

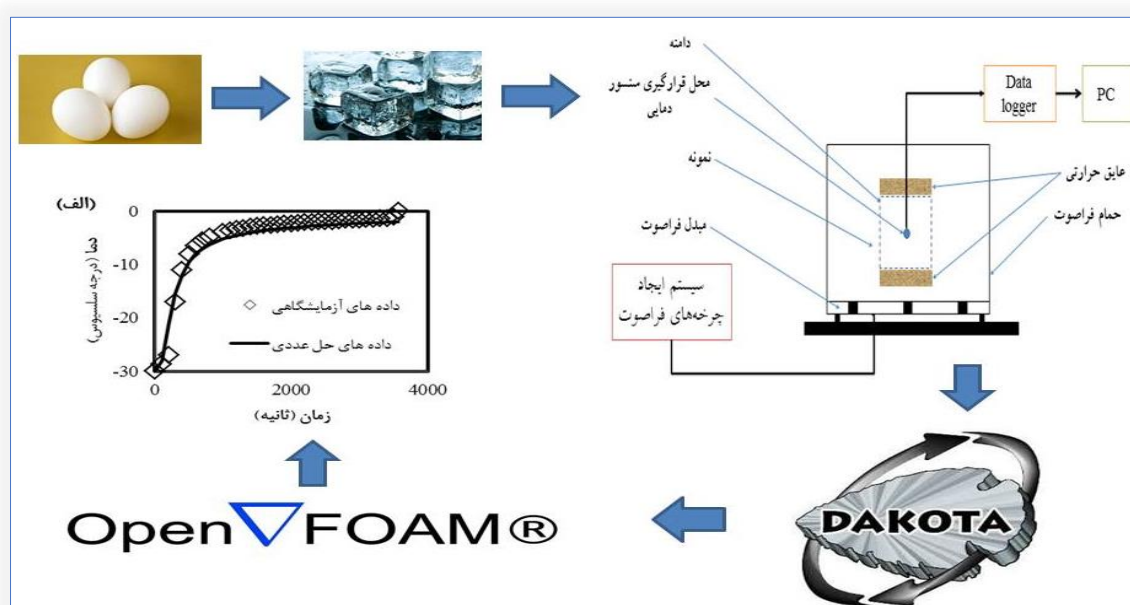
Investigation of Numerical Model of the Thawing Process of Egg White by Different Ultrasound Cycles

Ehsan Mahmoudi¹, Hosein Kiani², Mohsen Esmaili^{*1}

1. Department of Food Science and Technology, Urmia University, Urmia, Iran

2. Bioprocessing and Biodetection Lab (BBL), Department of Food Science and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: Apr. 15, 2021- Accepted: July 13, 2021)



ABSTRACT: In this study, different ultrasound cycles (0, 25, 50 and 75%) were separately applied to optimize the thawing process of frozen egg whites. Frozen egg white samples with temperatures of -30.0 ± 0.5 °C were placed in an ultrasonic bath at 30 °C with ultrasound frequency of 18 kHz to record temperature changes. The experimental data were modeled using OpenFOAM software coupled with the Dakota tool, by a numerical inverse method. The outputs of the inverse modeling were involved fitted heat transfer coefficient and numerical temperature data. The results showed that the use of ultrasonic waves increased the heat transfer coefficient and reduced the thawing process duration. Increasing the sonication duty cycle increased the heat transfer coefficient and further reduced the thawing time, so that the heat transfer coefficient increased from 105.2 to 128.8 W/m²K in 50% cycle without using ultrasound, and to 126.7 W/m²K in 75% cycle and also process time was reduced from 3280 s in absent of ultrasound to 2473 (s) in 75% cycle with the use of ultrasound. Comparison of the model data with the experimental data indicated that there was a high agreement between them ($R^2 > 0.97$), which can be used in other similar foods. The inverse modeling method can be widely used to determine heat transfer coefficient by fitting experimental data with numerical ones.

Keywords: Egg, Numerical modeling, Ultrasound, OpenFOAM, DAKOTA

بررسی مدل عددی فرایند رفع انجماد سفیده تخم مرغ به کمک فراصوت

احسان محمودی^۱، حسین کیانی^۲، محسن اسمعیلی^{*}

۱. گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲. گروه علوم و صنایع غذایی، پردیس کشاورزی دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱/۲۶ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۴/۲۲)

چکیده: در این مطالعه، به منظور بهینه‌سازی فرایند رفع انجماد سفیده تخم مرغ، از چرخه‌های مختلف فراصوت (+، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد) به صورت جداگانه استفاده شد. نمونه‌های سفیده تخم مرغ منجمد با دمای $5 \pm 0/30$ - درجه سلسیوس در حمام فراصوت با دمای ۳۰ درجه سلسیوس و فرکانس ۱۸ کیلوهرتز به منظور ثبت داده‌های دمایی قرار گرفتند. داده‌های آزمایشگاهی به کمک نرم‌افزار اپن فوم جفت شده با ابزار داکوتا، به روش معکوس مدل‌سازی شدند. خروجی حاصل از ابزار مدل‌سازی معکوس شامل ضریب انتقال حرارت برازش یافته و داده‌های دمای عددی بود. نتایج نشان داد که استفاده از امواج فراصوت موجب افزایش ضریب هدایت حرارتی و نیز کاهش مدت زمان فرایند رفع انجماد شد. همچنین افزایش چرخه امواج فراصوت موجب افزایش ضریب انتقال حرارت و کاهش زمان رفع انجماد گردید، به طوری که ضریب انتقال حرارت از $105/2$ (W/m^2K) در حالت بدون استفاده از فراصوت به $128/8$ (W/m^2K) در تیمار ۵۰ درصد و $126/7$ (W/m^2K) در تیمار ۷۵ درصد رسید و زمان فرایند نیز از ۳۲۸۰ ثانیه در حالت بدون استفاده از فراصوت، به ۲۴۷۳ ثانیه در تیمار ۷۵ درصد با استفاده از فراصوت کاهش یافت. مقایسه داده‌های مدل و داده‌های آزمایشگاهی نشان‌دهنده توافق بالای ($R^2 > 0/97$) این داده‌ها بود که می‌تواند در سایر مواد غذایی مشابه مورد استفاده قرار گیرد. ابزار مدل‌سازی معکوس می‌تواند برای تعیین ضریب انتقال حرارت با کمک برازش داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های عددی کاربرد گسترده‌ای داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: تخم مرغ، مدل‌سازی عددی، فراصوت، اپن فوم، داکوتا

مقدمه

انجماد به عنوان یک روش پر کاربرد برای نگهداری مواد غذایی با کیفیت بالا محسوب می شود ولی حفظ کیفیت مطلوب به میزان قابل توجهی به فرایند رفع انجماد بستگی دارد. با اینکه تحقیقات متعددی در زمینه انجماد و کاربرد روش های نوین در این زمینه انجام شده است، فرآیند رفع انجماد به میزان کمتری مورد توجه قرار گرفته است و نیاز به مطالعات بیشتری بخصوص در زمینه کاربرد روش های نوین در این فرایند وجود دارد. استفاده از امواج فراصوت و مدل سازی عددی در حضور این امواج یکی از موضوعات نوینی است که باید مورد توجه قرار گیرد.

معمولاً انجماد، بهتر از سایر روش های نگهداری موجب حفظ طعم، بافت و ارزش غذایی می شود (George, 1993). کاهش آب مایع در دسترس به عنوان یخ، همراه با دماهای زیر صفر، موجب کاهش فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی می شود و طولانی ترین مدت نگهداری را تضمین می کند (Reid, 1990; 1996; Sahagian and Goff). با این حال، همانطور که اشاره گردید، مواد غذایی باید قبل از استفاده، از حالت منجمد خارج شوند و کیفیت محصول نهایی رابطه مستقیمی با فرایند رفع انجماد دارد. به حداقل رساندن آسیب های بافتی و نشت عصاره سلولی طی فرآیند رفع انجماد ضروری است. همچنین در طول فرایند باید سطح بهداشتی محصول حفظ شود و فرایند به گونه ای انجام شود که کمترین نرخ رشد میکروبی حاصل شود. رفع انجماد معمولاً آرام تر از انجماد رخ می دهد. غذاها در طول رفع انجماد دچار آسیب هایی ناشی از فرایندهای شیمیایی، فیزیکی و همچنین فعالیت میکروبی می شوند. بنابراین بهینه سازی این روش ها باید مدنظر متخصصان صنعت غذا باشد (Kalichevsky et al., 1995; 1973; Fennema et al.,).

در فرایندهای انجماد و رفع انجماد به منظور کاهش مصرف انرژی و افزایش کیفیت محصول غذایی،

از روش های فیزیکی و شیمیایی بهره برده می شود. همچنین مدل های عددی فرایندهای انجماد و رفع انجماد به دلیل افزایش دسترسی به توان کامپیوتری با هزینه کمتر، توجه زیادی به خود جلب کرده است (Franke, 2000). یکی از فرایندهای مهمی که می تواند کمک زیادی به بهبود شرایط انجماد و رفع انجماد کند، استفاده از فراصوت می باشد. استفاده از تکنیک فراصوت یک زمینه تحقیق و توسعه برای صنایع غذایی است که به طور عمده می تواند به دو بخش تقسیم شود: فراصوت تشخیصی کم توان فرکانس بالا و فراصوت پر توان فرکانس پایین. این تکنیک اوایل به عنوان یک روش تحلیلی برای تضمین کیفیت، کنترل فرایند و بازرسی غیر مخرب مورد استفاده قرار می گرفت (Mason, 1998; 1994; McClements, 1995; Mason et al., 1996; Floros and Liang). ولی نوع پر توان فراصوت می تواند به عنوان وسیله ای برای بهبود انتقال حرارت، دست کاری و کنترل کریستاله شدن و سپس بهبود فرایند انجماد و رفع انجماد در نظر گرفته شود.

در زمینه کاربرد امواج فراصوت حین فرایند انجماد تحقیقات متعددی انجام شده است که نتایج آنها نشان می دهد هسته گذاری اولیه، رشد کریستال، هسته گذاری ثانویه و انتقال حرارت از جمله پدیده هایی هستند که تحت تأثیر امواج صوتی قرار گرفته اند (Rachel 2004; Kiani and Sun, 2011; Chow et al., 2013; Kiani et al.,). در زمینه کاربرد امواج فراصوت در مرحله رفع انجماد تحقیقات کمتری انجام شده است.

در پژوهش Kissam et al. (1982) با استفاده از حمام فراصوت (۱۵۰۰ کیلوهرتز، ۰/۰۰۵ وات بر گرم) در فرآیند رفع انجماد ماهی کد (Pacific cod)، مشخص شد که با ترکیب حمام آب و فراصوت در مقایسه با حمام آب به تنهایی، به میزان ۷۱ درصد در زمان رفع انجماد صرفه جویی می شود. به همین ترتیب، Gambuteanu and Alexe (2015) تأثیر روش رفع انجماد فراصوت با شدت کم را بر زمان رفع انجماد و میزان رفع انجماد

خودبه خود یا به عنوان مؤلفه‌های موجود در الگوریتم‌های پیشرفته مانند بهینه‌سازی مبتنی بر جانشینی، برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مخلوط، اندازه‌گیری عدم قطعیت تصادفی-ریشه‌ای یا بهینه‌سازی تحت عدم اطمینان استفاده شوند (Adams et al., 2009).

با توجه به اهمیت فرایند رفع انجماد برای حفظ کیفیت مواد غذایی، در این مقاله از امواج فراصوت برای بهبود این فرایند استفاده گردید و پدیده انتقال حرارت در شرایط مختلف مدل‌سازی گردید. هدف از مدل‌سازی تمرکز بر ضریب انتقال حرارت همرفتی به عنوان یکی از عواملی بود که توسط امواج فراصوت تحت تاثیر قرار می‌گیرد. از یک مدل عددی حجم محدود به روش معکوس همراه با ابزار داکوتا برای تجزیه و تحلیل اثر فراصوت بر میزان دما و ضریب هدایت حرارت در طول فرایند رفع انجماد استفاده گردید.

مواد و روش‌ها

تئوری مدل‌سازی

در این تحقیق، روش ظرفیت گرمایی ظاهری برای مدل‌سازی عددی فرایند انجماد استفاده شد که از اصلی‌ترین روش‌های حل عددی رفع انجماد است (Voller and Prakash, 1987). برای بررسی مسئله تغییر فاز، گرمای نهان ذوب به عنوان یک اصطلاح دیگر برای ذخیره گرما در نظر گرفته می‌شود و بنابراین در C_p محصول قرار می‌گیرد (Voller and Prakash, 1987). برای رفع انجماد به کمک فراصوت، معادله انرژی را می‌توان بر اساس آنتالپی به شرح زیر نوشت (2006 Voller, 1990; Voller and Prakash, 1987; Pham, et al., 2017; Kiani and Sun, 2017):

$$\rho C_{p,app} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (kVT) S_{US} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن، T دما، $C_{p,app}$ ظرفیت گرمایی ظاهری ویژه، ρ چگالی و S_{US} اصطلاح منبع ایجادشده توسط

گوشت خوک بررسی نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از فراصوت (۲۵ کیلوهرتز، ۰/۶ وات بر سانتی‌متر مربع)، زمان لازم برای رفع انجماد را در مقایسه با رفع انجماد با هوا تا ۸۷ درصد کاهش می‌دهد. هنگامی که شدت فراصوت اعمال شده به ترتیب ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶۶ وات بر سانتی‌متر مربع بود، سرعت ذوب ۰/۴۶، ۰/۵۷ و ۰/۸۴ درجه سلسیوس در دقیقه بهبود یافت. Li et al. (2019) گزارش کردند که زمان رفع انجماد ماهی مرکب (*Dosidicus gigas*) منجمد به کمک فراصوت در مقایسه با زمانی که از هوا و آب استفاده می‌شود، به طور معنی‌داری ($p < 0.05$) کاهش می‌یابد. در تحقیق Cheng et al. (2014) نتایج مشابهی در مورد رفع انجماد سویای نارس منجمد حاصل شد.

مدل‌سازی عددی ابزاری کارآمد و مقرون به صرفه برای شبیه‌سازی فرآیندهای گرمایشی و سرمایشی در صنایع غذایی است که برای تولید اطلاعات بسیار ارزشمند در مورد فرآیندها در شرایط آزمایشگاهی و در مدت‌زمان کوتاه قابل استفاده است. مدل‌های عددی برای درک بهتر مکانیسم‌های پیچیده فیزیکی موجود در فرآیندهای مختلف، ارزیابی فرآیندها برای اطمینان از ایمنی و کیفیت محصولات غذایی، طراحی و بهینه‌سازی فرآیندها و سیستم‌های غذایی و کنترل دقیق آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جعبه‌ابزار داکوتا^۱ یک رابط انعطاف‌پذیر و گسترده بین کدهای آنالیز و روش‌های تکرار را فراهم می‌کند. داکوتا شامل الگوریتم‌هایی برای بهینه‌سازی با روش‌هایی بر اساس گرادیان و غیر گرادیان، تعیین کمیت عدم اطمینان با نمونه‌گیری، قابلیت اطمینان، گسترش تصادفی و روش‌های برآورد فاصله، تخمین پارامتر با روش‌های حداقل مربعات غیرخطی و تحلیل حساسیت / واریانس با طراحی آزمایش‌ها و قابلیت‌های مطالعه پارامتر است. این قابلیت‌ها ممکن است به صورت

در این رابطه، T_i باقیمانده بین مقادیر مدل و نتایج تجربی در نقطه i است و m پارامتری است که باید پیش‌بینی شود.

برای دستیابی به این هدف، شبیه‌ساز (اپن‌فوم) به یک ابزار بهینه‌سازی، داکوتا وصل شد. در واقع، هدف اصلی استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی، توسعه یک ابزار منظم و سریع برای دستیابی به طرح‌های بهینه با استفاده از روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی بود. از الگوریتم‌های بهینه‌سازی داکوتا برای به حداقل رساندن عملکرد هدف استفاده می‌شود که به‌طور کلی از طریق کد شبیه‌ساز با توجه به محدودیت‌های تغییر یافته متغیر و پاسخ محاسبه می‌شود. با تغییر سطح پارامترهای مدل، این فرآیند به‌گونه‌ای پیش می‌رود که مقدار باقیمانده به صفر نزدیک شود.

در این مطالعه، هدف بهینه‌سازی زمان فرایند با استفاده از روش معکوس برای مدل‌سازی فرایند رفع انجماد سفیده تخم‌مرغ بود. بر این اساس، عملکرد هدف در این مطالعه به شرح زیر است:

$$OF(h) = \int [T_{exp}(t) - T_{num}(t)]^2 dt \quad (\text{رابطه ۷})$$

برای هر یک از پارامترهای ذکر شده، محدوده‌ای بر اساس مقادیر گزارش شده در نظر گرفته شد. داکوتا و کد شبیه‌ساز، اطلاعات را از طریق خواندن و نوشتن فایل‌های اطلاعاتی کوتاه، تبادل می‌کنند. الگوریتم تخمین پارامتر، مقادیر را به هر یک از متغیرها اختصاص می‌دهد و آن‌ها را در کد شبیه‌ساز اعمال می‌کند. پس‌از آن، مجموعه‌ای از داده‌های عددی را برای ارتباط دریافت می‌کند و نتایج عددی را با داده‌های تجربی مقایسه می‌کند. سرانجام، عملکرد هدف در داکوتا ارزیابی می‌شود و هنگامی که خطاها به یک سطح قابل قبول کاهش می‌یابد، مقادیر مربوطه به‌عنوان پارامترهای نهایی گزارش می‌شوند (شکل ۱). در این مطالعه، به‌منظور بررسی میزان تناسب بین داده‌های تجربی و نتایج مدل، از پارامترهای آماری R^2 و RMSE

تابش فراصوت است. ظرفیت گرمای ظاهری ویژه را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد (Kiani and 2017): (Sun,

$$C_{p,app} = C_p + \frac{\partial x}{\partial T} L \quad (\text{رابطه ۲})$$

شرایط اولیه و مرزی: ضریب انتقال حرارت همرفتی (h) و معادلات Nu

شرایط اولیه و مرزی زیر برای حل استفاده می‌شود:

$$T(x, y, z, 0) = T_i \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial (x, y, z)} = h [T(x, y, z, t) - T_\infty] \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial (x, y, z)} = 0 \quad (\text{رابطه ۵})$$

رابطه ۳ نشان‌دهنده شرایط اولیه است و معادلات ۴ و ۵ شرایط مرزی را نشان می‌دهند. در معادله ۴ که در دیواره ماده غذایی اعمال می‌شود انتقال حرارت جابجایی وجود دارد و معادله ۵ مربوط به مرکز ماده غذایی است.

مدل‌سازی عددی و تخمین پارامترها

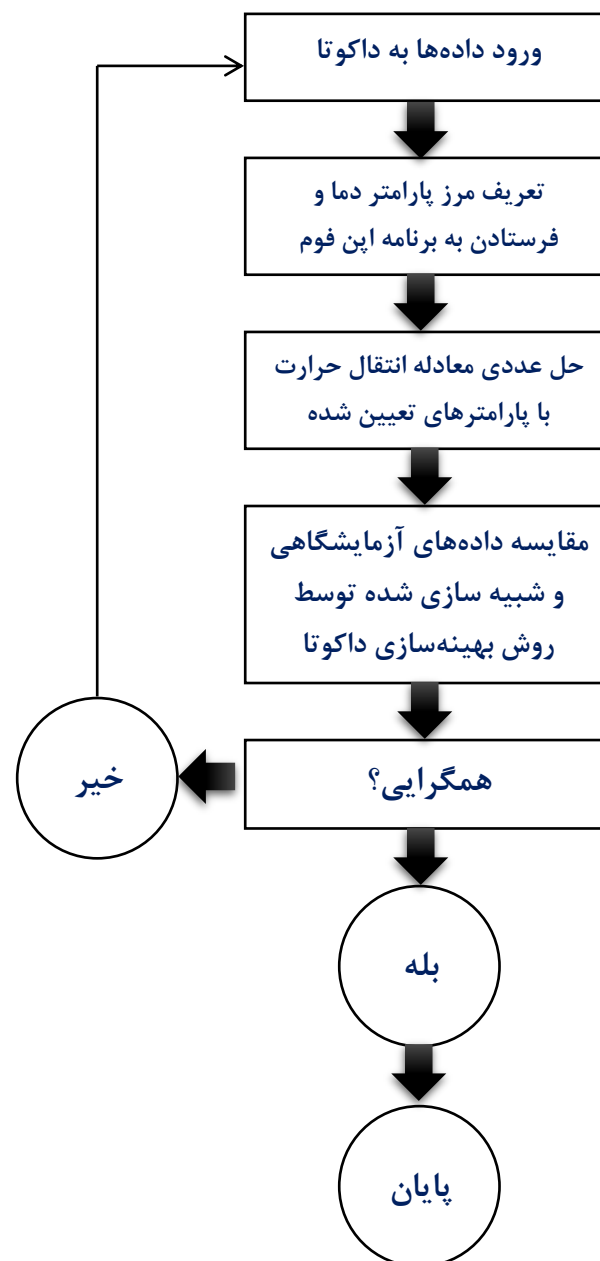
مدل ریاضی ذکر شده در قسمت قبل در نرم‌افزار محاسباتی متن باز اپن‌فوم^۱ (Foam-Extend 3.1) اجرا شد که بر اساس آن روش حجم محدود (FVM) در حل مسئله اعمال می‌شود. برای این منظور، مدل موردنظر در یک حلقه تکرار شونده حل شد و هنگامی که دما به صفر درجه سلسیوس رسید، ثبات موردنظر حاصل شد. خروجی حل‌کننده نوشته‌شده در شبیه‌ساز منحنی تغییرات دما در مقابل زمان بود.

بر اساس حداقل معیارهای خطای مربعات، بهترین مقدار برای پارامترهای مدل در صورت دستیابی به حداقل میزان عملکرد هدف (تفاوت بین داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی شده) حاصل می‌شود (2018 Homayoonfal et al.,). رابطه کلی برای عملکرد هدف می‌تواند به شرح زیر باشد:

$$(\text{رابطه ۶})$$

$$\text{minimize: } f(m) = \sum_{i=1}^n [T_i(m)]^2$$

استفاده شد و مدل‌های بهینه وقتی R^2 بیش از ۰/۷ بود، درحالی که RMSE حداقل بود، انتخاب شدند.



شکل ۱- شماتیک تحلیل عددی به روش معکوس (Homayoonfal et al., 2018) با استفاده از کاربرد همزمان ابزار داکوتا (به عنوان بهینه کننده پارامتر) و نرم افزار مدل سازی عددی (اپن فوم)، جهت یافتن مقادیر بهینه ضریب انتقال حرارت.

کد شبیه سازی بر روی یک کامپیوتر (Acer aspire 5755G, سیستم عامل ۶۴ بیتی) مجهز به یک CPU (CPU Intel® Core i5-2410M) (2.3GHz و ۴ گیگابایت RAM حل شد.

مواد اولیه

تخم مرغ تازه نژاد Hy-Line با متوسط وزن ۴۵ گرم و عمر کمتر از یک هفته از شرکت تلانگ (Telavang Co., Tehran, Iran) تهیه و تا زمان آماده سازی و انجماد در شرایط یخچال (۴ درجه سلسیوس) نگهداری شد.

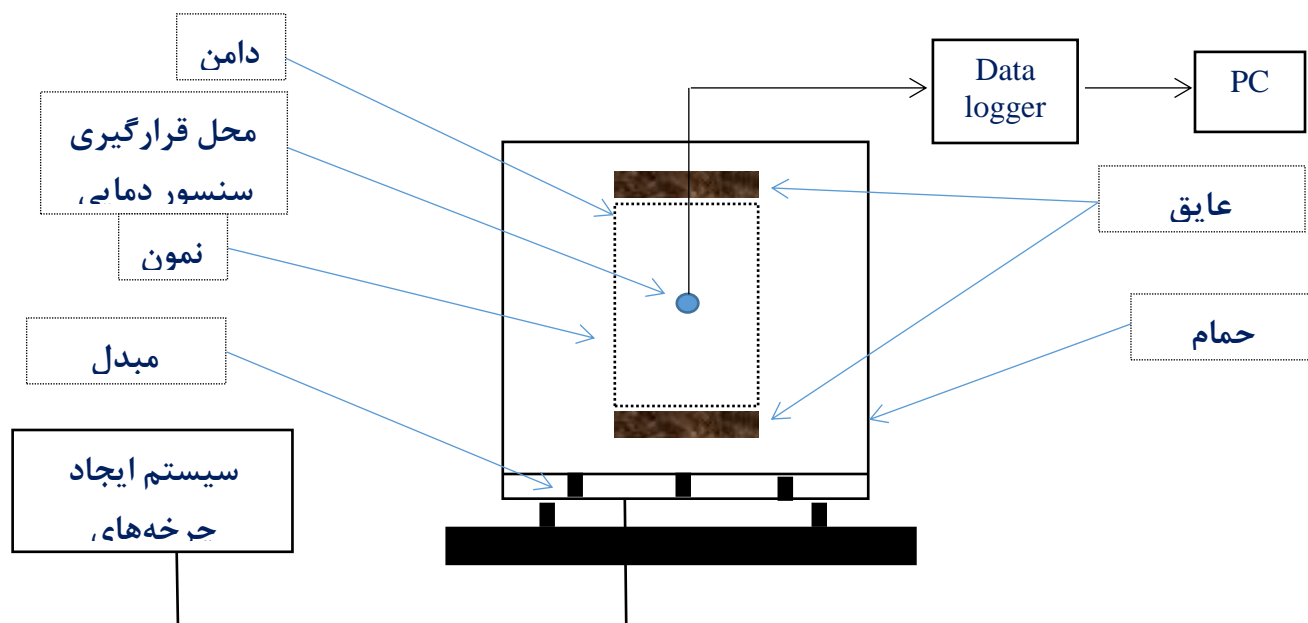
آماده سازی و انجماد

به منظور تهیه نمونه های آزمایشی همگن، در هر سری آماده سازی، حداقل ۲۰ عدد تخم مرغ سالم به صورت دستی شکسته و زرده و سفیده از یکدیگر جدا شدند. در ادامه هر جزء به صورت ملایم و بدون ایجاد کف هم زده شده و سپس جهت انجماد مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور تعیین مواد اصلی تشکیل دهنده نمونه ها شامل درصد رطوبت کل، ماده خشک کل، پروتئین خام، چربی کل، خاکستر و کربوهیدرات کل، نمونه ها مطابق روش AOAC (1990) مورد آنالیز قرار گرفتند.

جهت انجماد و رفع انجماد نمونه ها، از ظروف مسی مکعب به ابعاد ۵×۵×۵ سانتیمتر، مجهز به ترموکوپل نوع Type T, TMTSS-IM050U-150, OMEGA) T (Engineering Inc., Manchester, UK در دیواره و مرکز ظروف استفاده شد. ترموکوپل ها به یک دیتالاگر (USB TC-08, Picotech, UK) متصل بوده و تغییرات دمایی در طول انجماد ثبت و ذخیره گشت. انجماد در یک فریزر آزمایشگاهی (۸۷ Danesh FB-1, Pajooresh Fajr Co, Iran) با دمای ۰/۵۰±۰/۳۰- درجه سلسیوس انجام گرفت و پس از انجماد، عمل رفع انجماد در حمام فراصوت (با دمای ۳۰ درجه سلسیوس و فرکانس ۱۸ کیلوهرتز) مدل Parsonic 2006s صورت گرفت (دستگاه فراصوت مجهز به سیستم کنترل دما بود). لازم به ذکر است که با توجه به اینکه تبادل حرارت از دیواره های جانبی ظروف مدنظر بود، لذا در قسمت فوقانی و تحتانی ظروف از فوم پلاستیکی برای جلوگیری از تبادل حرارت استفاده شد. همچنین به منظور ایجاد چرخه های مختلف فراصوت (۰، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد) از

ثبت داده‌های دمایی از دمای ۳۰- درجه سلسیوس تا رسیدن به دمای صفر درجه سلسیوس انجام گرفت. در شکل ۲ سیستم رفع انجماد و نحوه قرارگیری نمونه در این مقاله آمده است.

سیستم ایجاد چرخه استفاده شد. عملکرد این سیستم در چرخه صفر درصد به صورت سیستم فراصوت کاملاً خاموش، در ۲۵ درصد، ۲/۵ ثانیه روشن، ۷/۵ ثانیه خاموش، در ۵۰ درصد، ۵ ثانیه روشن، ۵ ثانیه خاموش، در ۷۵ درصد، ۷/۵ ثانیه روشن، ۲/۵ ثانیه خاموش بود.



شکل ۲- سیستم رفع انجماد و نحوه قرارگیری نمونه در حمام فراصوت کف و بالای نمونه عایق شده است تا انتقال حرارت دو بعدی شکل بگیرد و امواج فراصوت از کف مخزن توسط دستگاه به محیط سیال اطراف نمونه تابیده می شود و پدیده حباب دهی ایجاد می شود. دمای مرکز نمونه توسط یک حسگر در طول فرایند خروج از انجماد قرائت و ثبت می شود.

مورد استفاده قرار گرفت.

ارزیابی شرایط مرزی

مدل سازی فرایند رفع انجماد معادله انتقال حرارت (رابطه ۱) همراه با معادلات مربوط به تغییر فاز، خواص ترموفیزیکی ترکیبات غذایی و شرایط مرزی، در نرم افزار محاسبات عددی بر پایه حجم محدود در کد تجاری اپن فوم اجرا شد. این نرم افزار یک کتابخانه ++C مبتنی بر لینوکس می باشد که کدهای ضروری برای حل مسائل پیچیده انتقال سیالات را فراهم می کند. حل معادلات عددی با گسسته سازی زمان توسط شبیه ساز اوپلر گذرا و گسسته سازی فضا با روش حجم های محدود و طرح گوس-سایدل انجام گرفت. پیش از اجرای کدها، هندسه و شبکه مش مورد نظر با استفاده از نرم افزار انسیس (ANSYS Fluent®) تولید و در اختیار حلگر قرار گرفت. در نهایت کدها در یک

به منظور اطمینان از شرایط مرزی و صحت ضریب انتقال حرارت محاسبه شده، پیش از انجماد نمونه ها، از یک قطعه مس خالص در ابعاد یکسان با ظروف مسی در شرایط کاملاً مشابه انجماد نمونه های تخم مرغ استفاده شد. ابتدا یک ترموکوپل نوع T در مرکز قطعه مسی تعبیه شده و بعد از عایق سازی سطوح فوقانی و تحتانی آن و تنظیم دمای آن روی حدود ۱۰- درجه سلسیوس، قطعه در حمام فراصوت قرار گرفت و تغییرات دمایی تا رسیدن دمای مرکز آن به حدود صفر درجه سلسیوس ثبت شد. با توجه به ضریب هدایت حرارتی بالا و تقریباً ثابت مس و عدم وقوع تغییر فاز در حین افزایش دما، شرایط مرزی حاکم بر فرایند رفع انجماد مورد ارزیابی قرار گرفته و در محاسبات مربوط به نمونه های تخم مرغ

کامپیوتر مجهز به سیستم عامل لینوکس ابونتو اجرا و نتایج خروجی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

نتایج و بحث

اثر امواج فراصوت بر زمان انجماد

در شکل ۳ زمان رفع انجماد تیمارهای مختلف مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود تحت دمای ثابت، استفاده از چرخه ۲۵ درصد فراصوت موجب افزایش زمان فرایند شد ولی درصدهای ۵۰ و ۷۵ درصد به شکل معنی داری ($p < 0.05$) موجب کاهش زمان فرایند گردیدند. به طوری که این زمان از ۳۲۸۰ ثانیه در حالت بدون استفاده از فراصوت، به ۲۴۷۳ ثانیه در تیمار ۷۵ درصد استفاده از فراصوت کاهش یافت. تاکنون تحقیقی در مورد استفاده از سیکل های مختلف فراصوت بر رفع انجماد صورت نگرفته، احتمالاً به دلیل ایجاد حباب های پایدار در سطح ماده غذایی در چرخه های پایین، ضریب انتقال گرما کاهش یافته و در چرخه های بالاتر حباب های ناپایدار تشکیل شده که در واقع زمان را کوتاه تر می کند و باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می شود. تحقیقات مختلف نشان داده که استفاده از فراصوت موجب کاهش زمان فرایند می شود (2015; Liu et al., 2019; Gambuteanu and Alexe, 1990; Cheng et al., 2014; Miles et al., 2015). تحقیقات دیگر در زمینه انجماد مواد غذایی و خنک سازی مواد دیگر از جمله گلوله مسی نشان داده است که مقدار فراصوت اعمال شده باید بهینه شود و لزوماً ارتباط خطی بین چرخه و زمان وجود ندارد (2012; Kiani et al., 2015; Delgado et al., 2009; Kiani et al., 2015). این مقالات مشاهدات و نتایج این تحقیق را تایید می نماید. اگر از چرخه های پایین استفاده شود، ممکن است اثر بخشی مطلوب حاصل نگردد. افزایش چرخه فراصوت نرخ انتقال حرارت را بالا می برد ولی در سیستم ایجاد حرارت می نماید. در فرایند انجماد این حرارت می تواند بر خلاف فرایند عمل نماید و انجماد را به تاخیر بیندازد ولی در

رفع انجماد به نفع فرایند خواهد بود. البته این اثر در توان های بالا مشاهده می شود و در توان های متوسط و پایین مقدار حرارت تولید شده قابل توجه نیست و می توان از آن صرف نظر نمود. به هر حال در فرایند رفع انجماد تولید حرارت هر چند ناچیز به نفع فرایند خواهد بود و صرف نظر کردن از آن اثر زیادی در پیش بینی های محاسباتی ندارد.

نتایج این تحقیق حاکی از آن است که با توجه به کاهش معنی دار زمان فرایند، تیمار فراصوت می تواند به عنوان یک روش مکمل برای ذوب معمولی استفاده شود تا سرعت ذوب شدن محصولات غذایی منجمد را برای تغییر فاز سریعتر تسریع کند. نزدیکترین بافت به مرز رفع انجماد می تواند انرژی بیشتری جذب کرده تا سریعتر از فاز انجماد خارج شود. در طی فرآیند رفع انجماد، اثرات فیزیکی فراصوت می تواند باعث تولید جت های پرسرعت شود. جت های پرسرعت موجب فروپاشی حباب نامتقارن می شوند که می تواند انتقال گرما را بهبود بخشد (2015; Gambuteanu and Alexe). حرکت مرز انجماد/ رفع انجماد با شدت فراصوت ارتباط دارد؛ بنابراین، این روش ذوب می تواند زمان ذوب را کوتاه کرده و آسیب های غذایی را کاهش دهد. به عنوان مثال، در پژوهش (1982) Kissam et al. با استفاده از حمام فراصوت (۱۵۰۰ هرتز، ۰/۰۵ وات بر گرم) در فرآیند رفع انجماد ماهی کد، مشخص شد که با ترکیب حمام آب و فراصوت در مقایسه با حمام آب به تنهایی، به میزان ۷۱ درصد در زمان رفع انجماد صرفه جویی می شود. به همین ترتیب، Gambuteanu and Alexe (2015) تأثیر روش رفع انجماد فراصوت با شدت کم بر زمان رفع انجماد و میزان رفع انجماد گوشت خوک بررسی نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از فراصوت (۲۵ کیلوهرتز و ۰/۶ وات بر سانتی متر مربع)، زمان لازم برای رفع انجماد را در مقایسه با رفع انجماد با هوا تا ۸۷ درصد کاهش می دهد. هنگامی که شدت فراصوت اعمال

مدل عددی برازش داده شدند و مقادیر ضریب انتقال حرارت جابجایی تعیین گردیدند.

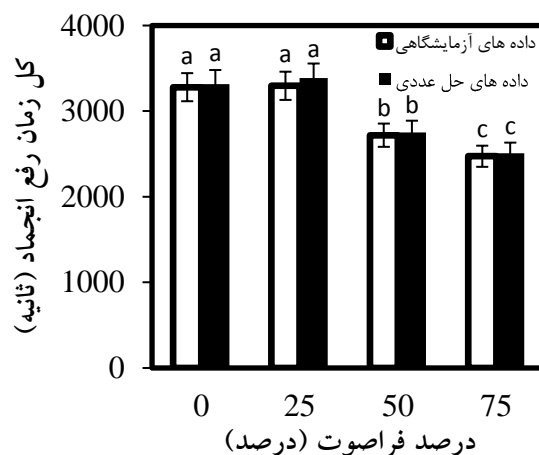
نتایج حاصل برای ضریب انتقال حرارت جابجایی در شرایط مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است و ضریب انتقال حرارت تیمارهای مختلف مقایسه شده است. همان گونه که مشاهده می شود، در تیمار ۲۵ درصد فراصوت این ضریب مقداری کاهش یافته اما در ۵۰ و ۷۵ درصد به شکل معنی داری افزایش یافته که بالاترین میزان ضریب متعلق به تیمار ۵۰ درصد فراصوت می باشد. همان طور که در بالا توضیح داده شد تبدیل انرژی صوتی به گرمایی و نیز فروپاشی حباب های نامتقارن در بهبود فرایند انتقال حرارت مؤثر می باشند (Cheng et al., 2017; Gambuteanu and Alexe, 2015).

Fairbanks (1979) دریافت که ترکیب تابش (مصنوعی یا طبیعی) و فراصوت برای گرم کردن یک مایع در حال جریان منجر به نتایج بهتری از مجموع هر فرآیند جداگانه می شود.

بنا به نظر محققین مختلف، افزایش ضریب انتقال حرارت، به دلیل حفره صوتی است که به ایجاد و رشد حباب کمک می کند، در حالی که نوسانات آنها باعث ایجاد ریز جریان^۱ و تحریک موضعی در نزدیکی سطوح می شود تا آنها را از بین ببرد (Zhou and Liu, 2002; Kim et al., 2003; Zhou et al., 2002; Heffington and Glezer, 2013).

Kiani et al. (2013) اثر پارامترهای فرایند بر میزان انتقال حرارت همرفتی در طول تیمار غوطه وری کره مسی در دمای پایین به کمک فراصوت را بررسی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که تابش فراصوت موجب افزایش سرعت انتقال حرارت همرفتی بین محیط خنک کننده و جسم غوطه ور می شود. اثر تابش مستقل از قطر کره بوده و شدت فراصوت یک رابطه خطی با مقدار عدد ناسلت دارد. همچنین داده های حاصل از مدل

شده به ترتیب ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶۶ وات بر سانتی متر مربع بود، سرعت ذوب به میزان ۰/۴۶، ۰/۵۷ و ۰/۸۴ درجه سلسیوس در دقیقه بهبود یافت.



شکل ۳- مقایسه اثر داده های آزمایشگاهی و حل عددی چرخه های مختلف فراصوت بر مدت زمان عملیات رفع انجماد در سفیده تخم مرغ (حروف آماری متفاوت نشان دهنده اختلاف معنی دار می باشد $p < 0.05$). زمان رفع انجماد بر اساس زمان مورد نیاز کل برای رساندن دما از ۳۰- درجه سلسیوس به ۰ درجه سلسیوس محاسبه گردید. امواج فراصوت در کل زمان فراوری به شکل بازه های خاموش-روشن اعمال شدند. تغییر درصد فراصوت نشان دهنده درصد خاموش یا روشن بودن در یک سیکل یا دوره ۱۰ ثانیه ای است.

اثر امواج فراصوت بر ضریب انتقال حرارت

یکی از پارامترهای اساسی و پر چالش فرایندهای انجماد و رفع انجماد تخمین ضریب انتقال حرارت جابجایی است. معمولاً معادلات موجود که بر پایه اعداد بدون بعد طراحی شده اند می توانند خطاهای بالایی تا ۲۰ درصد داشته باشند. از آنجایی که زمان فرایند انتقال حرارت مستقیماً وابسته به این ضریب است، نقص یا خطا در تعیین این ضریب پیش بینی فرایند را به طور قابل توجهی تحت تاثیر قرار می دهد.

یکی از راه های پوشاندن خطا و تعیین دقیق ضریب انتقال حرارت جابجایی استفاده از داده های آزمایشگاهی و برازش داده ها با مدل های ساده شده انتقال حرارت است. این روش نیز تنها برای فرایندها و اشکال ساده قابل استفاده است. در این مقاله برای نخستین بار داده های آزمایشگاهی با استفاده از ابزار داکوتا با داده های

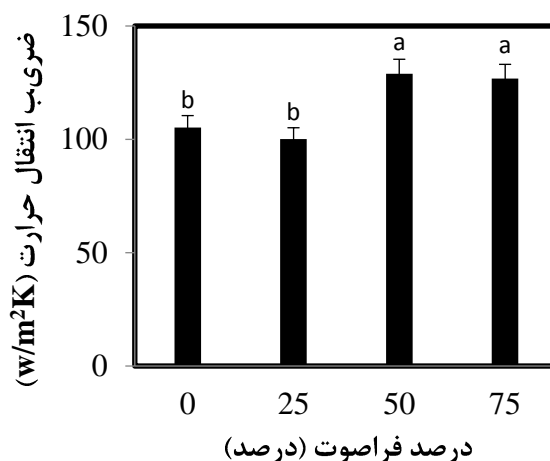
۰/۶ درجه سلسیوس بود، تا صفر درجه سلسیوس بررسی گردید. در همه نمودارها رفتار معمول رفع انجماد مشاهده شد به طوری که ابتدا شیب تند افزایش ثبت گردید و سپس با آزاد شدن گرمای نهان ذوب دما شیب نمودار کاهش یافت و در نهایت با گذر از نقطه انجماد شیب مجدداً شروع به افزایش نمود. همچنین همان گونه که مشاهده می شود افزایش چرخه باعث کاهش زمان و بهبود عملکرد فرایند رفع انجماد شد. این مشاهده می تواند به افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی به واسطه کاربرد امواج فراصوت مرتبط باشد. مطالعات مشابه دیگر نشان داد که تابش مداوم (چرخه ۱۰۰ درصد) می تواند انتقال حرارت همرفتی بین کره های مسی و محیط خنک کننده را تقویت کند و نتایج این مقاله را تأیید می کند (Kiani et al., 2012 ; Kiani et al., 2013).

نتایج حاضر نشان داد که تابش پالسی می تواند منجر به راندمان بهتر فراصوت شود، زیرا در مصرف انرژی کمتر، ضرایب انتقال حرارت بالاتری می تواند به دست آید.

Kiani et al. (2015) نشان دادند که افزایش چرخه موجب افزایش عملکرد و کاهش زمان انجماد می شود که داده های این مقاله را تأیید می کند. همانطور که قبلاً ذکر گردید، علت اصلی افزایش انتقال حرارت، کاونتاسیون است درحالی که ابرهای حبابی غلیظ در سطح جسم منبع اصلی تولید گرما هستند. تابش پالسی شانس ایجاد ابر در سطح جسم را کاهش داده است، اگرچه اثر اختلاط تابش وجود دارد و سرعت انتقال حرارت را افزایش می دهد (Kiani et al., 2012 ; Kiani et al., 2013).

نتایج نشان داد که مدل عددی به خوبی با داده های آزمایشگاهی همخوانی داشتند (جدول ۱). مدل عددی رایج شده قادر بود با تخمین مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی به خوبی با داده های آزمایشگاهی برازش یابد. این برازش قابل قبول به واسطه استفاده از ابزار کاربردی داکوتا حاصل گردید که توانست به خوبی خروجی نرم

عددی همبستگی خوبی با داده های تجربی داشتند. Kiani et al. (2012) اثر تابش فراصوت بر میزان انتقال حرارت همرفتی در خنک سازی غوطه وری کره ساکن را بررسی نمودند. نتایج تحقیق نشان داد که تابش فراصوت می تواند سرعت انتقال حرارت را به طور معنی داری افزایش دهد و در نتیجه مدت زمان خنک سازی بسیار کوتاه تر می شود. شدت بالاتر فراصوت باعث افزایش سرعت خنک شدن می شود و بسته به شدت فراصوت و موقعیت کره، مقادیر عدد ناسلت از محدوده ۲۳-۲۷ به دامنه ۲۵-۱۰۸ تغییر می یابد. با این حال، شدت زیاد فراصوت منجر به تولید گرما در سطح کره می شود، بنابراین، کنترل دمای کمینه نهایی را سخت می کند.

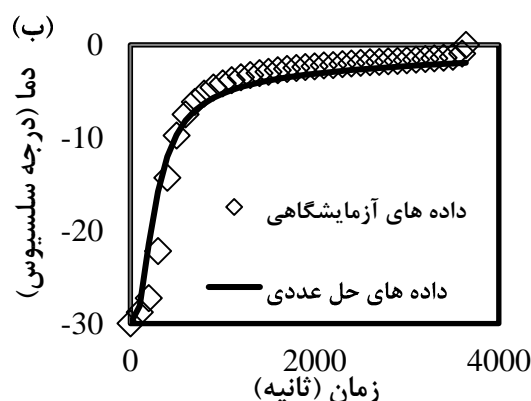
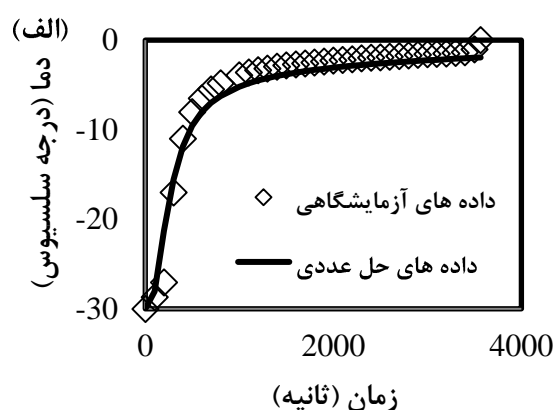
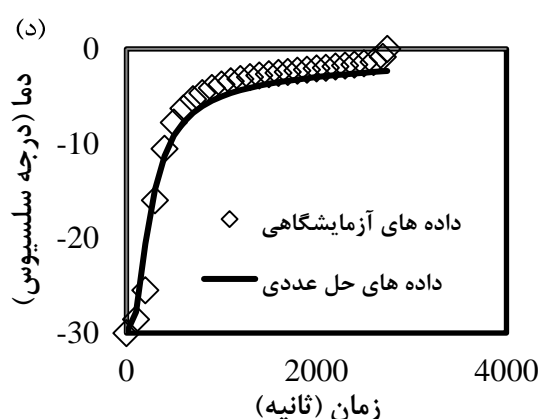
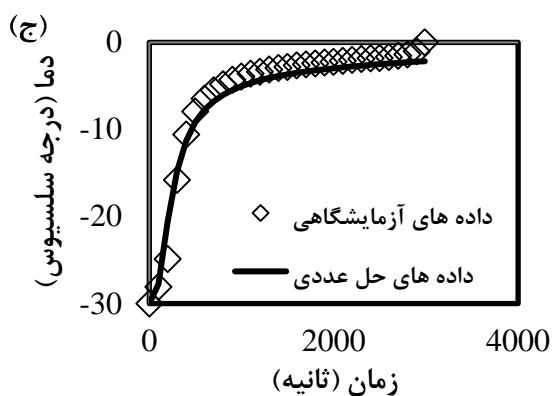


شکل ۴- مقایسه ضریب انتقال حرارت (وات بر مترمربع در درجه کلونین) سفیده تخم مرغ تحت تاثیر درصد های مختلف استفاده از چرخه فراصوت. مقادیر ضریب انتقال حرارت بر اساس روش معکوس محاسبه شده است. ابزار داکوتا به عنوان یک بهینه ساز مقادیر مختلفی را تعیین کرده است و این مقادیر به نرم افزار محاسبات عددی منتقل شده است. سپس داده های عددی حاصل از محاسبات با داده های آزمایشات توسط ابزار داکوتا برازش داده شده اند تا مقدار ضریب انتقال حرارت برای نمونه مورد نظر تخمین زده شوند.

(حروف آماری متفاوت نشان دهنده اختلاف معنی دار می باشد $p < 0.05$)

مقایسه نمودار دما-زمان داده های آزمایشگاهی و حل عددی در شکل ۵ داده های حاصل از مدل عددی سفیده تخم مرغ با داده های آزمایشگاهی مقایسه شد. در این شکل ها تغییر دما از ۳۰- درجه سلسیوس شروع و با توجه به اینکه دمای رفع انجماد بدست آمده از آزمایشات

افزار مدل سازی عددی را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه نموده و مقدار ضریب انتقال حرارت را تخمین بزند. مدل عددی نیز همانند داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که افزایش چرخه استفاده از فراصوت موجب کاهش زمان فرایند رفع انجماد شده است.



شکل ۵- مقایسه داده‌های دمایی (درجه سلسیوس) آزمایشگاهی حاصل از رفع انجماد سفیده تخم‌مرغ با داده‌های دمایی (درجه سلسیوس) حاصل از مدل در چرخه‌های مختلف استفاده از فراصوت. داده‌های عددی رسم شده مربوط به شبیه‌سازی با استفاده از مقادیر ضریب انتقال حرارت بهینه شده با روش معکوس می‌باشند.

الف) سفیده تخم مرغ بدون استفاده از فراصوت. ب) سفیده تخم مرغ همراه با چرخه ۲۵ درصد فراصوت. ج) سفیده تخم مرغ همراه با چرخه ۵۰ درصد فراصوت. د) سفیده تخم مرغ همراه با چرخه ۷۵ درصد فراصوت.

جدول ۱- مقایسه ضریب تعیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در تیمارهای مختلف سفیده تخم مرغ. این ضرایب مربوط به مقایسه دو سری داده آزمایشگاهی و مدل سازی عددی است. نزدیک بودن مدل سازی عددی به داده‌های آزمایشگاهی نشان دهنده ضریب تبیین بالاتر و جذر میانگین مربعات خطای پایین تر است.

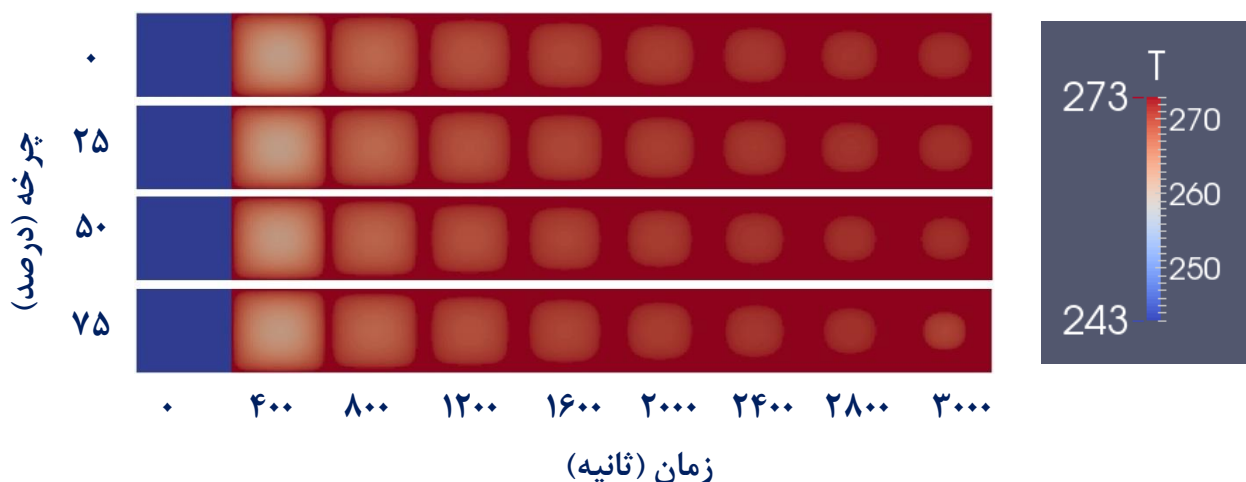
۰ درصد	۲۵ درصد	۵۰ درصد	۷۵ درصد	
۰/۹۸۲۳۹	۰/۹۷۱۶۰۱	۰/۹۸۸۰۴	۰/۹۸۵۶۸۱	R^2
۰/۳۹۳۱۱۴	۱/۶۸۳۷۱۵	۱/۲۶۰۷۹۶	۱/۴۹۵۵۰۵	RMSE

منجمد و غیر منجمد شکل گرفت که به مرور از دیواره رو به مرکز حرکت نمود. در چرخه ۷۵ درصد این جبهه با سرعت بیشتری حرکت کرد که باعث کاهش زمان فرایند شد. افزایش دما در سطح و مرکز نمونه‌های سفیده تخم‌مرغ و در مراحل اولیه رفع انجماد بسیار سریع بود. دلیل آن را می‌توان بالا بودن ضریب هدایت

در شکل ۶ کانتورهای رنگی دما که خروجی مدل عددی هستند نشان داده شده است. این کانتورهای مشاهدات و اندازه گیری‌های مربوط به تعیین ضریب انتقال حرارت و اثر امواج فراصوت بر آن و همچنین کاهش زمان فرایند رفع انجماد را تایید نمود. همانطور که در این کانتورها مشخص است یک جبهه بین بخش

از دمای مرکز آن بود که عمده‌ترین دلیل آن این است که انتقال گرما از سطح بالایی نمونه به نقاط مرکزی آن، در جریان بود. مقدار دمای نقاط مختلف با افزایش زمان عملیات، افزایش یافت.

حرارتی یخ نسبت به آب در مراحل اولیه فرآیند عنوان کرد؛ چرا که مقدار ضریب هدایت حرارتی به صورت تابعی از نسبت یخ به آب در داخل مدل شبیه‌سازی شده اعمال شده است. همچنین در تمامی مراحل فرآیند، دمای شبیه‌سازی شده سطح نمونه‌های سفیده تخم مرغ بیشتر



شکل ۶- روند شبیه‌سازی دمای سفیده تخم‌مرغ در طول زمان فرآیند رفع انجماد تحت چرخه‌های مختلف فراصوت. نقاط قرمز رنگ نشان دهنده دمای بالاتر و نقاط آبی رنگ نشان دهنده دمای بالاتر هستند. طرح گرافیکی با کانتور تغییرات دما بر اساس محاسبات عددی مربوط به تیمارهای مختلف توسط نرم افزار پردازش داده پاراوید^۱ رسم گردیده اند.

عملیاتی مورد استفاده قرار گیرد.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که امواج فراصوت می‌توانند زمان رفع انجماد سفیده تخم‌مرغ را کاهش دهد. از آنجاکه تابش فراصوت ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد و نیز به صورت هم‌زمان گرما را در سطح نمونه‌ها ایجاد می‌کند، یک چرخه بهینه برای کمترین زمان رفع انجماد وجود داشت که در چرخه ۷۵ درصد اتفاق افتاد. مدل عددی زمان رفع انجماد مشخصه را مطابق با نتایج تجربی پیش‌بینی کرد. همچنین شبیه‌سازی پروفایل دمایی می‌تواند موجب افزایش درک ما از تاثیر فراصوت بر فرآیند رفع انجماد در طول زمان شود. این مدل می‌تواند برای مطالعه و کنترل موقعیت‌های مختلف

نمادها

گرمای ویژه ($J kg^{-1} K^{-1}$)	c_p
گرمای ویژه ظاهری ($J kg^{-1} K^{-1}$)	$c_{p,app}$
ضریب انتقال حرارت جابجایی ($W m^{-2} k^{-1}$)	h
هدایت حرارتی ($W m^{-1} K^{-1}$)	k
گرمای نهان رفع انجماد ($J kg^{-1}$)	L
دما ($^{\circ}C$)	T
زمان (s)	t
دمای اولیه محصول ($^{\circ}C$)	T_i
منبع حرارتی ایجاد شده توسط فراصوت ($J m^{-3} s^{-1}$)	S_{US}
چگالی ($kg m^{-3}$)	ρ

REFERENCES

Adams, B. M., Bohnhoff, W., Dalbey, K., Eddy, J., Eldred, M., Gay, D. and Swiler, L. P. (2009). DAKOTA: a multilevel

parallel object-oriented framework for design optimization, parameter estimation, uncertainty quantification,

- and sensitivity analysis: version 5.0 user's manual. *Sandia National Laboratories, Technical Report*, SAND2010-2183.
- Cheng, L., Sun, D.-W., Zhu, Z., and Zhang, Z. (2017). Emerging techniques for assisting and accelerating food freezing processes: A review of recent research progresses. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(4), 769-781.
- Cheng, X. f., Zhang, M., and Adhikari, B. (2014). Effects of ultrasound-assisted thawing on the quality of edamames [Glycine max (L.) Merrill] frozen using different freezing methods. *Food Science and Biotechnology*, 23(4), 1095-1102.
- Delgado, A. E., Zheng, L., and Sun, D. W. (2009). Influence of ultrasound on freezing rate of immersion-frozen apples. *Food and Bioprocess Technology*, 2, 270-263, (3).
- Fairbanks, H. V. (1979). Influence of Ultrasound Upon Heat Transfer Systems. *Ultrasonics Symposium*, 1979, pp. 384-387, doi: 10.1109/ULTSYM.1979.197226.
- Fennema, O. R., Powrie, W. D., and Marth, E. H. (1973). *Low-Temperature Preservation of Foods and Living Matter*. (pp. 150–239). New York: Marcel Dekker, Inc.
- Floros, J. D., and Liang, H. (1994). Acoustically assisted diffusion through membranes and biomaterials. *Food Technology*, 48(12), 79-84.
- Franke, K. (2000). A new approach for the numerical calculation of freezing and thawing processes of foods using a modified fictitious heat flow method. *Journal of Food Engineering*, 44(1), 23-29.
- Gambuteanu, C., and Alexe, P. (2015). Comparison of thawing assisted by low-intensity ultrasound on technological properties of pork Longissimus dorsi muscle. *Journal of Food Science and Technology*, 52(4), 2130-2138.
- George, R. (1993). Freezing processes used in the food industry. *Trends in Food Science and Technology*, 4(5), 134-138.
- Heffington, S., Glezer, A., & Woodruff, G. (2004). Enhanced boiling heat transfer by submerged ultrasonic vibrations. In: Proceedings on 10th international workshop on thermal investigations of ICs and systems (THERMINIC 2004), pp.24–26. France: Sophia Antipolis, Côte d'Azur.
- Homayoonfal, M., Mousavi, S. M., Kiani, H., Askari, G., Khani, M., Bari, M. R., and Alizadeh, M. (2018). The use of an innovative inverse numerical modeling method for the evaluation and parameter estimation of barberry anthocyanins ultrasound assisted extraction. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 133, 1-11.
- Kalichevsky, M. T., Knorr, D., and Lillford, P. J. (1995). Potential food applications of high-pressure effects on ice-water transitions. *Trends in Food Science and Technology*, 6(8), 253-259.
- Kiani, H., and Sun, D.-W. (2017). Numerical simulation of heat transfer and phase change during freezing of potatoes with different shapes at the presence or absence of ultrasound irradiation. *Heat and Mass Transfer*, 1-10.
- Kiani, H., Sun, D.-W., and Zhang, Z. (2012). The effect of ultrasound irradiation on the convective heat transfer rate during immersion cooling of a stationary sphere. *Ultrasonics Sonochemistry*, 19(6), 1238-1245.
- Kiani, H., Sun, D.-W., and Zhang, Z. (2013). Effects of processing parameters on the convective heat transfer rate during ultrasound assisted low temperature immersion treatment of a stationary sphere. *Journal of Food Engineering*, 115(3), 384-390.
- Kiani, H., Zhang, Z., and Sun, D.-W. (2013). Effect of ultrasound irradiation on ice crystal size distribution in frozen agar gel samples. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 18, 126-131.
- Kiani, H., Zhang, Z., and Sun, D.-W. (2015). Experimental analysis and modeling of ultrasound assisted freezing of potato spheres. *Ultrasonics Sonochemistry*, 26, 321-331.
- Kim, H.-Y., Kim, Y. G., and Kang, B. H. (2003). *Enhancement of natural convection and pool boiling heat transfer*

- via ultrasonic vibration*. Paper presented at the Heat Transfer Summer Conference.
- Kissam, A., Nelson, R., Ngao, J., and Hunter, P. (1982). Water-thawing of fish using low frequency acoustics. *Journal of Food Science*, 47(1), 71-75.
- Li, X.-X., Sun, P., Jia, J.-Z., Cai, L.-Y., Li, J.-R., and Lv, Y.-F. (2019). Effect of low frequency ultrasound thawing method on the quality characteristics of Peru squid (*Dosidicus gigas*). *Food Science and Technology International*, 25(2), 171-181.
- Liu, Y., Chen, S., Pu, Y., Muhammad, A. I., Hang, M., Liu, D., and Ye, T. (2019). Ultrasound-assisted thawing of mango pulp: Effect on thawing rate, sensory, and nutritional properties. *Food Chemistry*, 286, 576-583.
- Mason, T. (1998). Power ultrasound in food processing-the way. *Ultrasound in Food Processing*, 105-126.
- Mason, T., Paniwnyk, L., and Lorimer, J. (1996). The uses of ultrasound in food technology. *Ultrasonics Sonochemistry*, 3(3), S253-S260.
- McClements, D. J. (1995). Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing. *Trends in Food Science and Technology*, 6(9), 293-299.
- Miles, C., Morley, M., and Rendell, M. (1999). High power ultrasonic thawing of frozen foods. *Journal of Food Engineering*, 39(2), 151-159.
- Pham, Q. T. (2006). Modelling heat and mass transfer in frozen foods: a review. *International Journal of Refrigeration*, 29(6), 876-888.
- Reid, D. (1990). Optimizing the quality of frozen foods: understanding and minimizing the effects of each stage in the production of frozen foods, particularly blanching and frozen storage, can optimize their quality. *Food Technology (Chicago)*, 44, 78-82.
- Sahagian, M. E., and Goff, H. D. (1996). Fundamental aspects of the freezing process. *Food Science and Technology-New York-Marcel Dekker*, 1-50.
- Voller, V. R., and Prakash, C. (1987). A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30(8), 1709-1719.
- Voller, V. R., Swaminathan, C., and Thomas, B. G. (1990). Fixed grid techniques for phase change problems: a review. *International Journal for Numerical Methods In Engineering*, 30(4), 875-898.
- Zhou, D., and Liu, D. (2002). Boiling heat transfer in an acoustic cavitation field. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 10(5), 625-629.
- Zhou, D., Liu, D., Hu, X., and Ma, C. (2002). Effect of acoustic cavitation on boiling heat transfer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26(8), 931-938