

# شبیه‌سازی و مدل‌سازی دو بعدی فرآیند حرارت‌دهی اهمیک در یک سیستم غذایی دو فازی

سجاد قادری<sup>۱</sup>، علی اکبر مؤیدی<sup>۲</sup>، سید امیر اولیایی<sup>۳</sup> و<sup>۴\*</sup>، محمدرضا بخش‌امین<sup>۵</sup>

- ۱- مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی مؤثر بر سلامت، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات درمانی استان کهگیلویه و بویر احمد، یاسوج، ایران.
  - ۲- بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.
  - ۳- بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.
  - ۴- دانشجوی دکتری مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.
  - ۵- مدیر کنترل کیفیت، شرکت کشت و صنعت تماته، کارخانه رب خوشاب خراسان.
- (تاریخ دریافت: ۹۴/۰۷/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۳/۲۵)

## چکیده

در این تحقیق به منظور بررسی اثر فاکتورهای بحرانی مؤثر بر فرآیند اهمیک، انتقال همزمان حرارت و الکتریسیته در یک سیستم غذایی دو فازی جامد-مایع مدل‌سازی شد. در این مدل‌سازی با در نظر گرفتن مدل سیال ساکن دی آلویس و فرایر، یک شبیه‌سازی دو بعدی به منظور بررسی اثر اندازه ذرات بر نرخ حرارت‌دهی فازها با استفاده از نرم افزار تجاری COMSOL انجام گرفت. از یک ذره جامد با هدایت الکتریکی کمتر نسبت به مایع اطراف خود استفاده شد تا بتوان ویژگی‌های حرارت‌دهی اهمیک مخلوط جامد-مایع را در دو سطح مقطع متفاوت ذره بررسی نمود. فاز پراکنده شامل یک ذره سیب‌زمینی استوانه‌ای شکل با دو اندازه مختلف و سیال مورد نظر شامل محلول ۵ درصد کربوکسی متیل سلولز (CMC) در ۰/۵ درصد کلرید سدیم بود. نتایج نشان داد سازگاری تقریبی خوبی بین نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی شده و نتایج آزمایشگاهی وجود داشته است. با افزایش اندازه ذرات نرخ حرارت‌دهی کاهش می‌یابد که با پدیده Worst-Case که به عنوان یک حالت غیرایده‌آل در شبیه‌سازی دو بعدی در تحقیق حاضر بکار برده شد؛ همخوانی داشت. سردترین نقطه ذره در مرکز ذره قرار داشت و با گذشت زمان همچنان سردترین نقطه باقی ماند و با فاصله گرفتن از مرکز ذره دما افزایش یافت. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که در فرآیند حرارت‌دهی اهمیک نفوذ حرارت و الکتریسیته در سرتاسر محصول سریع‌تر از روش‌های مرسوم حرارت‌دهی بوده و در هر دو فاز مایع و جامد بطور یکسان و تقریباً با سرعت برابر صورت می‌گیرد.

کلید واژگان: حرارت‌دهی اهمیک، مدل‌سازی، فاز جامد-مایع، سیب زمینی.

## ۱- مقدمه

حرارت‌دهی را می‌توان مهمترین عملیات واحد در صنایع غذایی دانست که در سیستم‌های مختلف و به شیوه‌های متفاوت اجرا می‌شود. فرآیندهای حرارتی مرسوم در صنایع غذایی مانند حرارت‌دهی در دمای بالا و مدت زمان کوتاه (HTST) و حرارت‌دهی در دمای خیلی بالا (UHT) که بر مبنای انتقال سریع حرارت استوار هستند؛ صرفاً برای غذاهای مایع مناسب می‌باشند و در صورت کاربرد برای مواد غذایی چند فاز یا مواد حاوی ذرات جامد معلق درون سیال، انتقال حرارت به سیال سریع‌تر از ذرات جامد بوده و سیال زودتر به دمای استریلیزاسیون می‌رسد، در حالی که مرکز ذرات جامد هنوز به دمای استریلیزاسیون نرسیده است و باید زمان بیشتری حرارت ببیند. در نتیجه آسیب زیادی به کیفیت محصول وارد و ارزش تغذیه‌ای کاهش پیدا می‌کند [۱]. از زمانی که سیستم‌های جدید حرارتی مانند حرارت‌دهی مادون قرمز، حرارت‌دهی اهمیک پا در عرصه صنایع غذایی گذاشته‌اند؛ پیشرفت‌های قابل توجهی در فرآیندهای حرارتی مواد غذایی چند فاز یا مرسوم انتقال حرارت به سه روش هدایت، جابجایی و تابش تقسیم می‌شوند، در حالی که در سیستم‌های جدید حرارتی انتقال حرارت به صورت حجمی بوده و غیر وابسته به هدایت و جابجایی حرارت می‌باشند. به طور کلی، این فرآیند شامل حرارت همزمان دو فاز جامد و مایع بوسیله تولید حرارت درونی می‌باشد؛ که این حرارت همزمان امکان بیش حرارت‌دهی<sup>۱</sup> فاز مایع را به حداقل می‌رساند [۲]. این فرآیند می‌تواند برای محصولاتی که حاوی درصد بالایی ذرات جامد معلق در مایع هستند (مانند سوپ‌ها، خورش‌ها و قطعات میوه در شربت‌ها)، سس‌ها و مایعات حساس به حرارت و همچنین مواد پروتئینی حساس به دناتوره شدن (مانند تخم‌مرغ مایع) با کارایی بالایی مورد استفاده قرار گیرد [۳].

از مزایای فرآوری حرارت‌دهی اهمیک می‌توان به مواردی همچون راندمان و کارایی انرژی بیشتر نسبت به سایر روش‌های حرارت‌دهی مرسوم مانند مایکروویو، کاهش خطر رسوب گرفتگی سطوح انتقال حرارت و همچنین سوختن ماده غذایی، بالاتر بودن یا برابر بودن سرعت گرم شدن در فاز جامد نسبت به فاز مایع، آسانی کنترل فرآیند از طریق روشن و

خاموش کردن سریع سیستم، امکان حرارت‌دهی جریان پیوسته‌ای از مواد غذایی بدن نیاز به سطوح انتقال حرارت، هزینه تعمیرات و نگهداری پایین به علت عدم وجود بخش‌های متحرک و مناسب برای فرآوری مواد غذایی با ویسکوزیته بالا و مواد حساس به برش اشاره نمود.

فرآوری حرارت‌دهی اهمیک دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد که می‌توان مواردی همچون وجود اختلاف در هدایت الکتریکی فازهای جامد و مایع و واکنش متفاوت دو فاز به افزایش دما که سبب حرارت‌دهی نامنظم و پیچیده مواد غذایی مختلف می‌گردد اشاره نمود. همچنین کمبود اطلاعات کافی در رابطه با فاکتورهای بحرانی مؤثر در حرارت‌دهی اهمیک و طراحی دشوار هر دستگاه برای یک خانواده از محصولات که منجر به محدودیت راندمان هدایت الکتریکی می‌شود از محدودیت‌های این روش می‌باشد [۴].

با توجه به نتایج تحقیقات قبلی می‌توان به رفتار حرارت‌دهی اهمیک و هدایت الکتریکی سیستم‌های غذایی دوفازی [۵]، الگوی حرارت‌دهی اهمیک محلول‌های هیدروکلونیدی [۶]، بهینه‌سازی عملیات حرارت‌دهی اهمیک برای غیرفعال‌سازی پکتین متیل استراز در آب پرتقال [۷]، تاثیر ویسکوزیته سیال روی سرعت حرارت‌دهی اهمیک مخلوط‌های جامد-مایع [۸] و مدل‌های حرارت‌دهی اهمیک مخلوط‌های جامد-مایع تحت الگوهای حرارت‌دهی worst-case [۹] اشاره نمود که همگی این موارد در راستای اهداف این پژوهش و بررسی راندمان بالای استفاده از تکنیک حرارت‌دهی اهمیک در صنایع غذایی می‌باشد. بنابراین با توجه به مطالب فوق هدف اصلی این تحقیق را می‌توان در توسعه یک مدل ریاضی دو بعدی جهت پیش‌بینی توزیع همزمان حرارت و الکتریسیته در یک سیستم غذایی دوفازی جامد-مایع، تحت حرارت‌دهی اهمیک دانست. لذا در این راستا به تأثیر فاکتورهای بحرانی غلظت، اندازه، نفوذ و هدایت الکتریکی ذرات بر ویژگی‌های حرارت‌دهی دو فاز و حرارت‌دهی کل مخلوط، پرداخته شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱-۱- مدل‌سازی ریاضی

در این شبیه‌سازی از مدل سیال ساکن استفاده شد [۱۰]. در این مدل، یک ذره استوانه‌ای در وسط یک لوله که از یک سیال

1. over-processing

با توجه به اینکه تولید انرژی در ماده غذایی با مربع شدت جریان ( $I$ ) متناسب است. می‌توان از رابطه زیر برای تعیین انرژی داخلی استفاده نمود:

$$\dot{u} = RI^2$$

$R$  مقاومت الکتریکی را نشان می‌دهد. از این رو با مشخص بودن هدایت الکتریکی و گرادیان ولتاژ هر دو فاز می‌توان انرژی داخلی هر دو فاز از روابط زیر تعیین نمود:

$$\dot{u}_f = |\nabla V|^2 \sigma_{of} (1 + m_f T_f)$$

$$\dot{u}_s = |\nabla V|^2 \sigma_{os} (1 + m_s T_s)$$

$T_s$  و  $T_f$  توسط یک شرایط اولیه بدست می‌آیند. شرایط مرزی خارجی، بوسیله جابجایی به اطراف محاسبه می‌شود:

$$T = 0, T_f = T_s = T_i$$

$$-K_f \cdot \nabla T_f \cdot \vec{n} = U(T_f - T_\infty)$$

که  $\vec{n}$  بردار نرمال واحد،  $U$  ضریب کلی انتقال حرارت و دمای محیط اطراف است.

برای حل معادلات ایجاد شده فوق از ترکیب الگوریتم گالرکین (الگویی از عناصر محدود سه بعدی در مکان) و الگوریتم کرانک-نیکلسون (الگویی از تفاضل محدود در زمان) استفاده شده است. در تحقیق حاضر شبیه‌سازی مدل ارائه شده با بکارگیری روش اجزاء محدود (FEM)، با استفاده از نرم افزار تجاری (COMSOL Multiphasices) انجام گرفت.

## ۲-۲- شکل هندسی و تعریف پارامترهای مدل

در این مدل‌سازی با در نظر گرفتن مدل سیال ساکن دی‌آلویس و فرایر [۱۰]، یک فرآیند شبیه‌سازی دوبعدی برای بررسی اثر فاکتورهای بحرانی روی ویژگی‌های حرارت‌دهی دو فاز به کار برده شد.

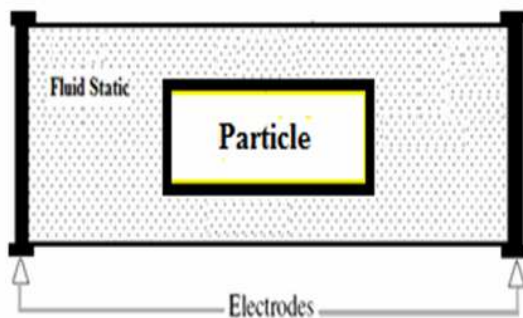


Fig 2 Two-dimensional simulated static heater of ohmic heating process

ساکن پر شده است؛ قرار گرفته و یک میدان الکتریکی در طول لوله اعمال می‌شود (شکل ۱).

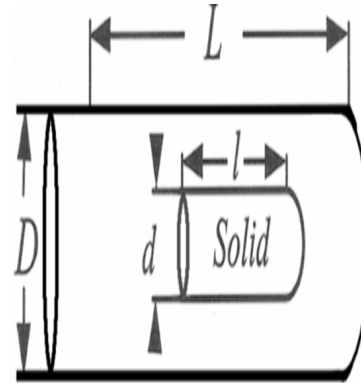


Fig 1 The simulated model of stagnant fluid

توزیع میدان الکتریکی (توزیع ولتاژ) در داخل این میدان که شبیه یک حرارت‌دهنده اهمیت عمل می‌کند، از طریق حل معادله لاپلاس محاسبه می‌شود:

$$\nabla \cdot (\sigma_i \cdot \nabla V) = 0$$

در این رابطه  $V$  ولتاژ،  $\sigma_i$  هدایت الکتریکی فاز  $i$  که می‌تواند مقادیر مختلفی را برای فاز جامد و مایع در بر بگیرد.

$$V_{z=0} = V_0, V_{z=L} = V_L$$

برای اکثر مواد زیستی، هدایت الکتریکی ( $\sigma$ ) رابطه مستقیم خطی با دما دارد که مطابق رابطه زیر است:

$$\sigma = \sigma_0 (1 + mT)$$

$\sigma_0$  هدایت الکتریکی در دمای صفر درجه سلسیوس و  $m$  ضریب اتلاف گرمایی ( $1/^\circ\text{C}$ ) می‌باشد.

با نادیده گرفتن اثر جابجایی، انتقال حرارت از طریق یک هدایت خالص با تولید انرژی درونی همراه است. از این رو در یک حرارت‌دهنده اهمیت توزیع حرارت در یک رسانای ساکن و ذره دربرگرفته آن به ترتیب توسط معادلات زیر بیان می‌شود:

$$\nabla \cdot (k_f \cdot \nabla T) + \dot{u}_f = \rho_f C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot (k_s \cdot \nabla T) + \dot{u}_s = \rho_s C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t}$$

در روابط فوق،  $K$  هدایت الکتریکی،  $\dot{u}$  نرخ تولید انرژی درونی،  $\rho$  دانسیته، ظرفیت گرمایی ویژه،  $T$  دما و  $t$  زمان می‌باشد.  $f$  معرف فاز ساکن یا سیال و  $s$  معرف ذره جامد می‌باشد)

در ضمن در شبیه‌سازی دوبعدی، بعد سوم آن به سمت بی-نهایت بسط داده شده است.

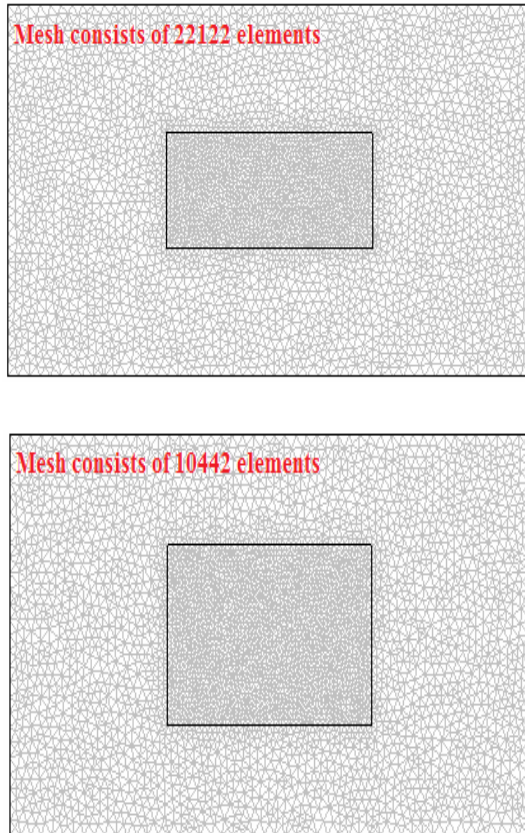


Fig 3 Geometric meshing of cylinder

یک شبیه‌سازی دو بعدی به منظور بررسی اثر اندازه ذرات بر نرخ حرارت دهی فازها انجام گرفت. از این رو از یک ذره جامد با هدایت الکتریکی کمتر نسبت به مایع اطراف خود استفاده شد؛ تا بتوانیم ویژگی‌های حرارت‌دهی اهمیک مخلوط جامد-مایع را در دو سطح مقطع متفاوت ذره بررسی نماییم. در واقع فاز پراکنده شامل یک ذره سیب‌زمینی استوانه‌ای شکل بود که در دو حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت. حالت A شامل ذره‌ای با ارتفاع ۰/۰۳۸ و قطر ۰/۰۱۵ متر و حالت B ذره‌ای با ارتفاع ۰/۰۳۸ متر و قطر ۰/۰۲۳ متر بود. در هر دو حالت ذره سیب‌زمینی در سیالی با هدایت الکتریکی مشخص فرو برده شد. سیال مورد نظر شامل محلول ۵ درصد کربوکسی متیل سلولز (CMC) در ۰/۵ درصد کلرید سدیم بود. شبیه‌سازی در یک هیتر ایستا با طول ۰/۲۰۱ متر و قطر ۰/۰۵۱ متر صورت گرفت. الکترودها بصورت خطی شبیه‌سازی شد. ذرات جامد مطابق شکل ۲ در مرکز هیتر و در جهت میدان الکتریکی قرار داده شدند. شکل هندسی و تعداد مش‌ها برای هر دو ذره (A و B) در شکل ۳ آورده شده است. حرارت اعمالی یکنواخت بوده و مرزهای خارجی عایق فرض شدند. گرادیان ولتاژ برای هر دو حالت ۰/۸ kv/m بود.

تمام پارامترهای فیزیکی در این شبیه‌سازی از نتایج آزمایشگاهی بدست آمده توسط بررسی‌های گذشته بدست آمده است [۹ و ۱۱]. برای بررسی اثر اندازه ذره بر نرخ حرارت‌دهی استخراج شدند (جدول ۱).

Table 1 Physical parameters of two dimensional simulations

Physical parameters	Unit	Amount
Electrical conductivity of fluid at 0 °C	S/m	0.38
Electrical conductivity of solid at 0 °C	S/m	0.2533
Thermal conductivity of fluid	W/m. K	0.5765
Thermal conductivity of solid	W/m. K	0.5497
Heat loss coefficient	1/°C	0.045
specific heat of liquid and solid	J/kg.°C	3.569
Density	kg/m <sup>3</sup>	1000
Applied Voltage	V	124.7

می‌شود. در شبیه‌سازی دو بعدی، به بررسی پدیده Worst-cast پرداخته شده است؛ که در آن هدایت الکتریکی ذره کمتر از سیال اطراف می‌باشد. در نتیجه امکان بیش‌فرآوری سیستم افزایش می‌یابد. شکل ۴ پروفایل تغییرات دمایی برای دو ذره سیب‌زمینی با اندازه‌های متفاوت را نشان می‌دهد. همانگونه که

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- اثر اندازه ذرات روی توزیع حرارت

هدایت الکتریکی به عنوان یک پارامتر تعیین کننده نرخ حرارت‌دهی، باعث تغییرات عمده در نوع پردازش سیستم

سازی در فرآیند پختن، دما را در نقاط مختلف گوشت پیش-بینی کنند.

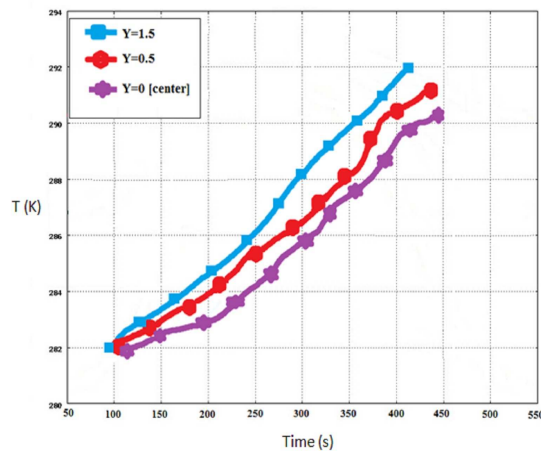


Fig 5 Temperature profile of potatoes slices from the center to the surface

آنها همچنین کیفیت قسمت‌های گوشت را نیز در این فرآیند مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با گذشت زمان مرکز گوشت سردترین نقطه باقی ماند و هرچه فاصله از مرکز ذره دور و به اطراف نزدیک شود؛ دما افزایش می‌یابد. این تغییرات بر روی کیفیت قسمت‌های مختلف نیز تأثیر گذار بود. این نتایج با نتیجه این پژوهش کاملاً همخوانی داشت.

همان گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است با افزایش اندازه ذره، تولید حرارت کاهش یافته است. با توجه اینکه بسیاری از تحقیقات انجام گرفته نشان داده‌اند که با افزایش سطح ذره‌ها در میدان، تولید حرارت نیز افزایش می‌یابد، ولی این حالت مربوط به زمانی است که ذره جامد دارای هدایت الکتریکی بیشتر یا برابر با فاز مایع باشد. در صورتی که در پدیده Worst-Case که به عنوان یک حالت غیرایده‌آل در شبیه‌سازی دویعدی در تحقیق حاضر بکار برده شده است، با افزایش سطح ذره نتیجه عکس می‌دهد و باعث بیش فرآوری سیستم می‌گردد.

ژو و همکاران [۱۵] هدایت الکتریکی غذایی دوفازی مایع-جامد را بوسیله انتقال حرارت اهمیک در یک سیستم مشابه این تحقیق که فاز مایع شامل نشاسته ۵ درصد با ۱/۵-۰/۱۵ درصد نمک و فاز ذره ای شامل سیب زمینی، ذرت، تربچه و گوشت خوک بود، اندازه گیری و مدل‌سازی کردند. در تحقیقات انجام گرفته توسط آنها نیز پدیده Worst-Case رخ داده و با افزایش اندازه ذره، تولید حرارت کاهش یافت.

مشاهده گردید؛ هر دو ذره هدایت الکتریکی کمتری نسبت به سیال اطراف خود دارند. این تفاوت می‌تواند توزیع حرارت داخل ذره را منحرف کند که در نتیجه آن شیب‌های دمایی مشخصی درون ذره بوجود آمده است. این پدیده توسط سایر محققان نیز بررسی شده است [۱، ۹ و ۱۳-۱۱].

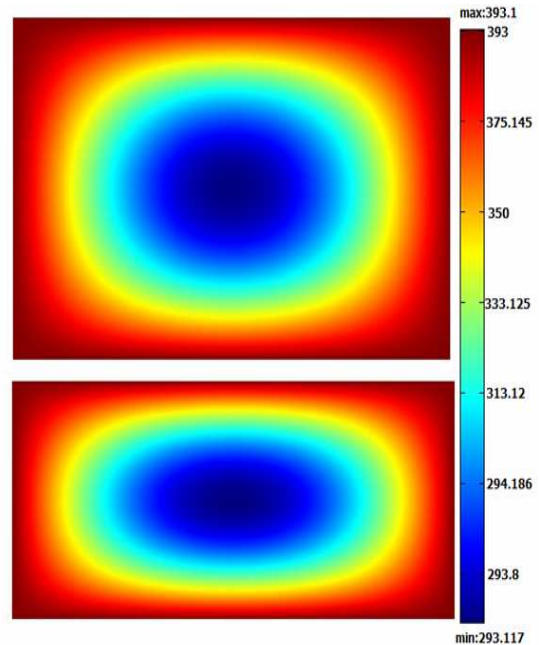
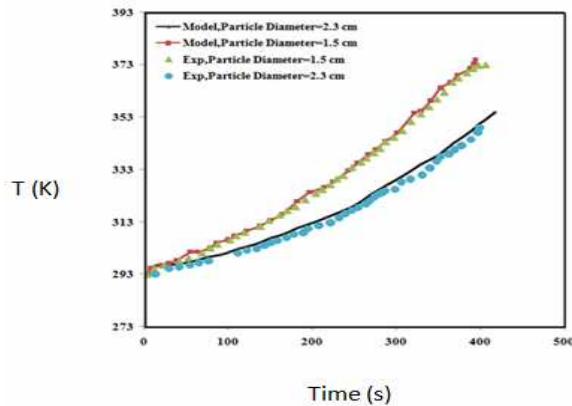


Fig 4 Temperature profiles in two potato slice with different sizes

اتلاف حرارت موضعی باعث افزایش تفاضل دمایی بین ذره سیب‌زمینی و محلول اطرافش می‌شود که نتیجه آن افزایش نرخ انتقال حرارتی درون محلول نسبت به مرکز ذره سیب‌زمینی بود. از این رو نقاط سرد از مرکز ذره به کناره‌ها نیز کشیده شده‌اند. با توجه به شکل ۴ می‌توان بیان کرد که دمای ذره عایق با هدایت کمتر به طور مشخص باعث افت حرارتی بیشتر در فاز سیال با هدایت بیشتر شده است که نتیجه آن توزیع جریان غیر یکنواخت حرارتی داخل سیستم دو فازی است. شکل ۵ توزیع جریان غیریکنواخت و نقاط سرد بوجود آمده را در فواصل مکانی معین ذره نشان می‌دهد. مشخص است که مرکز ذره با اطراف آن اختلاف دمایی دارد، سردترین نقطه ذره در مرکز ذره قرار دارد و با گذشت زمان همچنان سردترین نقطه باقی مانده است. با فاصله گرفتن از مرکز ذره دما افزایش می‌یابد. این نتایج شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده توسط [۱۲ و ۱۳] مطابقت داشت.

انگچوان و همکاران [۱۴] فرآیند حرارت‌دهی اهمیک را بر روی گوشت خوک اعمال کردند تا بتوانند بر اساس یک مدل-



**Fig 7** Temperature profiles in the potato slice with a diameter of 1.5 cm, after 10 minutes

آنها گزارش نمودند که با این روش می‌توان محصولاتی با ماندگاری طولانی تهیه نمود. در روش اهمیک پروفایل تغییرات دمایی کاملاً یکنواخت بوده و همین امر موجب حفظ کیفیت محصولات می‌گردد.

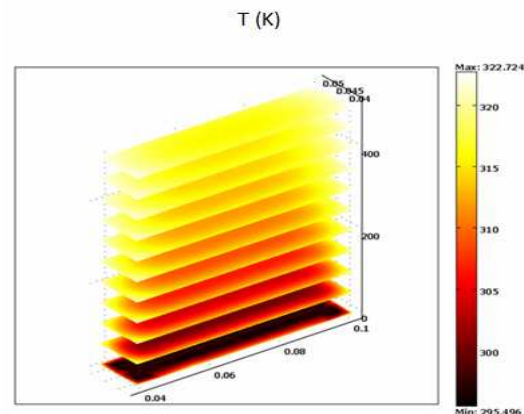
مدل‌سازی الگوهای حرارت‌دهی یک سیستم غذایی چندفازی شامل ۳ جزء جامد (مکعب‌های سیب زمینی، گوشت و هویج) و ۱ جزء مایع (محلول نمک طعام ۳ درصد) با هدایت‌های الکتریکی منحصر به فرد با استفاده از کدهای دینامیک سیالات محاسباتی بررسی گردید. طبق نتایج بدست آمده، دماهای پیش‌بینی شده توسط مدل همخوانی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی با حداکثر خطای ۶ درجه سلسیوس نشان داد. همچنین نقاط داغ حرارت‌دهی در محدوده عمودی مکعب‌های جامد و نقاط سرد بین ذره‌هایی که فاقد دانسیته جریان بودند مشاهده شد [۱۷].

قادری و همکاران (۱۳۹۳) شبیه‌سازی و مدل‌سازی سه بعدی فرآیند حرارتی اهمیک را در یک سیستم غذایی دوفازی بررسی نمودند. در پژوهش آنها از یک شبیه‌سازی سه بعدی جهت بررسی اثر توزیع ذرات (غلظت)، نفوذ نمک و هدایت الکتریکی استفاده گردید. نتایج نشان داد همخوانی تقریبی خوبی بین نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی شده و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد و با افزایش غلظت، نمک و هدایت الکتریکی، نرخ حرارت‌دهی افزایش می‌یابد [۱۸].

#### ۴- نتیجه گیری

این مدل‌سازی از حل همزمان معادلات انتقال حرارت و الکتریسیته با استفاده از روش اجزاء محدود به کمک نرم‌افزار

سالنگه و همکاران [۹] پدیده Worst-case را در یک سیستم دوفازی جامد-مایع توسط انتقال حرارت اهمیک بررسی کردند. آنها دو حالت مختلف شامل اینکه هدایت الکتریکی ذره جامد بیشتر یا کمتر از مایع اطراف خود باشد؛ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد زمانی که هدایت الکتریکی ذره جامد معلق از مایع اطراف خود کمتر باشد پدیده Worst-case رخ می‌دهد. نتایج پژوهش‌های انجام شده با نتایج این پژوهش کاملاً مطابقت داشت.



**Fig 6** Temperature-time Profiles

#### ۳-۲- پروفایل تغییرات دمایی دو ذره

#### سیب‌زمینی دارای ابعاد متفاوت

همانگونه که در شکل ۷ نشان داده شده است؛ روند مشخصی از پروفایل تغییرات دمایی را طی فرآیند حرارت‌دهی اهمیک مشاهده شد. یکنواختی پروفایل توزیع دمایی بخاطر افزایش محتوای الکترولیتیکی ذره و تأثیر میدان ب روی ذره (عدم وجود انشعاب جریان) بود. هر چه هدایت الکتریکی سیال و ذره بیشتر باشد افزایش دما سریعتر و در زمان کوتاه‌تری صورت می‌گیرد. زمانی که هدایت الکتریکی ذره از سیال بیشتر یا برابر آن باشد، تأثیر میدان الکتریکی بروی ذره بیشتر خواهد بود [۱۵].

پارک و همکاران [۱۶] کیفیت ماندگاری سبزیجاتی با اسیدیته پایین را که بوسیله روش حرارت‌دهی اهمیک استریلیزه شده بودند، مورد ارزیابی قرار دادند.

نتایج نشان داد که انتقال حرارت یکنواخت توسط روش اهمیک در حین استریلیزاسیون این سبزیجات؛ موجب عدم تغییر رنگ محصولات شده است.

- [8] Wadad, G., Sudhir, K., Sastry, S. (1996). Effect of viscosity on the ohmic heating rate of solid-liquid mixtures. *Journal of Food Engineering*, 27: 145-158.
- [9] Salengke, S., Sastry, S.K. (2007). Models for Ohmic Heating of solid-liquid mixtures under worst-case heating scenarios. *Journal of Food Engineering*, 83: 337-355.
- [10] 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: 1547-1559.
- [11] Salengke, S., Sastry, S.K. (2007). Experimental investigation of Ohmic Heating of solid-liquid mixtures under worst-case heating scenarios. *Journal of Food Engineering*, 86: 324-336.
- [12] Palaniappan, S., Sastry, S. (1991). Electrical conductivities of selected solid foods during Ohmic Heating. *Journal of Food Process Engineering*, 14: 136-221.
- [13] Assiry, A.M., Sastry, S.K., Samaranayake, C.P. (2006). Influence of temperature, electrical conductivity, power and pH on ascorbic acid degradation kinetics during Ohmic Heating using stainless steel electrodes. *Bio-electrochemistry*, 68: 7-13.
- [14] Engchuan, W., Jittanit, W., Garnjanagoonchorn, W. (2014). The ohmic heating of meat ball: Modeling and quality determination. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 23:121-130.
- [15] 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: 1666-1672.
- [16] Park, I.K. Kang, D.H. (2013). Effect of electropermeabilization by ohmic heating for inactivation of Escherichia coli O157:H7, Salmonella enterica serovar Typhimurium, and Listeria monocytogenes in buffered peptone water and apple juice. *Applied and Environmental Microbiology*, 79(23), 7122-7129.
- [17] Shim, J., Lee, S.H., Jun, S. (2010). Modeling of ohmic heating patterns of multiphase food products using computational fluid dynamics codes. *Journal of Food Engineering*, 99, 136-141.
- [18] Ghaderi, S., Ghanbari, V., Kashaninejad, M., Ganje, M. (2013). Three-dimensional modeling and simulation of Ohmic Heating processing in a two-phase food system. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 45: 161-167.
- COMSOL انجام شد. بر مبنای مدل اولیه سیال ساکن یک شبیه‌سازی دو بعدی برای بررسی اندازه ذرات روی توزیع حرارت بکار برده شد. نتایج نشان داد سازگاری تقریبی خوبی بین نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی شده و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. در مجموع می‌توان بیان نمود که تکنیک حرارت-دهی اهمیت در مقایسه با فرآیندهای حرارت‌دهی مرسوم دارای قدرت سرمایه‌گذاری، کیفیت و ایمنی بالاتری برای محصول نهایی است. با وجود پتانسیل بالا، متأسفانه این روش کاربرد صنعتی فراوانی در دنیا پیدا نکرده است. یکی از دلایل عمده آن را می‌توان وجود عدم اطلاعات کافی آزمایشگاهی در مورد فاکتورهای بحرانی مؤثر بر فرآیند بخصوص در سیستم‌های پیوسته، به دلیل وجود مشکلات عمده در مانیتور کردن دمای حرکت ذرات در حالت پیوسته دانست.

## ۵- منابع

- [1] Sastry, S.K., Cornelius B.D. (2002). Aseptic Processing of Foods Containing Solid Particulates. *Wiley-Interscience*, 43-50.
- [2] Amatore, C., Berthou, M., Hébert, S. (1998). Fundamental principles of electrochemical ohmic heating of solutions. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 457, 191-203.
- [3] Kim, H.J., Choi, Y.M., Yang, T.C.S., Taub, I A., Tempest, P., Skudder, P., Tucker, G., Parroa, D.L. (1996). Validation of Ohmic Heating for Quality Enhancement of Food Products. *Journal of Food Technology*, 50, 253-261.
- [4] Knirsch, M.C., Alves dos Santos, C., Martins de Oliveira Soares Vicente, A.A., Vessoni Penna, T.C. (2010). Ohmic heating – a review. *Trends in food science & technology*, 21: 436-441.
- [5] Zareifard, M.R., Ramaswamy, H.S, Trigui, M., Marcotte, M. (2003). Ohmic heating behaviour and electrical conductivity of two-phase food systems. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 4: 45-55.
- [6] Marcotte, M., Ramaswamy, H.S., Piette, J.P.G. (1998). Ohmic heating behavior of hydrocolloid solutions. *Food research international*, 31: 493-502.
- [7] Demirodoven, A., Baysal, T. (2012). Optimization of ohmic heating applications for pectin methyl esterase inactivation in orange juice. *Journal of food science and technology*, 12: 1-10.

## Two-dimensional modeling and simulation of Ohmic heating processing in a two-phase food system

Ghaderi, S. <sup>1</sup>, Moayedi, A. A. <sup>2</sup>, Oleyaei, S. A. <sup>3,4\*</sup>, Bakhsh Amin, M. R. <sup>5</sup>

1. Social Department of Health Research Center, Yasuj University of Medical Science, Ysuj, Iran.
2. Seed and Plant Improvement Institute, Crop Science Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran.
3. Agricultural Engineering Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran.
4. Ph.D Candidate of Food Engineering, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
5. Quality control manager, Tamata Agro-industry group, Khoshab Khorasan Tomato Paste Factory.

(Received: 2015/10/18 Accepted: 2016/06/14)

In this study, we modeled the simultaneous heat and electricity transfer in a solid-liquid two-phase system in order to determine the critical factors affecting the ohmic heating process. In this modeling, by considering the static fluid model of De Elwis and Fryer, a two-dimensional simulation was done by the commercial COMSOL software in order to investigate the effect of the particle size on the rate of phase heating. So, a solid particle with a lower electrical conductivity comparing with its surrounding liquid, was used to determine the ohmic heating properties of the solid-liquid mixture in two different cross-sections. The dispersed phase consisted of a cylindrical piece of potato with two different sizes and the fluid consisted of a 5% solution of carboxymethyl cellulose (CMC) at 5.0% sodium chloride. The results showed a good approximate agreement between the results of the simulation model and the experimental results. The heating rate decreased with increasing the particle size and conformed to the Worst-Case phenomenon which was used as a non-ideal circumstance in the two-dimensional simulation in the current research. The coldest point was in the center of the particle and as the time proceeded, it remained the coldest and as the distance from this point increased, the temperature increased. It can be concluded that the influence of heat and electricity throughout the heating process is faster than conventional methods of heating and occurs in both liquid and solid phase uniformly and almost with the same speed.

**Key words:** Ohmic heating, Modelling, Solid-liquid phase, Potato.

---

\* Corresponding Author E-Mail Address: S.A.Oleyaei@stu.um.ac.ir