



مدلسازی پاستوریزاسیون درون پوسته تخم مرغ با روش دینامیک سیالات محاسباتی

محسن دلوی اصفهان

۱- استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>تاریخ های مقاله :</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۹</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶</p>	<p>آلودگی تخم مرغ به <i>سالمونلا انتریتیدیس</i> یکی از مهم ترین علل گاستروانتریت ناشی از غذا در سراسر جهان است و روش رایجی که می توان برای غیرفعال سازی این باکتری استفاده کرد، پاستوریزاسیون است. در این مطالعه، پاستوریزاسیون نمونه تخم مرغ با استفاده از شیوه CFD به صورت ریاضی مدل سازی شد. نتایج با داده های تجربی مقایسه شد و مشخص شد که این مدل می تواند دمای تخم مرغ را در حین پاستوریزه کردن به طور منطقی پیش بینی کند ($R^2 > 0.98$). این مدل نشان داد که به منظور پیش بینی تغییرات دمایی کندترین ناحیه گرمایش (SHZ) با دقت بالاتر، لازم است که تأثیر جریان های همرفت طبیعی ناشی از دیواره های داغ پوسته تخم مرغ در فرآیند پاستوریزه سازی در نظر گرفته شود. نتایج نشان داد که SHZ در طول پاستوریزاسیون به حرکت خود ادامه می دهد و در نهایت، بعد از ۳۰۰ ثانیه گرمایش در ناحیه ای که حدود ۲۵٪ ارتفاع تخم مرغ از پایین است، باقی می ماند. این نتایج همچنین نشان می دهد که زمان لازم برای کاهش 5D جمعیت <i>سالمونلا انتریتیدیس</i> در نقطه سرد تخم مرغ تقریباً ۲۸ دقیقه است. این مدل می تواند به عنوان یک ابزار مهم در درک بهتر فرآیند پاستوریزاسیون، انتخاب بهترین پارامترهای فرآیند و تسهیل بهینه سازی فرآیند پاستوریزاسیون تخم مرغ به سمت اجرای صنعتی باشد.</p>
<p>کلمات کلیدی:</p> <p>دینامیک سیالات محاسباتی، تخم مرغ، پاستوریزاسیون.</p> <p>DOI: 10.22034/FSCT.19.127.305 DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.127.24.7</p>	
<p>* مسئول مکاتبات:</p> <p>dalvi@jahromu.ac.ir</p>	

۱- مقدمه

تخم مرغ و مشتقات آن، مانند تخم مرغ خشک، منجمد و مایع بخش بزرگی از صنعت مواد غذایی را شامل می‌شوند. اگرچه، محصولات تخم مرغ به اشکال مختلف (های منجمد، مایع یا خشک) به وفور در دسترس هستند، اما اکثریت مصرف کنندگان همچنان تخم مرغ را به شکل کامل و دست نخورده ترجیح می‌دهند. با وجود ارزش غذایی و تنوع محصولات، بر اساس آمار ارائه شده توسط سازمان غذا و دارو آمریکا این محصول در رتبه دوم پرمخاطره‌ترین مواد غذایی قرار گرفته است و آمار نشان می‌دهد که در فاصله زمانی بین ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۶، ۳۵۲ بار شیوع مسمومیت‌های ناشی از تخم مرغ گزارش شده است [۱]. معمول‌ترین روش برای کاهش عفونت‌های غذایی ناشی از تخم مرغ، پاستوریزاسیون محصول قبل از مصرف می‌باشد به طوری که، سازمان USDA تخمین زده است که فرایند پاستوریزاسیون توانسته است تعداد بیماران را حدود ۱۱۰۰۰۰ نفر در سال کاهش دهد، با این وجود در کشور آمریکا کمتر از ۳٪ محصول به صورت تجاری پاستوریزه می‌شوند [۲].

پاستوریزاسیون یک فرآیند عملیات حرارتی است که هدف آن غیرفعال کردن میکروارگانیسم‌های مضر است و این فرآیند باید با دقت طراحی شود تا کمترین آسیب را به اجزای لیپوپروتئینی تخم مرغ وارد کند. به عنوان مثال، اگرچه وظیفه اصلی پاستوریزاسیون تخم مرغ، از بین بردن باکتری‌ها و بخصوص جنس *Salmonella* است، اما باید توجه داشت که سفیده تخم مرغ نسبت به زرده تخم مرغ به حرارت حساس‌تر است و به راحتی می‌تواند با افزایش دما منعقد و واسرشت شود. در همین راستا است که با بکارگیری مدل‌های ریاضی به عنوان یک ابزار مهم در درک بهتر سیستم به انتخاب بهترین عوامل فرآیند و تسهیل بهینه‌سازی فرآیند پاستوریزاسیون به سمت پیاده‌سازی صنعتی پرداخت [۳]. مطالعات مختلفی در زمینه مدل سازی فرایند پاستوریزاسیون تخم مرغ صورت گرفته است. Denys و همکاران (۲۰۰۳) مدل‌سازی فرایند پاستوریزاسیون تخم مرغ با روش تفاضل محدود پرداختند [۴]. اثر چرخش در حین پاستوریزاسیون تخم مرغ توسط Ramachandran و همکاران (۲۰۱۱) بررسی شد. نتایج نشان دادند که حالت چرخشی پاستوریزاسیون می‌تواند

زمان فرایند را به طور قابل توجهی کاهش دهد [۵]. Abbasnezhad و همکاران (۲۰۱۵) مدل عددی برای شبیه‌سازی انتقال حرارت سه بعدی در تخم مرغ دست طول پاستوریزاسیون توسعه دادند. در مدل مذکور اثرات تغییرات حجم کیسه هوا و وابستگی دمایی خواص ترموفیزیکی محصول در نظر گرفته شد [۶]. این مدل با مقایسه پروفیل‌های دمایی آزمایشی در طول پاستوریزه کردن تخم مرغ با مقادیر پیش بینی شده تایید شد. نتایج مدل نشان داد که محل قرارگیری و اندازه کیسه هوا تاثیر بسزائی بر فرایند پاستوریزاسیون تخم مرغ دارد [۷].

در مجموع عملیات پاستوریزاسیون معمولاً به سه روش اصلی گرمایش با هوای داغ، گرمایش با آب گرم و مایکروویو انجام می‌شود [۸]. برای مثال، Pasquali و همکاران (۲۰۱۰) اقدام به تولید یک تفنگ هوای گرم کردند، دستگاه مذکور در دو مرحله ۸ ثانیه‌ای، هوای گرم با دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس تزریق می‌کرد و در حدفصل بین دو تیمار، هوای سرد برای ۳۰ ثانیه دمیده می‌شد [۹].

استفاده از آب گرم به عنوان محیط گرمایشی، ضریب انتقال حرارت در سطح را افزایش می‌دهد ولی بیشتر محققین کاهش قدرت کف کنندگی آلبومین را به عنوان یکی از معایب این روش گزارش کرده‌اند. مزیت مهم گرمایش با مایکروویو امکان گرمایش محتویات داخلی تخم مرغ بدون افزایش درجه حرارت در بخش‌های خارجی است و نتایج آزمایشگاهی نیز نشان داده است که بر خلاف تصور اولیه سرعت گرمایش آلبومین و زرده تخم مرغ تقریباً یکسان است [۸]. Dev و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که روش پاستوریزاسیون با مایکروویو تغییرات کمتری در خواص کاربردی تخم مرغ از قبیل ویسکوزیته، قدرت کف کنندگی و پایداری کف در مقایسه با پاستوریزاسیون با آب گرم نشان می‌دهد. اخیراً Geveke و همکاران (۲۰۱۷) روش جدیدی برای پاستوریزه کردن تخم مرغ با استفاده از انرژی (امواج رادیویی) RF ابداع کردند که به طور قابل توجهی زمان فرایند را کاهش می‌داد. نتایج آنها نشان داد، در حالی که روش پاستوریزاسیون مرسوم (آب گرم)، تقریباً ۶۰ دقیقه برای تکمیل فرایند نیاز داشت، استفاده از روش ترکیبی جدید و با استفاده از ترکیب گرمایش RF و آب گرم مدت فرایند به ۲۳/۵ دقیقه کاهش می‌دهد [۱۰]. Yang و همکاران (۲۰۲۰) نیز گزارش

$$\rho = \rho_{ref} [1 - \beta(T - T_{ref})] \quad [1]$$

معادله پیوستگی

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0 \quad [2]$$

معادله انرژی

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k}{\rho C_p} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad [3]$$

معادله ممتوم در محور عمودی

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] \quad [4]$$

معادله ممتوم در محور شعاعی

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] \quad [5]$$

شرایط مرزی

$$\begin{aligned} r=R \\ \text{For } 0 < z < H \quad [6] \\ v_z=0 \\ v_r=0 \\ -n.k \nabla T = h(T - T_{amb}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{at } z=0 \\ \text{For } 0 < r < R \quad [7] \\ v_z=0 \\ v_r=0 \\ -n.k \nabla T = h(T - T_{amb}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{At } r=0 \\ \text{For } 0 < z < H \quad [8] \\ \frac{\partial v_z}{\partial r} = 0 \\ v_r=0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \\ \text{At } z=H \\ \text{For } 0 < r < R \quad [9] \\ v_z=0 \\ v_r=0 \\ -n.k \nabla T = h(T - T_{amb}) \end{aligned}$$

دادند که ترکیب گرمایش با آب گرم و امواج RF در حذف گونه‌های سالمونلا بسیار مؤثر بوده است [۱۱].

در اعمال فرایند حرارتی پاستوریزاسیون، اعمال شرایط بهینه و کنترل فرایند، به عنوان یکی از چالش‌های مهم شناخته می‌شود. در صورتیکه ترکیب دما-زمان در این فرایند کمتر از میزان بهینه انتخاب شود، می‌توان انتظار انواع آلودگی‌های میکروبی و بالتبع فساد و یا حتی به خطر افتادن ایمنی مصرف‌کننده را انتظار داشت. متقابلاً در صورتیکه ترکیب دما-زمان بکار گرفته شده از حد بهینه عبور نماید، کاهش شدید کیفیت و خواص ارگانولپتیکی و عملکردی محصول دور از انتظار نیست. در همین راستا و در این پژوهش به مدل‌سازی انتقال حرارت و پاستوریزاسیون تخم مرغ پرداخته خواهد شد.

۲- مدل سازی و مواد و روش‌ها

۲-۱- توسعه مدل

در این تحقیق از آب گرم برای پاستوریزاسیون تخم مرغ استفاده شد انتقال حرارت در درون تخم مرغ و حمام آب گرم به ترتیب همرفت طبیعی و همرفت اجباری در نظر گرفته شد. به منظور کاهش مدت زمان محاسبات فرضیات زیر در مدل در نظر گرفته شد [۱۲].

۲-۲- فرضیات مدل

-هندسه متقارن محوری سبب می‌شود، مسئله از حالت ۳ بعدی به ۲ بعدی تقلیل یابد.

-تولید گرما به دلیل اتلاف ویسکوز ناچیز و قابل صرف نظر کردن است.

-شرایط عدم لغزش در دیواره داخلی قوطی وجود دارد.

-سیال غیر نیوتنی است. اما به دلیل نرخ برش کم، به عنوان سیال نیوتنی در نظر گرفته می‌شود.

-گرمای ویژه (C_p)، هدایت حرارتی (k) و ضریب انبساط

حجمی (β) ثابت هستند ولی وابستگی ویسکوزیته و دانسیته به دما در نظر گرفته شد (جدول ۱).

-تقریب بوسینسک^۱ معتبر است و از این رابطه تغییرات دانسیته با دما تقریب زده شد.

1. Boussinesq

شرایط اولیه

$$\text{For } 0 < z < H \quad [10]$$

$$\text{For } 0 < r < R$$

$$Vr=0 \quad Vz=0$$

$$T_i = 5^\circ C$$

$$T(r,t) = T_{water} + (T_{egg} - T_{water}) \frac{2a}{\pi} \sum_{N=1}^{\infty} \frac{(-1)^{N-1}}{N} \sin\left(\frac{Nr}{a}\right) \exp\left(-\frac{N^2 \pi}{\tau_0}\right) \quad [12]$$

$$\tau_0 = \frac{Cp\rho a^2}{k}$$

ب) تایید نهایی مدل: تایید فرضیات مدل بوسیله مقایسه پروفیل‌های دمای پیش بینی شده توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل در تخم مرغ تحت جابجایی اجباری با آب گرم انجام شد.

۲-۵- مواد و روش‌ها

وزارت کشاورزی ایالات متحده گزارش داده است که حداقل دما برای پاستوریزاسیون آلبومین ۵۵/۱ درجه سانتیگراد با حداقل زمان نگهداری ۶۲ دقیقه است. اعمال دمای بالاتر در حین پاستوریزه کردن باعث از بین رفتن مواد مغذی مختلف، غیرفعال شدن آنزیم‌ها و دناتوراسیون پروتئین‌های سفیده تخم مرغ می‌شود. از این رو، در این پژوهش حداقل دمای پاستوریزاسیون ۵۵ درجه سانتیگراد انتخاب شد و به منظور رسیدن به این درجه حرارت از حمام آب گرم (بن ماری، پکو، ایران) (۵۵ درجه سانتیگراد) استفاده شد. قبل از گرمایش، یک ترموکوپل کالیبره شده از طریق سوراخ روی تخم مرغ نوک ترموکوپل از سطح بالای پوسته تخم مرغ تا ۳۰ میلی‌متر در داخل تخم مرغ در موقعیت عمودی محوری وارد شد و با چسب مهر و موم شد. نوسانات دمای حمام آب (روشن/خاموش توسط ترموستات) ± 1 درجه سانتیگراد و از خطای مرتبط با ترموکوپل در اندازه‌گیری‌های تجربی صرف‌نظر شد. تخم مرغ را در حالت عمودی در یک نگهدارنده قرار داده شد و در تمام طول مدت پاستوریزاسیون در حمام آب غوطه ور ماند. تغییرات دما در حین فرایند توسط دیتالاگ ثبت شد.

۲-۶- تجزیه و تحلیل آماری

در این تحقیق از نرم افزار $\text{COMSOL Multiphysics}^{\text{®}} 5.2$ برای مدل سازی استفاده شد. دو معیار آماری، ضریب تبیین R^2 و ریشه میانگین مربعات خطا RMSE برای ارزیابی تناسب بین مدل با داده های تجربی (آزمایشی) مورد استفاده قرار گرفت [۱۸].

۲-۳- خصوصیات رئولوژیکی سفیده تخم مرغ

سفیده تخم مرغ ویسکوزیته بالایی دارد و به همین دلیل سرعت حرکت سیال در تخم مرغ خیلی کم خواهد بود به طوری که بر اساس نتایج منتشر شده، سرعت برشی در حین گرمایش و پاستوریزاسیون حدود ۰/۰۱ هرتز می‌باشد [۱۳ و ۱۴]. به دلیل سرعت برشی کم، ویسکوزیته نمونه را می‌توان مستقل از سرعت برشی فرض کرد و سیال را نیوتنی در نظر گرفت. این تقریب برای اکثر مواد غذایی مایع مانند پوره گوجه فرنگی، پوره هویج، پوره لوبیا سبز، سس سیب، پوره زردآلو و پوره موز، هر زمان که نرخ برش کم باشد، معتبر است [۱۵]. نتایج Ghani و همکاران (۲۰۰۱) نیز موید این موضوع بود، این محققین بر اساس همین فرض به مدلسازی فرایند حرارتی CMC به عنوان یک مدل غذایی در حین گرمایش با همرفت طبیعی پرداختند [۱۶]، با این وجود به منظور بررسی اثر دما بر ویسکوزیته سفیده تخم مرغ در حین گرمایش از معادله ۱۱ استفاده شد. ثابت های معادله زیر در جدول ۱ آورده شده است.

$$\mu = \eta_0 \gamma^{n-1} \exp\left(\frac{nE}{R_g T}\right) \quad [11]$$

در این رابطه μ ویسکوزیته، γ سرعت برشی، η_0 ضریب قوام، n شاخص رفتار جریان، E انرژی فعال سازی و R_g ثابت گازها است.

۲-۴- تایید مدل

تایید مدل توسعه داده شده در دو مرحله صورت گرفت: الف) تایید ریاضی (تایید اولیه): تایید اولیه معادلات بوسیله مقایسه نتایج حاصله از روش مدل با نتایج حاصله از حل تحلیلی گرمایش یک بعدی تخم مرغ انجام شد. حل تحلیلی دما برای یک کره از رابطه ۱۱ به دست می آید. این رابطه برای $t \geq 0.1\tau_0$ معتبر می باشد. در رابطه زیر ρ ، Cp ، a و k به ترتیب گرمای ویژه، دانسیته، شعاع کره و هدایت حرارتی تخم مرغ می باشد [۱۷].

محققین نیز میزان ویسکوزیته ظاهری سفیده را در حدود ۰/۱۵ پاسکال ثانیه گزارش دادند [۱۳]. البته در دماهای بالای ۶۰ درجه سلسیوس امکان انعقاد و دناتوره شدن سفیده تخم مرغ وجود دارد و به همین خاطر مدل سازی در محدوده ۵-۶۰ درجه سلسیوس انجام شد.

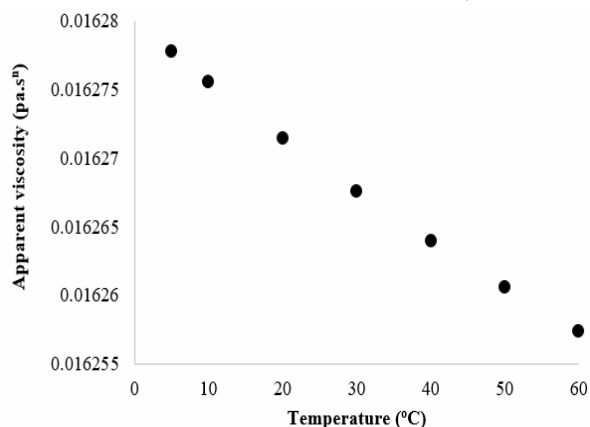


Fig 1 Predicted egg white viscosity with Arrhenius equation as a function of temperature

۲-۳- معبر سازی مدل

شکل ۲ مقایسه بین دماهای پیش بینی شده توسط حل تحلیلی با نتایج حاصل از مدل توسعه داده شده عددی و نتایج تجربی را نشان می‌دهد. انطباق قابل قبول مابین نتایج حاصل از حل عددی و تحلیلی، بیانگر صحیح بودن حل سیستم معادلات و تایید اولیه مدل توسعه داده شده می‌باشد.

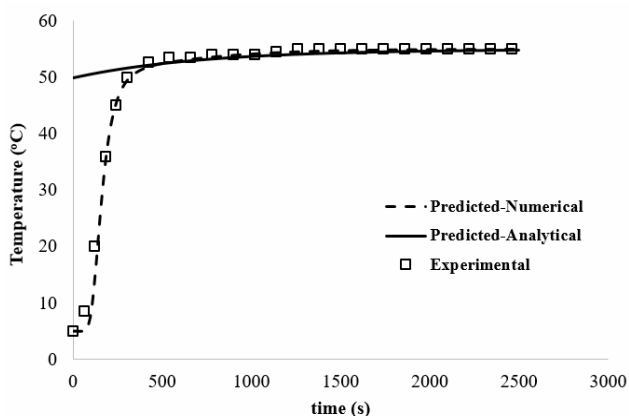


Fig 2 Comparison between the experimental and predicted temperature profile in centre point of the egg at 55 °C

همان‌گونه که در بخش مواد و روش‌ها توضیح داده شد، مدل

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (T_{pre,i} - T_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (T_{pre,i} - T_{pre,i})^2} \quad [13]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{exp,i} - T_{pre,i})^2}{N}} \quad [14]$$

Table 1 Parameters used in the simulation

Parameter	Value
Specific heat (yolk) (kJ/kg.K)	2.7
Specific heat (white) (kJ/kg.K)	3.7
Specific heat (shell) (kJ/kg.K)	888
Thermal conductivity (yolk) (W/mK)	0.34
Thermal conductivity (white) (W/mK)	$0.43 + 5.5 \times 10^{-4} \times T$
Thermal conductivity (shell) (W/mK)	2.9
Density (yolk) (kg/m ³)	1027
Density (white) (kg/m ³)	1038
Density (shell) (kg/m ³)	2300
Viscosity (yolk) (Pa.s)	$1.6 - 4.8 \times 10^{-3} \times T$
Convection heat transfer coefficient (W/m ² K)	1200
Initial temperature (°C)	5
Ambient temperature (°C)	55
Decimal reduction time (D ₅₅) (min)	14.6
Z-value (°C)	3.07
Radius (cm)	4.5
Height (cm)	5.8
Flow behavior index (n)	0.57
Consistency index (Pa.s ⁿ)	2.23×10^{-3}
Activation energy (ΔE) (kJ kg mol ⁻¹)	30.74×10^3

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تغییرات رئولوژیکی سفیده تخم مرغ در

حین فرایند

شکل ۱ تغییرات ویسکوزیته سیال به عنوان تابعی از تغییرات دما در حین پاستوریزاسیون را نشان می‌دهد.

همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش دما، ویسکوزیته سیال کاهش نشان می‌دهد ولی این کاهش خیلی محسوس نیست زیرا سفیده تخم مرغ از ویسکوزیته بالایی برخوردار می‌باشد. نتایج مدل با نتایج تجربی ارائه شده توسط Abbasnezhad و همکاران (۲۰۱۴) تطابق قابل قبولی نشان می‌دهد به طوری که این

صورت شعاعی به سمت هسته حرکت می‌کند (شکل ۳). بنابراین یک جریان گردش سیال در تخم مرغ ایجاد می‌شود. شکل ۳ همچنین نشان می‌دهد که مایع در نزدیکی پوسته به دلیل شرایط مرزی بدون لغزش در حالت سکون قرار دارد. برای سفیده تخم مرغ، بزرگی سرعت محوری در ارتفاع میانی نزدیک دیواره پوسته ۰/۱ میلی‌متر بر ثانیه در زمان ۳۰۰ ثانیه بود که با نتایج Ramachandran (۲۰۱۱) مطابقت خوبی دارد [۵]. با افزایش زمان، بزرگی بردار سرعت در حین گرمایش کاهش نشان می‌دهد و سرعت در لایه‌های مختلف یکنواخت‌تر می‌شود، که این پدیده را می‌توان با عدد گراشوف توضیح داد. این عدد که نشان دهنده نسبت نیروی شناوری به نیروی ویسکوز است، با پیشرفت گرمایش، و به دلیل کاهش اختلاف دمای بین پوسته و مرکز تخم مرغ کاهش نشان می‌دهد و در نتیجه باعث کاهش نیروی شناوری در مایع می‌شود که در نهایت منجر به کاهش در سرعت سیال می‌گردد [۱۹-۲۰].

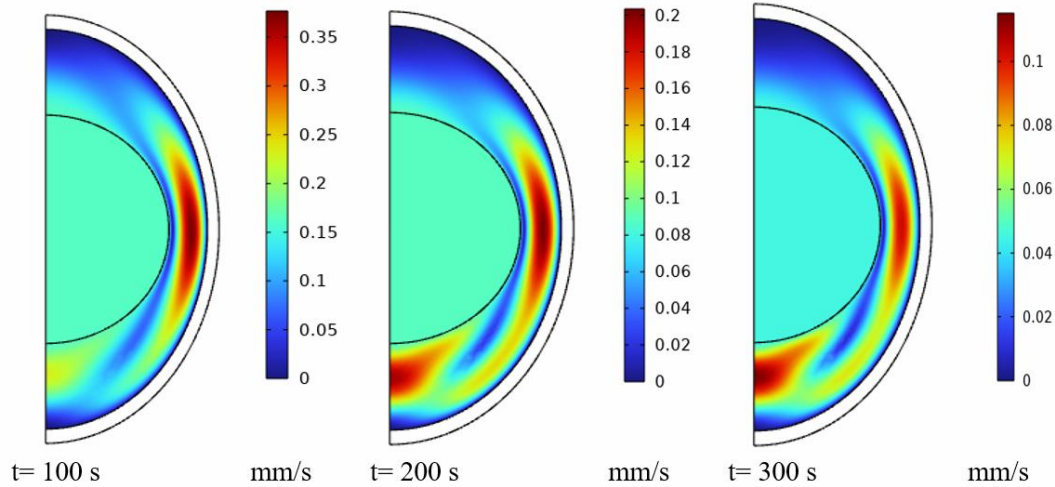


Fig. 3 Velocity distribution at 100, 200, and 300 s after pasteurization

دقیقاً در مرکز هندسی واقع شده ولی در حالت ترکیب هدایت-همرفتی این ناحیه در بخش تحتانی تخم مرغ واقع شده است. در عین حال نکته دیگری که از شکل قابل استنباط است اختلاف گرمترین و سردترین ناحیه بعد از ۳۰۰ ثانیه گرمایش است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این اختلاف برای دو روش حرارت دهی صرفاً هدایتی و ترکیب هدایت-همرفتی به ترتیب حدود ۴۰ و ۲۵ درجه سانتیگراد است و اختلاف دما در روش همرفتی به طور قابل توجهی کمتر است که اهمیت در نظر گرفتن جریان همرفتی در حین انتقال حرارت را نشان می‌دهد [۶].

تحلیلی برای زمان‌های $t \geq 0.1\tau_0$ معتبر است و به همین خاطر از ثانیه ۹۰۰ می‌توان از حل تحلیلی استفاده نمود. نتایج مقایسه پروفیل‌های دمایی اندازه‌گیری شده در دمای ۵۵ درجه سانتیگراد و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل توسعه داده شده بر مبنای ورودی‌های مندرج در جدول ۱ نشان دهنده صحت مدل توسعه داده شده است. به طوری که ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده‌های تجربی و آزمایشی توسط مدل به ترتیب ۹۸ و ۰/۳۵ به دست آمد.

۳-۳- تغییرات سرعت در حین پاستوریزاسیون

سفیده تخم مرغ دور از پوسته در دمای پایین‌تری قرار دارد، همان‌طور که مایع گرم می‌شود منبسط شده و در نتیجه سبک‌تر می‌شود. نیروی شناوری ایجاد شده در اثر تغییر چگالی مایع ناشی از تغییر دما (از دیواره پوسته تا هسته) جریانی رو به بالا در نزدیکی دیواره ایجاد می‌کند. مایع گرم که به سمت بالا می‌رود توسط بخش فوقانی پوسته بالایی منحرف می‌شود و سپس به

۳-۴- مقایسه بین گرمایش به صورت هدایتی و

هدایت-همرفتی

شکل ۴ تغییرات و نحوه توزیع دما بعد از ۳۰۰ ثانیه پاستوریزاسیون در دمای ۵۵ درجه سانتیگراد برای گرمایش با روش هدایت و یا مخلوط هدایت-همرفتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود در حالت انتقال حرارت به روش هدایتی، نقطه سرد و کندترین ناحیه حرارتی (SHZ)

2. Slowest heating zone

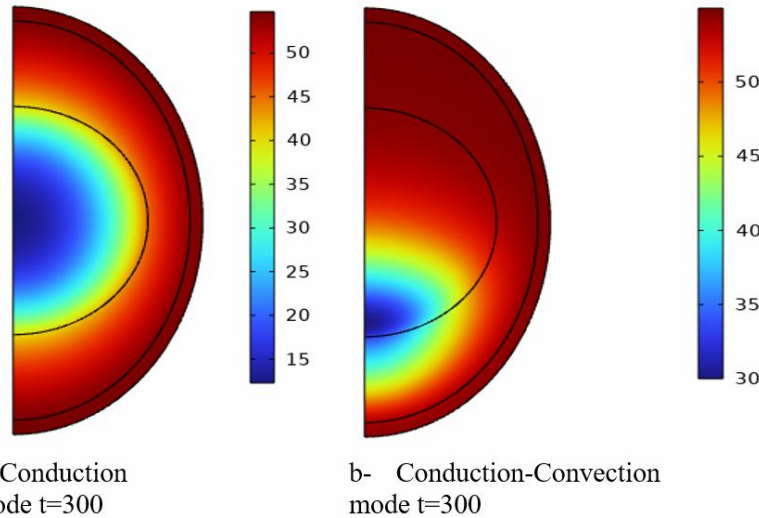


Fig 4 Comparison between temperature distribution of egg under two different heat regimes (a- pure conduction and b- combination of conduction-convection)

تأثیر جریان همرفتی قرار دارد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود بعد از ۳۰۰ ثانیه گرمایش کندترین ناحیه حرارتی از مرکز هندسی به سمت قسمت تحتانی تخم مرغ حرکت می‌کند. به طور معمول تعیین SHZ و نحوه حرکت آن در محصول یک پارامتر حیاتی در طراحی فرآیندهای حرارتی است. Ramachandran و همکاران (۲۰۱۱) مکان SHZ را در حدود بخش انتهایی تخم مرغ گزارش کردند. این نتایج با مشاهداتی که در کار ما یافت شد کاملاً مطابقت دارد [۵].

۳-۵- توزیع دما در حین پاستوریزاسیون

توزیع دما در طول گرمایش به صورت ایزوترم در شکل ۵ برای دوره‌های مختلف گرمایش با روش ترکیب هدایت-همرفتی ارائه شده است. ایزوترم‌ها در مراحل اولیه گرمایش تقریباً مشابه آنهایی بودند که در گرمایش رسانایی خالص یافت می‌شوند (نمودار نشان داده نشده است)، اما با گذشت زمان، ایزوترم‌ها به شدت تحت تأثیر جریان همرفتی قرار گرفتند. همان‌طور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود، SHZ یا کندترین ناحیه حرارتی در تخم مرغ در حین گرمایش یک ناحیه ثابت نیست و موقعیت آن در تحت

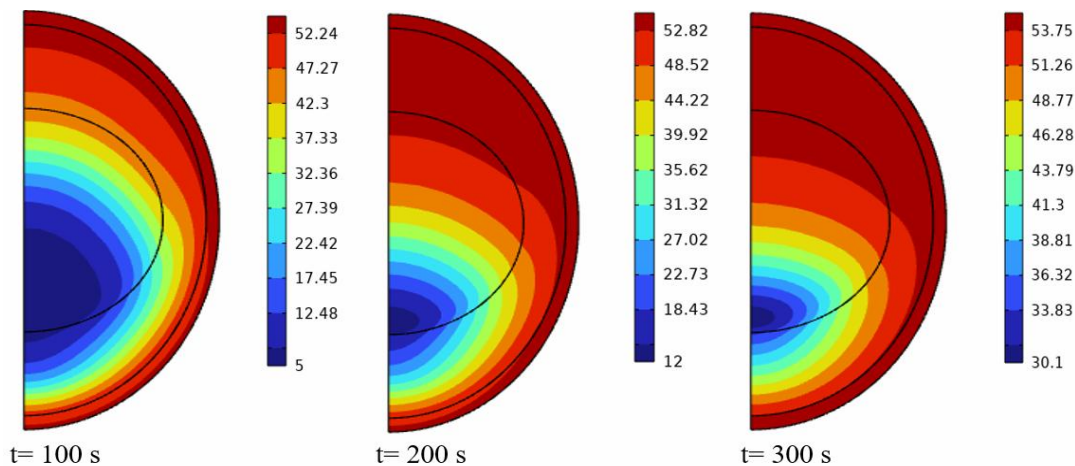


Fig 5 Temperature distribution of egg without air sac at 100, 200, and 3000 s.

اختلاف دما بین گرمترین و سردترین نقاط تخم مرغ حدود ۴۷ درجه سانتیگراد است ولی بعد از ۳۰۰ ثانیه این اختلاف درجه حرارت به حدود ۲۳ درجه تقلیل پیدا کرده است. شکل و نتایج

نکته دیگری که از شکل قابل مشاهده است، اولاً با افزایش زمان فرایند حجم ناحیه SHZ کاهش پیدا می‌کند و همزمان گردیان دما نیز شروع به کاهش می‌گذارد، به طوری که در ابتدای فرایند

تدریج با سردتر شدن تخم مرغ و خروج رطوبت و دی اکسید کربن از آن، اکسیژن جایگزین آن‌ها شده و باعث تشکیل کیسه هوا می‌شود.

با گذشت زمان حجم این کیسه افزایش پیدا می‌کند. این لایه از منظر انتقال حرارت، نقش عایق را بر عهده دارد و طبعاً می‌تواند بر دمای محصول موثر باشد [۲۱-۲۲]. از همین رو در این تحقیق به اثر این لایه در نحوه انتقال حرارت محصول پرداخته شد و نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. از مقایسه بین شکل ۵ و شکل ۶ دو نکته مشخص می‌شود، نخست آنکه همان‌طور که انتظار می‌رفت وجود این لایه در محصول باعث کاهش انتقال حرارت می‌شود و در ثانی مساحت SHZ و یا کندترین ناحیه حرارت دهی در مقایسه با شکل ۵ افزایش یافته است.

به دست آمده با نتایج Abbasnezhad و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد ولی اختلاف زمان به دست آمده در این مطالعه در مقایسه با نتایج ایشان، می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی از جمله دمای اولیه نمونه، سرعت آب در حمام و یا به عبارت دیگر بالاتر بودن ضریب انتقال حرارت همرفتی و مقادیر خصوصیات ترموفیزیکی بین این مطالعه مربوط باشد [۷].

۳-۶- اثر کیسه هوا بر تغییرات دما در حین

پاستوریزاسیون

اتاقک هوایی یا کیسه هوا وظیفه رساندن اکسیژن به جوجه را در داخل تخم بر عهده دارد. این اتاقک هوایی در بین غشای بیرونی و غشای داخلی تشکیل می‌شود. وقتی که تخم مرغ از بدن مرغ بیرون می‌آید گرم است و کیسه هنوز تشکیل نشده است. به

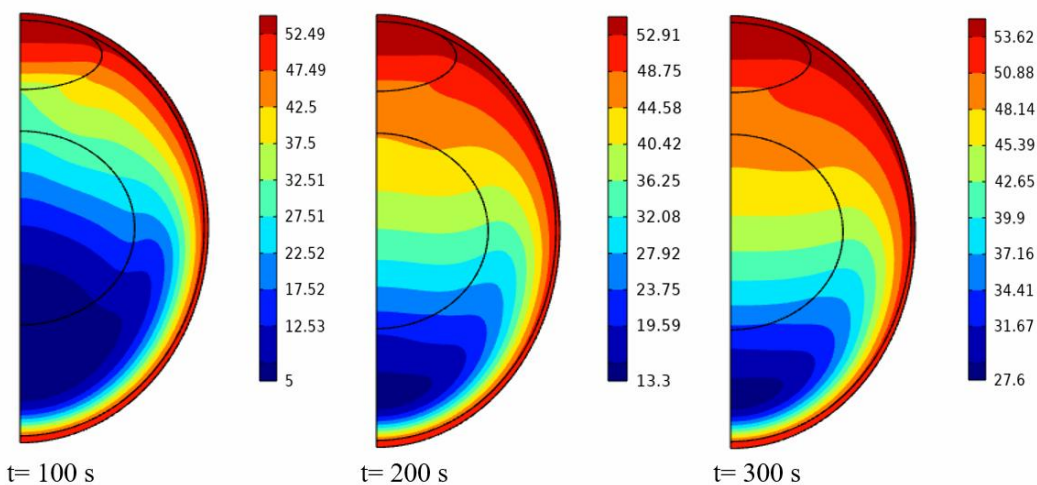


Fig 6 Temperature distribution of egg with air sac at 100, 200, and 3000 s.

پروفیل دما در نقطه سرد و مرکز هندسی بر یکدیگر منطبق نیست و دما در مرکز هندسی همواره بیشتر از نقطه سرد هست. در ضمن وجود لایه هوا هم سبب کند شدن روند تغییرات دما شده است. با این وجود، تفاوت مشاهده شده در نمودار دما در دو حالت (وجود یا عدم وجود کیسه هوا) برای ایجاد تغییر عمده در فرآیند گرمایش کافی نیست و نتایج نشان داد که جریان‌های همرفتی در محصول به اندازه کافی قوی هستند که این اختلاف را حتی برای سیال ویسکوزی مانند سفیده تخم مرغ مانند به حداقل رسانند.

همان‌طور که پیشتر عنوان شد، در تخم مرغ به دلیل گردش سیال در حین پاستوریزاسیون، نقطه سرد در مرکز هندسی واقع نیست. شکل ۷ پروفیل دما در دو موقعیت متفاوت (مرکز و نقطه سرد تخم مرغ) و دو شرایط مختلف (وجود و یا عدم وجود کیسه هوایی) در محصول را نشان داده است. همان‌طور که در شکل ۶ هم مشاهده شد، وجود یک لایه هوا در داخل تخم مرغ به عنوان یک عایق حرارتی باعث شده است که سرعت گرمایش محصول کند شود. نتایج مشابهی توسط Abbasnezhad و همکاران (۲۰۱۹) و Lakins و همکاران (۲۰۰۸) گزارش شده است [۶ و ۲۳]. در ضمن برای دو حالت وجود و یا عدم وجود هوا،

۳-۷- اثر زمان پاستوریزاسیون بر غیر فعال شدن

سالمونلا انترتیدیس

سالمونلا انترتیدیس باکتری به عنوان شاخص ترین علت آلودگی در تخم مرغ شناخته می‌شود و با توجه به اینکه پاستوریزاسیون بایستی قادر به یک کاهش حداقلی 5D از میکروبهای پاتوژن باشد [۲۴-۲۵]. مدت زمان پاستوریزاسیون برای دو حالت وجود و یا عدم وجود کیسه هوایی و دو موقعیت، نقطه سرد و مرکز هندسی تخم مرغ در شکل ۹ نشان داده شده است. بعد از ۵ دقیقه اول از فرایند حرارتی، تغییری در تعداد باکتری‌ها مشاهده نمی‌شود و روند تغییرات بسیار کند و بطئی است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، روند تغییرات تعداد باکتری‌های باقیمانده در حین پاستوریزاسیون به شدت به توزیع دما و الگوی جریان در زمان پاستوریزاسیون وابستگی نشان می‌دهد. به طوری که مدت زمان 5D کاهش در تعداد باکتری‌ها برای دو نقطه مرکز هندسی و نقطه سرد با وجود کیسه هوایی به ترتیب ۳۰/۴۱، ۳۲/۹۱ و برای همین دو نقطه و بدون در نظر گرفتن کیسه هوایی به ترتیب ۲۶/۲۵ و ۲۷/۹۱ به دست آمد [۲].

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، فرآیند پاستوریزاسیون تخم مرغ مورد بررسی قرار گرفت. ضرورت اصلی برای مدل‌سازی پاستوریزاسیون تخم مرغ، تعیین توزیع یکنواخت و موثر گرما در تخم مرغ و بررسی موقعیت کندترین منطقه گرمایش (SHZ) است. نتایج این تحقیق نشان داد که که نقطه سرد در تخم مرغ به دلیل تشکیل یک جریان همرفت طبیعی در داخل محصول، از مرکز هندسی به سمت پایین و در ارتفاع ۲۵٪ از بخش تحتانی نمونه قرار می‌گیرد. با بکارگیری این مدل می‌توان تغییرات سرعت سیال در حین گرمایش، درجه حرارت، محل قرار گیری کندترین ناحیه حرارتی، سرعت نابودی میکروارگانیسمها و مواد مغذی در تخم مرغ را به عنوان تابعی از عوامل درونی و بیرونی متفاوت با دقت بالایی تخمین زد.

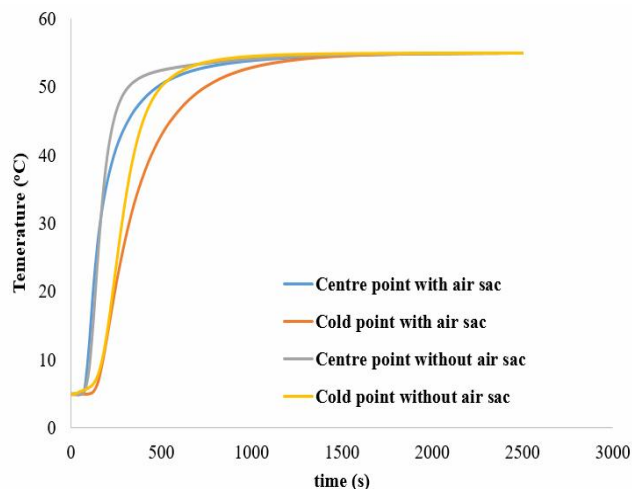


Fig 7 Temperature profiles of intact egg at two different conditions (presence vs. absence of air sac) and two positions (geometrical center point vs. slowest heating point)

شکل ۸ نمودار تغییرات درجه حرارت نمونه به عنوان تابعی از ارتفاع تخم مرغ و زمان را نشان می‌دهد، همان‌طور که مشاهده می‌شود دما در دو حد بالا و پایین تخم مرغ حداکثر می‌باشد ولی در بخش مرکزی و عمدتاً انتهای کمترین مقدار را نشان می‌دهد.

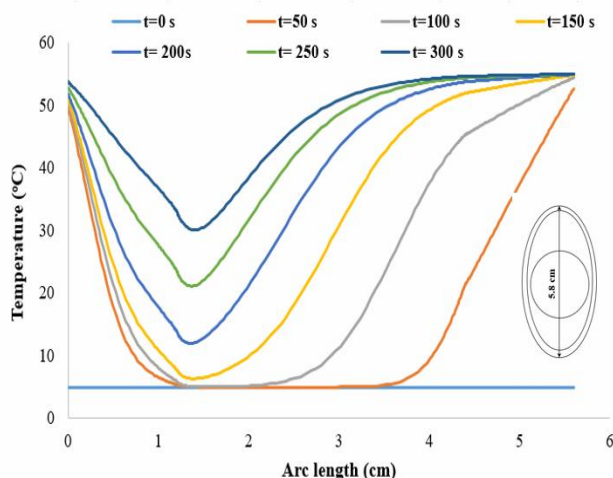


Fig 8 simulated results obtained from CFD model in predicting temperature in an egg as a function of time and height of egg

طبعاً، این موضوع باعث خواهد شد که تغییرات دما به صورت متقارن هم نباشد. دلیل این موضوع پیشتر توضیح داده شد و در همین منطقه امکان بقاء و رشد میکروارگانیسمها بیشتر وجود دارد.

- 44.
- [6] Abbasnezhad, B., Hamdami, N., Monteau, J.-Y., & Vatankhah, H. 2016. Numerical modeling of heat transfer and pasteurizing value during thermal processing of intact egg. *4*(1), 42-49.
- [7] Abbasnezhad, B., Dalvi-Isfahan, M., & Hamdami, N. 2019. CFD Analysis of Thermal Processing of Intact Eggs. In D.-W. Sun (Ed.), *Computational Fluid Dynamics in Food Processing* (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.
- [8] O'Bryan, C. A., Ricke, S. C., & Crandall, P. G. 2017. Chapter 18 - Chemical and Physical Sanitation and Pasteurization Methods for Intact Shell Eggs. In S. C. Ricke & R. K. Gast (Eds.), *Producing Safe Eggs* (pp. 373-390). San Diego: Academic Press.
- [9] Pasquali, F., Fabbri, A., Cevoli, C., Manfreda, G., & Franchini, A. 2010. Hot air treatment for surface decontamination of table eggs. *Food Control*, *21*(4), 431-435.
- [10] Geveke, D. J., Bigley, A. B. W., & Brunkhorst, C. D. 2017. Pasteurization of shell eggs using radio frequency heating. *Journal of Food Engineering*, *193*, 53-57.
- [11] Yang, Y., & Geveke, D. J. 2020. Shell egg pasteurization using radio frequency in combination with hot air or hot water. *Food Microbiology*, *85*, 103281.
- [12] Geveke, D. J., Gurtler, J. B., Jones, D. R., & Bigley, A. B. W. 2016. Inactivation of *Salmonella* in Shell Eggs by Hot Water Immersion and Its Effect on Quality. *81*(3), M709-M714.
- [13] Abbasnezhad, B., Hamdami, N., Shahedi, M., & Vatankhah, H. 2014. Thermophysical and rheological properties of liquid egg white and yolk during thermal pasteurization of intact eggs. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *8*(4), 259-269.
- [14] Kumar, A., & Bhattacharya, M. 1991. Transient temperature and velocity profiles in a canned non-Newtonian liquid food during sterilization in a still—cook retort. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *34*(4/5), 1083–1096.
- [15] Steffe, J.F., Mohamed, I.O., & Ford, E.W. 1986. Rheological properties of fluid foods: data compilation. In M.R. Okos (Ed.), *Physical and Chemical Properties of Foods*. St. Joseph, MI: Transaction of American Society of

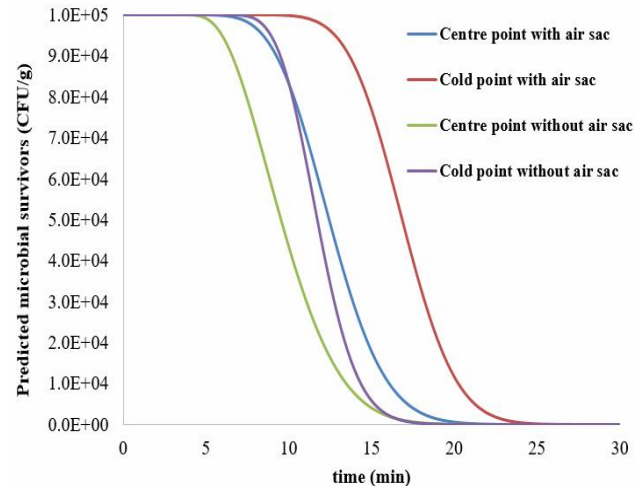


Fig 9 Predicted microbial survivors at different positions during pasteurization

۵- منابع

- [1] FDA, 2011. Prevention of *Salmonella Enteritidis* in Shell Eggs during Production, Storage, and Transportation. <http://www.fda.gov/Food/GuidanceRegulation/GuidanceDocumentsRegulatoryInformation/Eggs/ucm285101.htm>.
- [2] USDA-FSIS, 2005. Risk Assessment for *Salmonella Enteritidis* in Shell Eggs and *Salmonella* spp. In Egg Products, October 2005. Available at: http://www.fsis.usda.gov/wps/wcm/connect/16abcb5f-21fc-4731-9346-fd8401582ba4/SE_Risk_Assess_Oct2005.pdf?MOD=AJPERES.
- [3] Health Canada, 2011. Guidance for Industry on Reducing the Risk of *Salmonella* Enteritidis in Canadian Shell Eggs. Available from: <http://www.hc-sc.gc.ca/fn-an/legislation/guide-ld/salmonella-enteritidis-eng.php>.
- [4] Denys, S., Pieters, J. G., & Dewettinck, K. (2003). Combined CFD and Experimental Approach for Determination of the Surface Heat Transfer Coefficient During Thermal Processing of Eggs. *Journal of Food Science*, *68*(3), 943-951.
- [5] Ramachandran, R., Malhotra, D., Anishparvin, A., & Anandharamakrishnan, C. 2011. Computational fluid dynamics simulation studies on pasteurization of egg in stationary and rotation modes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *12*(1), 38-

Final Rule: Guidance for Industry. Prevention of *Salmonella Enteritidis* in Shell Eggs during Production, Storage and Transportation. Available from:

<http://www.fda.gov/downloads/Food/GuidanceComplianceRegulatoryInformation/GuidanceDocuments/FoodSafety/UCM285137.pdf>.

[22] Hou, H., Singh, R.K., Muriana, P.M., Stadelman, W.J., 1996. Pasteurization of intact shell eggs. *Food Microbiology*. 13, 93–101.

[23] Lakins, D.G., Alvarado, C.Z., Thompson, L.D., Brashears, M.T., Brooks, J.C., Brashears, M.M., 2008. Reduction of *Salmonella enteritidis* in shell eggs using directional microwave technology. *Poultry Science* 87, 985–991.

[24] Kang, M. S., Park, J. H., & Kim, H. J. 2021. Predictive Modeling for the Growth of *Salmonella* spp. in Liquid Egg White and Application of Scenario-Based Risk Estimation. 9(3), 486.

[25] Toledo, R.T, 2007. Fundamentals of Food Process Engineering. Springer, New York.

Agricultural Engineers.

[16] Ghani, A. G., Farid, M. M., Chen, X. D., & Richards, P. 2001. Thermal sterilization of canned food in a 3-D pouch using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, 48, 147–156. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00150-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00150-3)

[17] Welty, James R. 2008. *Fundamentals of Momentum, Heat, And Mass Transfer*. John Wiley & Sons Inc.

[18] Dalvi -Isfahan, M. 2020. A comparative study on the efficiency of two modeling approaches for predicting moisture content of apple slice during drying. *Journal of food process engineering*, 43(11), e13527

[19] Chen, C. R., & Ramaswamy, H. S. 2007. Visual Basics computer simulation package for thermal process calculations. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(7), 603-613.

[20] Jenko, M. 2015. Numerical Cooking for Pasteurized Soft Boiled Eggs. *Journal of Mechanical Engineering*, 61(5), 319-330.

[21] FDA, 2009. Code of Federal Regulations, Title 21, Parts 16 and 118. Federal Register



Modeling In-Shell Pasteurization of egg by computational fluid dynamics (CFD) technique

Dalvi-Isfahan, M. ^{1*}

1. Assistant professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Jahrom University, Jahrom, Iran.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received 2022/ 05/ 19

Accepted 2022/ 07/ 17

Keywords:

Computational fluid dynamic,
Egg,
Pasteurization.

DOI: 10.22034/FSCT.19.127.305

DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.127.24.7

*Corresponding Author E-Mail:
dalvi@jahromu.ac.ir

Egg contamination by *Salmonella enteritidis* is one of the most important causes of foodborne gastroenteritis throughout the world and the common method which can be used to inactivate this bacteria is pasteurization. In this study, the pasteurization of intact egg was mathematically modelled using a CFD technique. The results were compared with experimental data and it was found that the model could reasonably forecast the temperature of egg during pasteurization ($R^2 > 0.98$). The model showed that in order to predict the temperature variation of the slowest heating zone (SHZ) with higher accuracy, it is necessary to incorporate the influence of natural convection currents induced by the hot eggshell walls in the pasteurization process. Results indicated that the SHZ keeps moving during pasteurization and eventually stays in a region that is about 25% of the egg height from the bottom after 300 s of heating. These results also show that the time required to reduce the *Salmonella enteritidis* population in cold point of eggs to 5D is approximately 28 minutes. This model could serve as an important tool in better understanding of the pasteurization process, choosing the best process parameters and facilitate process optimization of intact egg pasteurization towards industrial implementation.