

شبیه‌سازی و مدل‌سازی سه‌بعدی فرایند حرارت‌دهی اهمیک در سیستم غذایی دو فازی

سجاد قادری^{۱*}، مهدی کاشانی‌نژاد^۲، وحید قنبری^۳، محمد گنجه^۴

۱. دانشجوی دکتری تکنولوژی مواد غذایی دانشگاه فردوسی مشهد

۲. دانشیار مهندسی مواد غذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳. کارشناس ارشد تکنولوژی مواد غذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۴. کارشناس ارشد تکنولوژی مواد غذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۲۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۶/۲۶)

چکیده

اساس فرایند حرارت‌دهی اهمیک (Ohmic Heating) عبور جریان الکتریکی متناوب از محلول‌های چندفازی و در پی آن تولید حرارت به دلیل مقاومت ذرات محلول در برابر عبور جریان الکتریکی است. در این تحقیق به منظور بررسی اثر فاکتورهای بحرانی مؤثر بر این فرایند، انتقال هم‌زمان حرارت و الکتریسیته در یک سیستم غذایی دوفازی جامد-مایع مدل‌سازی شد. در این مدل‌سازی از یک شبیه‌سازی سه‌بعدی برای 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. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت در فرایند حرارت‌دهی اهمیک نفوذ حرارت و الکتریسیته در سرتاسر محصول سریع‌تر از روش‌های مرسوم حرارت‌دهی است و در هر دو فاز مایع و جامد به‌طور یکسان و تقریباً با سرعت برابر صورت می‌گیرد.

کلیدواژه‌گان: حرارت‌دهی اهمیک، فاز جامد-مایع، مدل‌سازی.

مقدمه

اساس فرایند حرارت‌دهی اهمیک (OH=Ohmic Heating) بر مبنای عبور جریان متناوب الکتریکی (AC) از مواد غذایی و در پی آن تولید حرارت در مواد غذایی به دلیل مقاومت‌هایی که ذرات آن در برابر عبور جریان الکتریکی از خود نشان می‌دهند، است. در واقع می‌توان گفت در حرارت‌دهی اهمیک، مواد غذایی بخشی از یک مدار الکتریکی را تشکیل می‌دهند (Knirsch *et al.*, 2010). از این‌رو حرارت‌دهی اهمیک امکان استفاده از تکنیک‌های HTST و UHT را برای مواد غذایی دارای ذرات معلق در سیال و سیالات ویسکوز، بدون آسیب حرارتی و افت کیفیت تغذیه‌ای آن‌ها فراهم می‌کند و قادر است ذرات جامد را با سرعتی مشابه یا حتی سریع‌تر از سیال حامل گرم کند که این حالت با روش‌های مرسوم حرارت‌دهی امکان‌پذیر نیست. در منابع گوناگون از این پدیده تحت عنوان وارونگی حرارتی یاد شده است (Goullieux and Pain, 2005).

از مزایای فراوری حرارت‌دهی اهمیک می‌توان به مواردی همچون راندمان و کارایی انرژی بیشتر در مقایسه با سایر

روش‌های حرارت‌دهی مرسوم مانند مایکروویو، کاهش خطر رسوب، گرفتگی سطوح انتقال حرارت، سوختن ماده غذایی، بالاتر بودن یا برابر بودن سرعت گرم‌شدن در فاز جامد در مقایسه با فاز مایع، آسانی کنترل فرایند 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 پائین به‌علت وجودنداشتن بخش‌های متحرک و مناسب برای فراوری مواد غذایی با ویسکوزیته بالا و مواد حساس به برش اشاره کرد (Knirsch *et al.*, 2010).

مدل‌سازی و پیش‌بینی توزیع حرارت و الکتریسیته در طول دوره حرارت‌دهی اهمیک در سیستم‌های غذایی چندفازی با توجه به تأثیر هدایت الکتریکی متفاوت فازها، اندازه گوناگون ذرات، میزان نفوذ متفاوت ذرات، دما، و غلظت گوناگون فازها و مانند اینها چالش اصلی این فرایند به‌شمار می‌آید. البته در این زمینه تحقیقاتی اندکی انجام شده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود.

مدل‌سازی الگوهای حرارت‌دهی سیستم غذایی چندفازی شامل ۳ جزء جامد (مکعب‌های سیب‌زمینی، گوشت، و هویج) و ۱ جزء مایع (محلول نمک طعام ۳ درصد) با هدایت‌های

الکتریکی منحصربه‌فرد با استفاده از کدهای دینامیک سیالات محاسباتی بررسی گردید. طبق نتایج به‌دست‌آمده، دماهای پیش‌بینی شده با 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 (Shim et al., 2010).

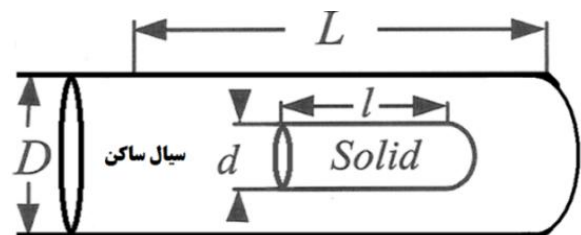
در تحقیقی حساسیت فراوری حرارت‌دهی اهمیت برای محصولات سوپ دارای ذرات جامد زیاد با استفاده از یک بسته مدل‌سازی کامپیوتری معتبر تحلیل شد. هدف از این مدل‌سازی تعیین فاکتورهای کنترل بحرانی و دامنه کنترل قابل قبولشان بود. این فاکتورها شامل هدایت‌های الکتریکی سیال حامل و ذرات جامد، ضریب نفوذ حرارت جزئی، ضریب انتقال حرارت سطحی، اندازه ذرات، غلظت ذرات، سرعت جریان، و دمای اولیه محصول بود (Chen et al., 2010).

بنابراین با توجه به مطالب فوق هدف اصلی این تحقیق را می‌توان در توسعه مدلی ریاضی دوبعدی برای پیش‌بینی توزیع هم‌زمان حرارت و الکتریسیته در یک سیستم غذایی دوفازی جامد-مایع، تحت حرارت‌دهی اهمیت دانست. از این‌رو 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.

مواد و روش‌ها

مدل‌سازی ریاضی

در این شبیه‌سازی از مدل سیال ساکن استفاده شد. در این مدل، ذره‌ای استوانه‌ای در وسط لوله‌ای که از یک سیال ساکن پر شده است، قرار می‌گیرد و میدانی الکتریکی در طول لوله اعمال می‌شود (De Alwis and Fryer, 1990; Fryer et al., 1993) (شکل ۱).



شکل ۱. مدل شبیه‌سازی شده سیال ساکن

توزیع میدان الکتریکی (توزیع ولتاژ) در داخل این میدان که شبیه یک حرارت‌دهنده اهمیت عمل می‌کند از طریق حل

معادله لاپلاس محاسبه می‌شود:

$$\nabla \cdot (\sigma_i \cdot \nabla V) = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه V ولتاژ، σ_i هدایت الکتریکی فاز i که می‌تواند مقادیر گوناگونی را برای فاز جامد و مایع در بر بگیرد.

$$V_{z=0} = V_0 V_{z=L} = V_L \quad (\text{رابطه ۲})$$

برای اکثر مواد زیستی، هدایت الکتریکی (σ) رابطه مستقیم خطی با دما دارد که مطابق رابطه ۳ است:

$$\sigma = \sigma_0 (1 + mT) \quad (\text{رابطه ۳})$$

σ_0 هدایت الکتریکی در دمای صفر درجه سلسیوس و m ضریب اتلاف گرمایی ($1/^\circ\text{C}$) است.

با نادیده گرفتن اثر جابه‌جایی، انتقال حرارت از طریق هدایتی خالص با تولید انرژی درونی همراه است. از این‌رو در یک حرارت‌دهنده اهمیت توزیع حرارت در یک رسانای ساکن و ذره دربرگرفته آن به ترتیب با معادلات ۴ و ۵ بیان می‌شود:

$$\nabla \cdot (k_f \cdot \nabla T) + \dot{u}_f = \rho_f C_{Pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$\nabla \cdot (k_s \cdot \nabla T) + \dot{u}_s = \rho_s C_{Ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (\text{رابطه ۵})$$

در روابط ذکر شده، K هدایت الکتریکی، \dot{u} نرخ تولید انرژی درونی، ρ دانسیته، ظرفیت گرمایی ویژه، T دما، و t زمان است. (f معرف فاز ساکن یا سیال و s معرف ذره جامد است) با در نظر گرفتن اینکه تولید انرژی در ماده غذایی با مربع شدت جریان (I) متناسب است. می‌توان از رابطه ۶ برای تعیین انرژی داخلی استفاده کرد:

$$\dot{u} = RI^2 \quad (\text{رابطه ۶})$$

R مقاومت الکتریکی را نشان می‌دهد. از این‌رو با مشخص بودن هدایت الکتریکی و گرادیان ولتاژ هر دو فاز می‌توان انرژی داخلی هر دو فاز از روابط ۷ و ۸ تعیین کرد:

$$\dot{u}_f = |\nabla V|^2 \sigma_{0f} (1 + m_f T_f) \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$\dot{u}_s = |\nabla V|^2 \sigma_{0s} (1 + m_s T_s) \quad (\text{رابطه ۸})$$

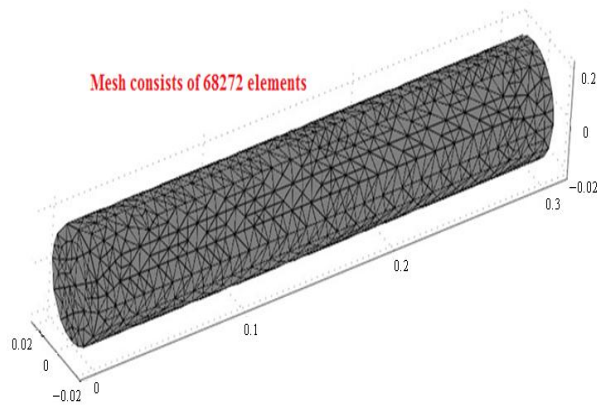
T_f و T_s توسط شرایط اولیه به‌دست می‌آیند. شرایط مرزی خارجی، به‌وسیله جابه‌جایی به اطراف محاسبه می‌شود:

$$T = 0, T_f = T_s = T_i \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$-K_f \cdot \nabla T_f \cdot \vec{n} = U (T_f - T_\infty) \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

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

حرارت انجام گرفت. برای شبیه‌سازی از یک سیلندر استوانه‌ای با شعاع (۲/۴۸cm)، فاصلهٔ میان الکترودها (۲۰/۶۹cm و ۳۰) و سطح مقطع الکترودها (1cm^2) استفاده شد (شکل ۲). جریان AC با قدرت میدان (۷/۲۴kv/m) و فرکانس ۵۰-۶۰ هرتز استفاده برقرار شد. تعداد مش‌ها مرکب از ۶۸۲۷۲ گره بود.



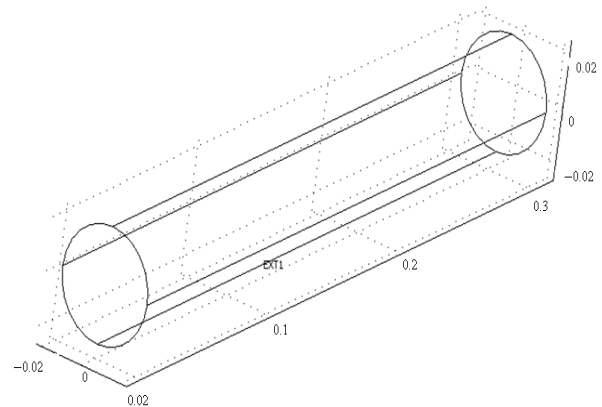
شکل ۳. مش‌بندی هندسی سیلندر استوانه‌ای

محلول‌های غذایی بررسی‌شده در شبیه‌سازی سه‌بعدی شامل محلول نشاسته ۴ درصد خالص و محلول نشاسته ۴ درصد به‌همراه ۱ درصد کلرید سدیم بود. تمام پارامترهای فیزیکی در این شبیه‌سازی (برای بررسی اثر توزیع ذرات، نفوذ نمک، و هدایت الکتریکی بر نرخ حرارت‌دهی)، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی حاصل از کارهای پژوهشی گذشته تهیه گردیدند (Marcotte et al., 1998) (جدول ۱).

برای حل معادلات ایجادشده مذکور از ترکیب الگوریتم گالرکین (الگوی از عناصر محدود سه‌بعدی در مکان) و الگوریتم کرانک-نیکلسون (الگوی از تفاضل محدود در زمان) استفاده شده است. در تحقیق حاضر شبیه‌سازی مدل ارائه‌شده با به‌کارگیری روش اجزا محدود (FEM)، با نرم‌افزار تجاری (COMSOL- multi-physics) انجام گرفت.

شکل هندسی و تعریف پارامترهای مدل

در این مدل‌سازی با در نظر گرفتن مدل سیال ساکن دی‌آلویس و فرایر، فرایند شبیه‌سازی سه‌بعدی برای بررسی اثر فاکتورهای بحرانی روی ویژگی‌های حرارت‌دهی دو فاز به‌کار برده شد.



شکل ۲. سیلندر استوانه‌ای شبیه‌سازی‌شده سه‌بعدی برای فرایند حرارت‌دهی اهمیت

فرایند شبیه‌سازی سه‌بعدی به‌منظور بررسی اثر توزیع ذرات (غلظت)، نفوذ نمک، و هدایت الکتریکی فازها روی توزیع

جدول ۱. پارامترهای فیزیکی به‌کاربرده‌شده در شبیه‌سازی سه‌بعدی

پارامتر فیزیکی	واحد	مقدار
هدایت الکتریکی محلول نشاسته ۴ درصد و نمک طعام ۱ درصد در دمای ۲۵ °C	S/m	۲/۱۰۹
هدایت الکتریکی محلول نشاسته ۴ درصد خالص در دمای ۲۵ °C	S/m	۰/۰۶۹
ضریب اتلاف گرمایی محلول نشاسته ۴ درصد و نمک طعام ۱ درصد در دمای ۲۵ °C	1/°C	۰/۰۴۲۶۷
ضریب اتلاف گرمایی محلول نشاسته ۴ درصد خالص در دمای ۲۵ °C	1/°C	۰/۰۱۸۴
گرمای ویژه محلول نشاسته ۴ درصد و نمک طعام ۱ درصد در دمای ۲۵ °C	J/kg.°C	۴/۰۷۸
گرمای ویژه محلول نشاسته ۴ درصد خالص در دمای ۲۵ °C	J/kg.°C	۱/۷۵۴
ضریب هدایت حرارتی محلول نشاسته ۴ درصد خالص در دمای ۲۵ °C	W/m. K	۰/۳۴
دانسیته محلول نشاسته ۴ درصد و نمک طعام ۱ درصد در دمای ۲۵ °C	kg/m ³	۱۰۰۲

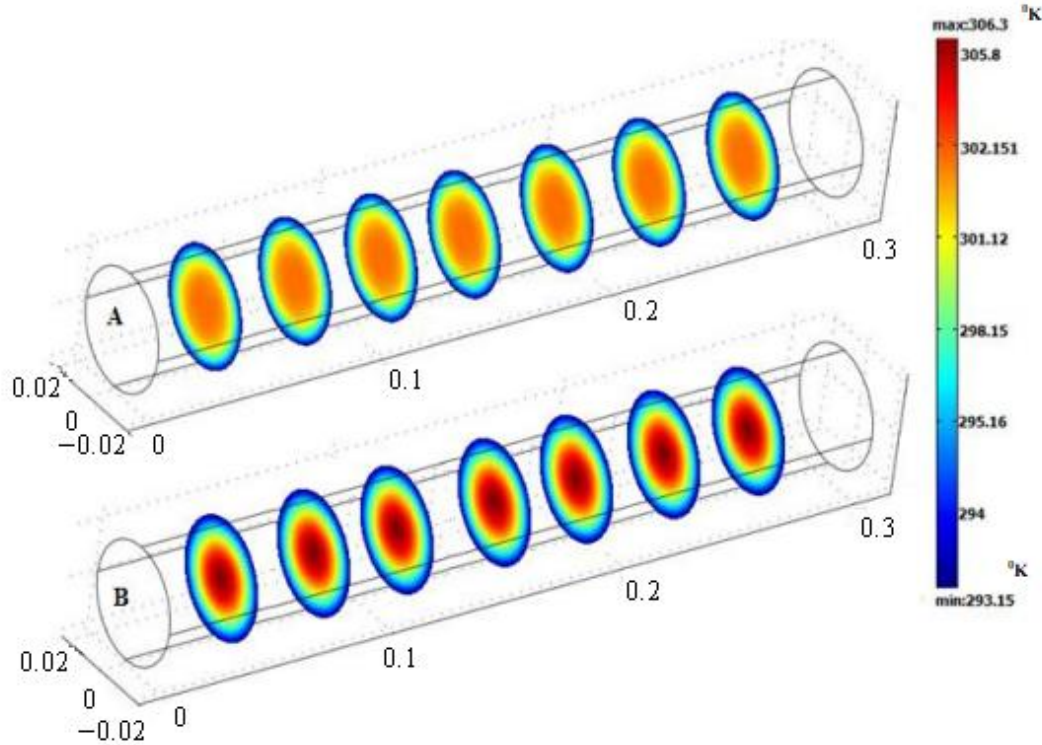
برای محلول نشاسته خالص و شکل B پروفایل تغییرات دمایی را برای محلول نشاسته ۴ درصد با کلرید سدیم ۱ درصد نشان می‌دهد. در این اشکال به‌خوبی می‌توان تأثیر نفوذ نمک در محلول نشاسته را مشاهده کرد. وجود نمک باعث افزایش هدایت الکتریکی محلول شده است (Wang and Sastry, 1993) (وجود

بحث و نتایج

بررسی اثر توزیع ذرات، نفوذ نمک، و هدایت الکتریکی فازها روی توزیع حرارت شبیه‌سازی عددی مدل حرارت‌دهی اهمیت به‌صورت سه‌بعدی در شکل ۴ آورده شده است. شکل A پروفایل تغییرات دمایی را

است. در نتیجه افزون بر افزایش دما، زمان حرارت‌دهی را کاهش داده است. در هر دو شکل یکنواختی حرارت‌دهی به‌خوبی قابل مشاهده است.

خال‌های قرمز تیره در مرکز پروفایل‌های دایره‌ای). در واقع هدایت الکتریکی به‌عنوان فاکتوری کلیدی در فرایند حرارت‌دهی اهمیت باعث افزایش تولید حرارت درونی در محلول غذایی شده

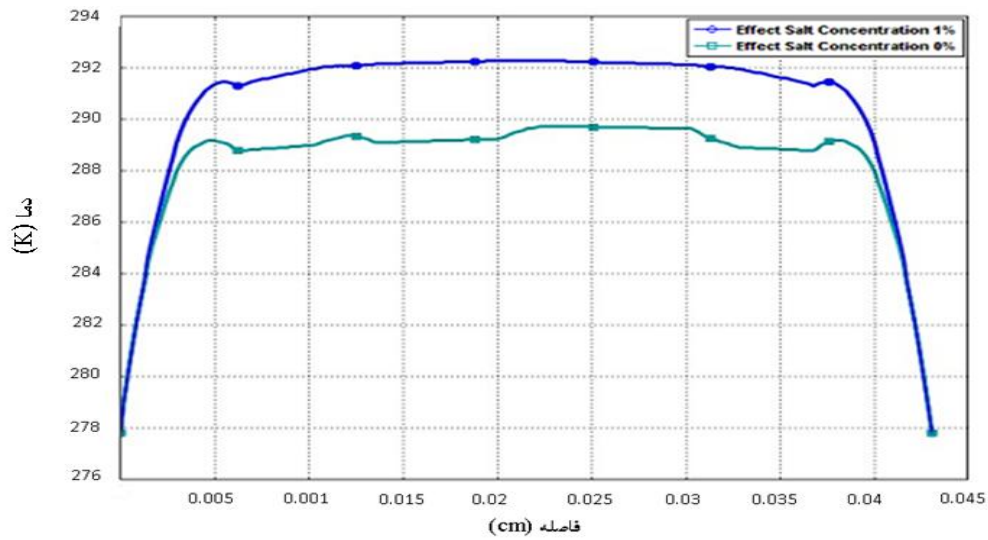


شکل ۴. پروفایل‌های توزیع دما برای نشاسته ۴ درصد خالص (A) و نشاسته ۴ درصد با کلرید سدیم ۱ درصد (B) بعد از ۸ دقیقه حرارت‌دهی

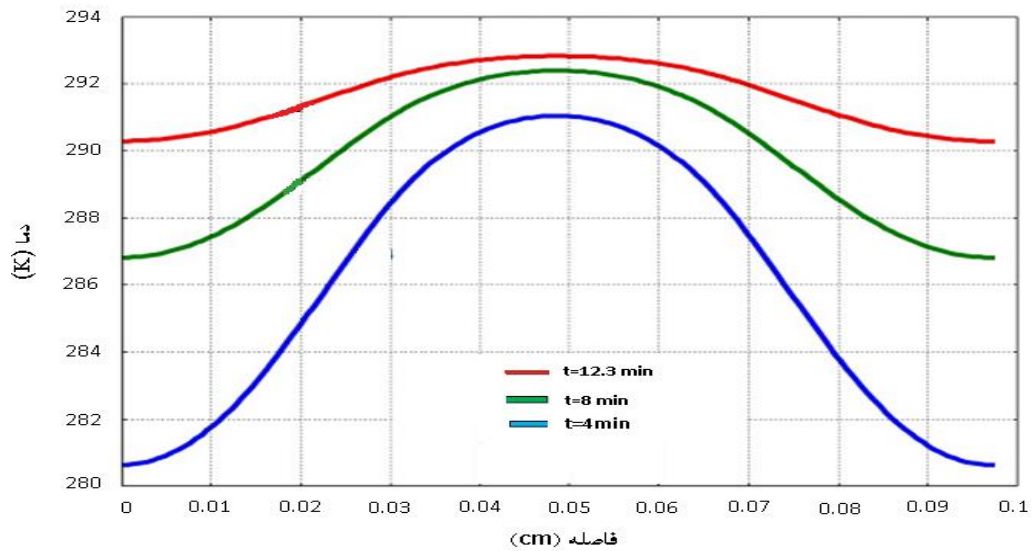
مقاومت کلی آن فاز، نرخ حرارت‌دهی را کنترل می‌کند. بنابراین هدایت الکتریکی پارامتری کلیدی در این فرایند است. افزایش محتوای الکترولیتی باعث افزایش هدایت الکتریکی می‌شود. وابستگی زیاد هدایت الکتریکی به دما، نتیجه افزایش حرکت یون‌ها در ماده هادی با افزایش دما است. تحقیقات انجام‌گرفته نشان داده‌اند که الکترولیت‌هایی مانند نمک‌ها، اسیدها، و بازها از طریق افزایش دما، هدایت الکتریکی محلول را افزایش می‌دهند (Tulsiyan *et al.*, 2008; Assiry *et al.*, 2006; De Alwis and Fryer, 1990; Icier and Ilicali, 2005).

حرکت یون‌ها در ماده هادی همراه با افزایش دما است. تحقیقات نشان داده‌اند که الکترولیت‌هایی مانند نمک‌ها، اسیدها، و بازها از طریق افزایش دما، هدایت الکتریکی محلول را افزایش می‌دهند (Tulsiyan *et al.*, 2008; Assiry *et al.*, 2006; De Alwis and Fryer, 1990; Icier and Ilicali, 2005). شکل ۷ منحنی تغییرات هدایت الکتریکی در مقایسه با زمان، مربوط به محلول نشاسته ۴ درصد با نمک طعام ۱ درصد است. روند افزایشی هدایت الکتریکی با گذشت زمان به‌خوبی قابل مشاهده است.

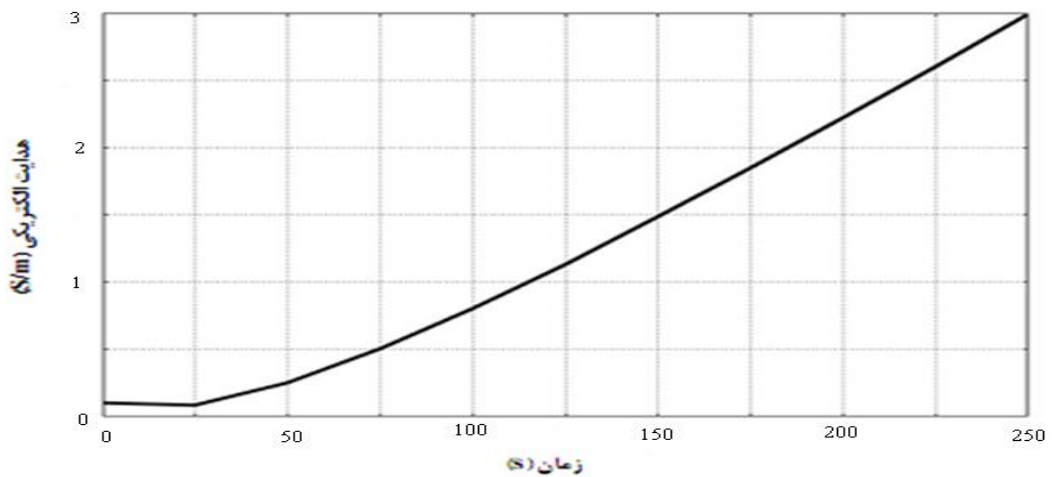
در شکل ۵ پروفایل تغییرات دمایی در برشی شعاعی برای هر دو محلول مشاهده می‌شود. در این شکل تأثیر نمک بر تغییرات دمایی نشان داده شده است. هر دو منحنی نشان می‌دهند که توزیع حرارت در مرکز سیلندر یکنواخت‌تر بوده، در ضمن افزایش حرارت در مرکز سیلندر برای محلول نشاسته ۴ درصد با کلرید سدیم ۱ درصد بیشتر از محلول نشاسته ۴ درصد خالص بوده است، که این امر تأثیر نفوذ نمک در افزایش دما را به‌خوبی نشان می‌دهد (Yang and Swartzel, 1991). شکل ۶ نیز پروفایل تغییرات دمایی را برای محلول نشاسته ۴ درصد با کلرید سدیم ۱ درصد با گذشت زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با گذشت زمان نفوذ حرارت در هر دو فاز افزوده می‌شود و در نتیجه هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر متمایل شدن خطوط توزیع دمایی از حالت زنگوله‌ای به حالت تقریباً افقی با گذشت زمان، افزایش یکنواختی توزیع و نفوذ حرارت در کل محلول را با گذشت زمان نشان می‌دهد. هدایت الکتریکی (σ) هر فاز در طول دوره فرایند حرارت‌دهی اهمیت نقش عمده‌ای را ایفا می‌کند و به‌عنوان



شکل ۵. پروفایل توزیع دما در برشی شعاعی برای محلول نشاسته ۴ درصد خالص () و نشاسته ۴ درصد با کلرید سدیم ۱ درصد ()

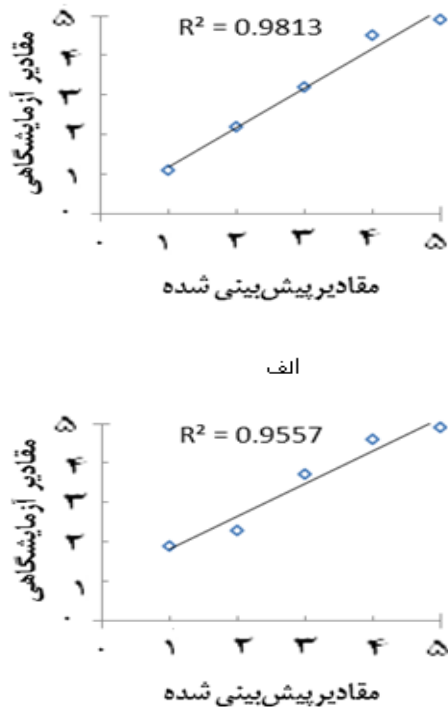


شکل ۶. پروفایل توزیع دما در محلول نشاسته ۴ درصد با کلرید سدیم ۱ درصد با گذشت زمان



شکل ۷. پروفایل تغییرات هدایت الکتریکی در مقابل زمان مربوط به محلول نشاسته ۴ درصد با نمک طعام ۱ درصد

بالای نشان داده شده در این شکل‌ها نشان دهنده دقت قابل قبول این مدل سازی بوده است.

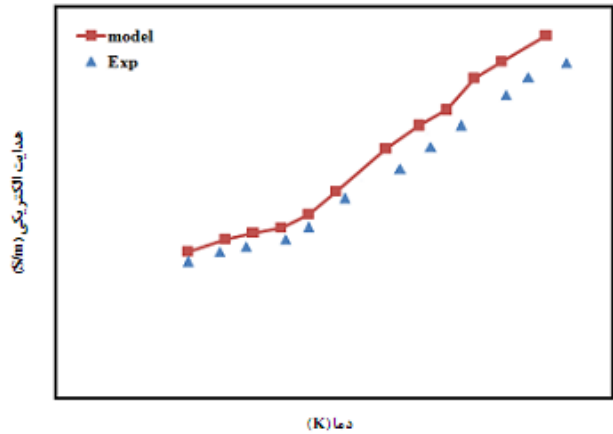


شکل ۱۰. نمودار ارزیابی میزان دقت مدل به وسیله مدل سازی در مقابل مقادیر اندازه گیری شده در دو شرایط آزمایشگاهی نشاسته خالص (الف) و نشاسته همراه با ۱ درصد نمک (ب).

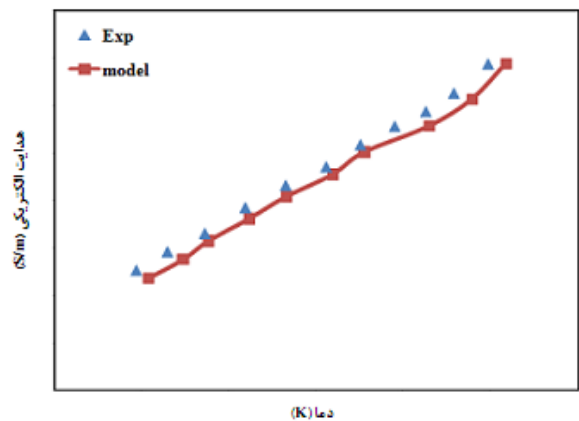
نتیجه گیری

این مدل سازی از حل هم‌زمان معادلات انتقال حرارت و الکتریسیته با استفاده از روش اجزا محدود به کمک نرم افزار تجاری COMSOL انجام شد. بر مبنای مدل اولیه سیال ساکن یک شبیه سازی سه بعدی برای بررسی اثر توزیع ذرات، نفوذ نمک، و هدایت الکتریکی فازها به کار برده شد. نتایج نشان داد هم خوانی تقریبی خوبی بین نتایج حاصل از مدل شبیه سازی شده و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. در مجموع می توان بیان کرد که تکنیک حرارت دهی اهمیت در مقایسه با فرایندهای حرارت دهی مرسوم دارای قدرت سرمایه گذاری، کیفیت، و ایمنی بالاتری برای محصول نهایی خواهد بود، ولی با وجود پتانسیل قوی متأسفانه کاربرد صنعتی فراوانی در دنیا پیدا نکرده است. که از دلایل عمده آن را می توان نبودن اطلاعات آزمایشگاهی کافی در زمینه فاکتورهای بحرانی مؤثر بر این فرایند به ویژه در سیستم های پیوسته، به دلیل وجود مشکلات عمده در پایش دمای حرکت ذرات در حالت پیوسته دانست.

با مقایسه شکل ۸ و ۹ می توان به تأثیر افزایش محتوای الکترولیتی (نمک) بر هدایت الکتریکی محلول پی برد. در هر دو شکل رابطه ای تقریباً خطی بین هدایت الکتریکی و دما دیده می شود، ولی همان گونه که مشاهده می شود شیب منحنی شکل ۸ بیشتر است، که این نتیجه نشان می دهد که حضور ۱ درصد نمک طعام در محلول نشاسته ۴ درصد توانسته هدایت الکتریکی را تا حد زیادی افزایش دهد.



شکل ۸. پروفایل تغییرات هدایت الکتریکی با دما برای محلول نشاسته ۴ درصد با کلرید سدیم ۱ درصد



شکل ۹. پروفایل تغییرات هدایت الکتریکی با دما برای محلول نشاسته ۴ درصد خالص

همچنین برای ارزیابی میزان دقت مدل، با استفاده از دماهای گوناگون یک مدل جدید و کاملاً مشابه مدل قبلی (با همان قوانین) ایجاد گردید و میزان هدایت الکتریکی مجهول در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از این مدل جدید میزان هدایت الکتریکی در این دماها تعیین شد و با مقادیر آزمایشگاهی آنها مقایسه گردید. به این منظور مقادیر هدایت الکتریکی آزمایشگاهی و پیش بینی شده با این مدل در دماهای گوناگون در مقابل هم رسم شدند (شکل ۱۰). ضرایب همبستگی

REFERENCES

- 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.
- Chen, C., Abdelrahim, K., Beckerich, I. (2010). Sensitivity analysis of continuous ohmic heating process for multiphase foods. *Journal of Food Engineering* 98, 257-265.
- 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.
- Fryer, P.J., De Alwis, A.A.P., Koury, E., Stapley, A.G.F., Zhang, L. (1993). Ohmic processing of solid-liquid mixtures: heat generation and convection effects. *Journal of Food Engineering* 18, 101-125.
- Goullieux, A., Pain, J.-P. (2005). 18 - Ohmic Heating, In: Da-Wen, S. (Ed.) *Emerging Technologies for Food Processing*. Academic Press, London, pp. 469-505.
- Icier, F., Ilicali, C. (2005). Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Research International* 38, 1135-1142.
- 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.
- Marcotte, M., Ramaswamy, H.S., Piette, J.P.G. (1998). Ohmic heating behavior of hydrocolloid solutions. *Food Research International* 31, 493-502.
- 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.
- Tulsiyan, P., Sarang, S., Sastry, S.K. (2008). Electrical conductivity of multi-component systems during Ohmic heating. *International Journal of Food Propering* 11, 1-9.
- Wang, W., Sastry, S.K. (1993). Salt diffusion into vegetable tissue as a pretreatment for Ohmic Heating: electrical conductivity profiles and vacuum infusion studies. *Journal of Food Engineering* 20, 299-309.
- Yang, B.B., Swartzel, K.R. (1991). Photo-sensor methodology for determining residence time distributions of particles in continuous flow thermal processing systems. *Journal of Food science* 56, 1076-1081.

