food Properties*. 9: 533-540
2. Anderson, A.K., Finkelsten, R., 1919. A study of the electro-pure process of treating milk.
3. *J. Dairy Sci.* 2, 374\_406.
4. 3-Assiry, A.M., Sastry, S.K., Samaranayake, C., 2006. Influence of temperature, electrical conductivity, power and pH on ascorbic acid degradation kinetics during heating using stainless steel electrodes. *Bioelectrochem.* 68 (2006), 7\_13.
5. 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.
6. Castro, I. 2007. Ohmic heating as an alternative to conventional thermal treatment. PhD. Dissertation, Portugal: Universidade do Minho.
7. Castro, I., Teixeira, J.A., Salengke, S., Sastry, S.K., Vicente, A.A., 2003. The influence of field strength, sugar and solid content on electrical conductivity of strawberry products. *J. Food Process Eng.* 26 (1),
8. Cullen, P.J., Brijesh K., Tiwari, Vasilis P. Valdramidis, 2012, *Novel Thermal and Non-Thermal Technologies for Fluid Foods*. Academic Press is an imprint of Elsevier. ISBN : 978-0-12-381470-8
9. Darvishi, H., et al. 2011. Ohmic Processing: Temperature Dependent Electrical Conductivities of Lemon Juice. *modern Applied Science*, 5(1): 209-216.
10. Darvishi, H., et al. 2013. Ohmic heating of pomegranate juice: Electrical conductivity and pH change. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 12(2): 101-108.
11. 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
12. Herrick, J.P., Sastry, S.K., Clyde, G.F., Wedral, E.R., 2000. On-demand direct electrical
13. resistance heating system and method thereof. United States Patent 6,130,990.
14. Icier, F., Ilicali, C., 2005a. Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Research. Int.* 38 (10), 1135\_1142
15. Icer, F., Ilicali, C., 2005b. Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Research International*. 38: 1135-1142.



16. Icier, F. 2003. The Experimental Investigation and Mathematical Modeling of Ohmic Heating of Foods. Ph.D thesis, Ege University, Institute of Natural and Applied Science, Food Engineering Section, in Turkish.
17. Icier, F., Yildiz, H., Baysal, T., 2006. Peroxidase inactivation and color changes during ohmic blanching of pea puree. J. Food Eng. 74, 424\_429.
18. Icier, F., Bozkurt, H., in press. 2009. Ohmic heating of liquid whole egg: rheological behaviour and fluid dynamics. Food and Bioprocess Technology. doi:10.1007/s11947-009-0229-4.
19. Icier, F., Engin, M., Bozkurt, H., 2009. Investigation of Applications of Ohmic Thawing and Ohmic Cooking in Meat Processing. Project Report: TUBITAK TOVAG 107O898, p. 171 (in Turkish).
20. Lima, M., Heskett, Brian, F. and Sastry, S.K., 2001. Diffusion of beet dye during electrical and conventional heating at steady-state temperature. Journal of food process engineering. 24: 331-340.
21. Marcotte, M., Trigui, M., Ramaswamy., H.S., 2000a. Effect of salt and citric acid on electrical conductivities and ohmic heating of viscous liquids. J. Food Process. Preserv. 24, 389\_406.
22. Marra, F., Zell, M., Lyng, J.G., Morgan, D.J., Cronin, D.A., 2009. Analysis of heat transfer during ohmic processing of a solid food. J. Food Eng. 91, 56\_63.
23. Torkian Boldaji. M & Borghei. A & Beheshti. B & Hosseini. S. E, 2015, The process of producing tomato paste by ohmic heating method, J Food Sci Technol DOI 10.1007/s13197-014-1424-5
24. Sanjay Sarang and Sudhir K. Sastry et all. 2008. Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. Food Research International. 40: 1660-1668
25. Zhu, S. M.; Zareifard, M. R.; Hen, C. R.; Marcotte, M.; Grabowski, S., 2010. Electrical conductivity of particle–fluid mixtures in ohmic heating: Measurement and simulation. Food Research International. 43: 1666-1672.



## Estimation of electrical conductivity of tomato paste during ohmic heating

Mehdi Torkian Boldaji

1. Department of Mechanic Engineering, Islamic Azad University of Iran, Varamin-pishva Branch, Iran, Varamin

### Abstract

Ohmic heating system is a new method to processing of agricultural products, in which flowing the alternative current among of food material resulted in heating up. In this research, electrical conductivity of tomato paste has been studied in a Ohmic heating system. For this reason, a Ohmic heating system was designed and made, such that, it was ability to voltage changing. 4 levels of voltage gradient (5, 7, 9 and 11 v/cm), salt content in 4 levels (0, 1, 1.5 and 2 percent w/w) was used. Three regression equations were presented to estimate the electrical conductivity of tomato paste. The results showed that the effect of the voltage gradient on the electrical conductivity was reversed, although no significant effect was found in some salts concentration. But the comparison of the average effect of the voltage gradient on the slope of the regression equation was significant ( $\alpha < 1\%$ ).

**Key words:** Electrical conductivity, Ohmic heating, Tomato pulp , Voltage gradient,

\*Corresponding author

E-mail: mhdtorkian@yahoo.com