

شبیه‌سازی عددی فرآیند انجماد ماهی به دو روش غوطه‌وری و وزش هوای سرد

علیرضا تیمورتاش*؛ سید محمد جوادی و احسان ابراهیم‌نیا بجنستان

گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، صندوق پستی: ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱

تاریخ پذیرش: مهر ۱۳۸۸

تاریخ دریافت: آذر ۱۳۸۶

چکیده

در این تحقیق شبیه‌سازی سه بعدی فرآیند انجماد ماهی با استفاده از روش عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. هندسه سه‌بعدی ماهی با اندازه‌برداری نقطه به نقطه تولید شده است. خواص ترموفیزیکی ماهی به صورت توابعی از دما و رطوبت ماهی در نظر گرفته شده‌اند. انجماد ماهی طی دو فرآیند انجماد به روش غوطه‌وری و انجماد با هوای سرد شبیه‌سازی شده و اثر عوامل موثر بر زمان انجماد شامل دما و محتوی آب اولیه ماهی مورد بررسی قرار گرفته است. بار حرارتی محصول جهت رسیدن به دمای مورد نظر و تغییرات زمانی دما در نقاط مختلف ماهی جهت انجماد موثر محصول و نیز زمان انجماد توسط غوطه‌وری در آب نمک و نیز روش وزش هوای سرد محاسبه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند در روش غوطه‌وری به دلیل نرخ انجماد کند، دمای اولیه ماهی می‌تواند نقش موثری در زمان انجماد داشته باشد. از طرفی استفاده از ترکیب دو روش غوطه‌وری و وزش هوای سرد در مراحل مختلف انجماد، می‌تواند علاوه بر کاهش شدید زمان انجماد نسبت به روش غوطه‌وری، تلفات حرارتی روش وزش هوای سرد را به مقدار زیادی کاهش دهد. مقایسه توزیع دما در مرکز ماهی تطابق خوبی با نتایج تجربی موجود نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: انجماد ماهی، زمان انجماد، دما، بیوانفورماتیک

مقدمه

فیزیکی مانند دمای اولیه و نهایی، دمای سیال عامل، سرعت سیال خنک‌کننده و ابعاد آن بستگی دارد.

روشهای مختلفی جهت تخمین توزیع دما و زمان انجماد شامل روشهای آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی وجود دارند. در یافته‌های آزمایشی، فرآیندها در ابعاد آزمایشگاهی شبیه‌سازی می‌شوند. با این‌که این داده‌ها بسیار ارزشمند هستند اما توانایی تعمیم مناسب و ارائه یک مدل عمومی برای تمام مواد و شرایط مختلف را ندارند. با این وجود یافته‌های تجربی، جهت ارزیابی نتایج تحلیلی و عددی، لازم می‌باشند. روشهای تحلیلی زیادی

انجماد، روشی معمول جهت نگهداری مواد غذایی است و لذا مدل‌سازی ریاضی انجماد چندی است که مورد توجه قرار گرفته است. در این مدل‌سازی‌ها، بهینه‌سازی مصرف انرژی، قابلیت اطمینان از نحوه انجماد، ایمنی، کیفیت محصول نهایی و طراحی فرآیند و تجهیزات انجماد مورد توجه است. طراحی سیستم و تجهیزات سرمایش به داشتن اطلاعات در رابطه با نحوه نفوذ گرما، تخمین زمان سرمایش و انجماد و نیز برآورد بار حرارتی محصول غذایی وابسته است. از طرفی نرخ سرمایش و زمان انجماد مواد غذایی نظیر ماهی به عوامل مختلف محیطی و

* نویسنده مسئول: Teymourash@um.ac.ir

است (Ansari, 1999; Tocci & Mascheroni, 1995; Hamdami *et al.*, 2004). روش انجماد با وزش هوای سرد و نیز انجماد با غوطه‌وری در سیال واسطه آب و نمک از روشهای رایج انجماد در صنعت می‌باشند. این دو روش انجماد توسط Kolbe و همکاران در سال ۲۰۰۴، برای انجماد یک نوع ماهی به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شد. طبق گزارش آنها، از مزایای روش غوطه‌وری در آب نمک نسبت به روش وزش هوای سرد، دمای بالاتر سیال خنک کننده و در نتیجه بازده انرژی بالاتر می‌باشد. از طرفی پایین بودن نرخ انجماد در این روش از معایب آن ذکر شده است (Kolbe, 1990).

در تحقیق حاضر، فرآیند انجماد ماهی به دو شیوه فوق به صورت عددی بر مبنای روش حجم کنترلی شبیه‌سازی شده و به منظور استفاده مطلوب از مزایای هر دو روش، ترکیبی از دو روش پیشنهاد و نتایج آن بررسی گردیده است. همچنین اثر عوامل مختلف بر زمان انجماد و بار حرارتی لازم جهت سرمایش، با در نظر گرفتن خواص ترموفیزیکی ماهی به صورت توابعی از دما و رطوبت اولیه بررسی شده است.

مواد و روش کار

هندسه یکی از فاکتورهای مهم در تخمین بار حرارتی و توزیع دما در محصول می‌باشد. در این تحقیق بلحاظ پیچیده بودن هندسه محصول مورد نظر، مختصات نقاط مختلف روی سطح ماهی بطور سه‌بعدی اندازه‌گیری (Digit) شده و با انتقال اطلاعات عددی حاصل به نرم‌افزار سالدورکس (Solid Works) مدلی سه‌بعدی از ماهی تهیه شده است. شبیه‌سازی عددی براساس یک ماهی آزاد به جرم ۱/۱۳ کیلوگرم انجام شده که مقاطع مختلف بدن ماهی و ابعاد آن پس از مدلسازی در شکل (۱) آورده شده‌است.

در این تحقیق، فرآیند انجماد، بوسیله حل معادله انرژی با شرط مرزی جابجایی مورد مطالعه قرار گرفته است. از انتقال جرم، تغییر شکل ماهی در اثر انجماد (Shrinkage) صرف نظر و حوزه حل فقط محدود به ماهی شده و تبادل انرژی با محیط توسط اعمال ضریب انتقال حرارت جابجایی در مرز ماهی وارد محاسبات می‌شود، که از این طریق حجم و زمان محاسبات کاسته می‌شود. با توجه به این فرضیات جهت مدلسازی فرآیند

نیز جهت تخمین زمان انجماد ارائه شده‌اند که مشهورترین آن روش پلانک است (Plank, 1913). از آنجایی که، روش پلانک از گرمای محسوس صرف نظر کرده است، محققان زیادی سعی در تصحیح رابطه پلانک داشته‌اند (Salvadori *et al.*, 1997; Remy, 1987; Delgado & Sun, 2001).

در حالت کلی فرآیند پیشگویی انتقال گرما در ضمن انجماد ماده غذایی، بر پایه حل معادلات نفوذ گرما با شرط مرزی جابجایی می‌باشد. شکل پیچیده مواد غذایی (مانند ماهی)، طبیعت غیرخطی معادلات حاکم که ناشی از تغییر ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی برحسب دما است و نیز تغییر فاز آب داخل ماده به یخ، روشهای تحلیلی پیشگویی زمان انجماد مواد غذایی را با مشکل اساسی روبه‌رو کرده است. این پیچیدگی‌ها استفاده از روشهای عددی را در پیشگویی زمان انجماد مواد غذایی توجیه‌پذیر می‌کند.

شبیه‌سازی فرآیند انجماد مواد غذایی با استفاده از حل عددی به نوبه خود فرآیندی بسیار پیچیده و نیازمند دقت خاصی می‌باشد. Wang و همکاران در سال ۲۰۰۷، به مطالعه عددی انجماد مواد غذایی تخت، استوانه‌ای و کروی شکل و تخمین زمان انجماد و بار حرارتی محصول غذایی پرداختند. De Qian و Kolbe در سال ۱۹۹۴، پس از یک بررسی عددی نشان دادند که ظرفیت گرمایی ویژه، هندسه، ضریب هدایت، چگالی ماده غذایی، ضریب انتقال حرارت جابجایی و دمای محیط در پدیده انجماد موثر هستند. Sun و Hu در سال ۲۰۰۱، انجماد با وزش هوای سرد را برای گوشت‌های با سطح مقطع دایره‌ای و بیضوی به روش عددی مطالعه کردند و مقادیر ضریب انتقال حرارت جابجایی را در این حالات بدست آوردند. Medina و Moraga در سال ۲۰۰۰، انجماد یک تکه گوشت مستطیلی شکل را در میسر هوای سرد به روش عددی بررسی کردند و توزیع دما داخل ماده غذایی را بدست آوردند.

گوشت ماهی بعنوان نمونه مورد تحلیل در تحقیق حاضر، علاوه بر هندسه پیچیده دارای خواص غیرخطی از جمله ضریب انتقال حرارت هدایتی، ظرفیت حرارتی متغیر با درجه حرارت و رطوبت فرض شده است. مشخص نمودن روند تغییرات این خواص و اعمال آنها در کد یا نرم‌افزار مورد نظر از اهمیت خاصی برخوردار است. از مسائل مهم دیگر در این پدیده چگونگی اعمال اثر انجماد و تغییر فاز ایجاد شده در اثر سرد شدن گوشت ماهی می‌باشد که در مقالات مختلف به آن پرداخته شده

$$H = h + \Delta H$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT$$

$$\Delta H = \beta \cdot L$$

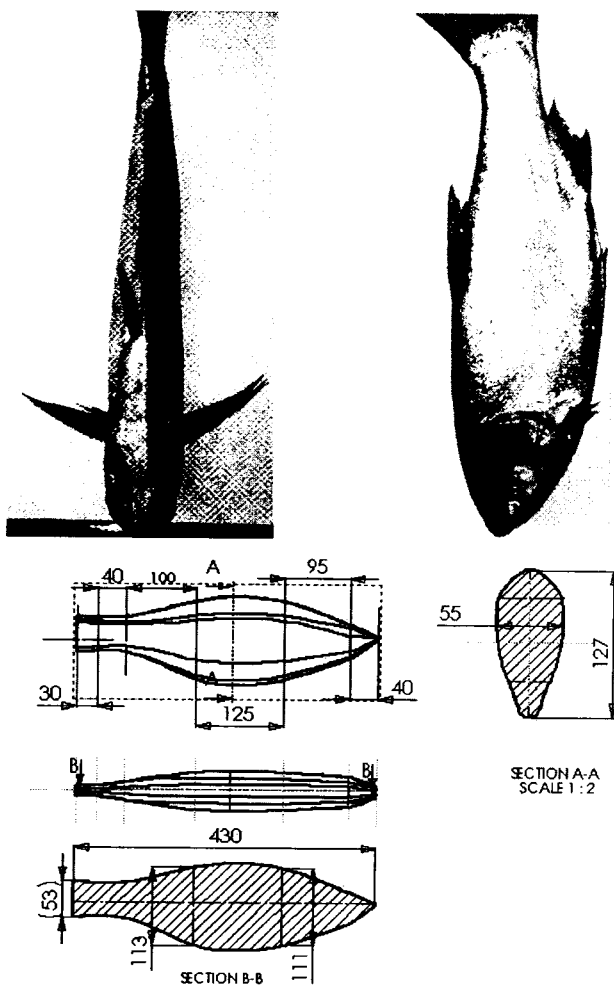
(۲) انجماد از معادله انرژی برحسب آنتالپی به جای دما استفاده شده است:

(۳)

$$(۴) \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} H) = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + S \quad (۱)$$

در این رابطه H آنتالپی ماده، ρ چگالی، \vec{v} سرعت سیال و S جمله چشمه است که در این تحقیق جمله چشمه به دلیل عدم وجود منبع حرارتی، صفر می‌باشد.

برای مدلسازی انجماد در معادله انرژی، آنتالپی کل ماده (H) بصورت مجموع آنتالپی محسوس (h) و آنتالپی نهان (ΔH) منظور شده به طوری که (Wang et al., 2007):



شکل ۱: نمونه ماهی مورد بررسی و نقشه مقاطع مختلف آن

گرمای ویژه:

$$\begin{cases} C_p = 1448(1-Y_0) + 418Y_0 & \text{اگر } T \geq T_F \quad (9) \\ C_p = 2874 - 2543Y_0 + 902/893(1-Y_0)/T^2 & \text{اگر } T < T_F \end{cases}$$

ضریب هدایت گرمایی:

$$\begin{cases} k = 0.10866 + 0.101Y_0 \cdot 51.052 \times 10^{-4} Y_0 T & \text{اگر } T \geq T_F \quad (10) \\ k = 0.378 + 1/376 Y_0 + 0.1930 / T & \text{اگر } T < T_F \end{cases}$$

در این روابط Y_0 درصد وزنی آب اولیه در گوشت ماهی و T دما برحسب درجه سانتیگراد است (ASHRAE Refrigeration, Handbook, 2002; Hu & Sun, 2001).

در این تحقیق، برای مدل‌سازی فرآیند انجماد معادله انرژی و روش آنتالی-تخلخل (معادلات حاکم ۱ تا ۴) به همراه اعمال شرط مرزی (معادله ۵) استفاده شده است؛ در این روش، متغیر کسر مایع (β) صورت کسر حجمی مایع در هر سلول محاسباتی تعریف شده است. همچنان که در بخش قبل توضیح داده شد، کسر مایع مقداری بین صفر تا یک می‌باشد که در حالت انجماد کامل مقدار صفر و در حالت مایع کامل برابر واحد می‌باشد. معادلات حاکم، پس از گسسته‌سازی از روش حجم کنترل نسبت به زمان و مکان، انتگرال‌گیری می‌شوند. در این شبیه‌سازی، مقادیر دما، گرمای ویژه و چگالی در هر گره محاسباتی و ضریب هدایت گرمایی روی سطوح حجم کنترل محاسبه می‌گردند. مقادیر چگالی و گرمای ویژه و ضریب هدایت گرمایی ماده غذایی، به دما وابسته بوده و لذا در هر گام زمانی باید تجدید شوند. توزیع دمای ماده، از تکرار بین معادله انرژی (معادله ۱) و محاسبه کسر حجمی مایع حاصل می‌شود. توضیح آن که فرآیند حل تا رسیدن به معیار همگرایی 10^{-7} ، تکرار شده است. جهت توضیحات بیشتر در مورد روش عددی اتخاذ شده به کتاب نوشته شده توسط Patankar (1980) مراجعه شود.

جهت شبکه‌بندی، هندسه تولید شده به نرم‌افزار گمبیت (Gambit) منتقل و پس از شبکه‌بندی ماهی با یک شبکه چهاروجهی (Tetrahedral) و اعمال شرایط مرزی، از نرم‌افزار فلونت (Fluent) جهت حل دستگاه معادلات حاکم استفاده شده است. در شکل ۲ هندسه ماهی در نرم‌افزار گمبیت نشان داده شده است. در بهترین شبکه تولید شده حجم ماهی به ۱۸۰۰۰ سلول چهاروجهی تقسیم شده و در شکل‌های ۳ و ۴ شبکه محاسباتی تولید شده روی سطح و حجم ماهی نشان داده شده است.

در روابط بالا h_{ref} انتالی مرجع در دمای مرجع T_{ref} و ΔH به صورت حاصلضرب کسر مایع (β) در گرمای نهان انجماد محصول (L) تعریف شده و مقداری بین صفر تا ۲۷۱ کیلو ژول بر کیلوگرم می‌باشد (ASHRAE Refrigeration Handbook, 2002). در صورتیکه حجم کنترل مورد بررسی بصورت مایع باشد، $\Delta H = 271$ و در صورت انجماد کامل آن $\Delta H = 0$ در نظر گرفته می‌شود.

شرایط مرزی در سطح ماهی برای سه جهت x ، y و z عبارت است از:

$$-k(Y_0, T) \frac{\partial T}{\partial x_i} \Big|_s = \bar{h}_m (T_s - T_a) \quad (5)$$

در مدل‌سازی بعمل آمده به جای حل سیال اطراف ماهی، ضریب جابجایی معادل \bar{h}_m در سطح ماهی در نظر گرفته شده است. با توجه به انتقال حرارت جابجایی آزاد از سطح ماهی در محفظه آب نمک ۸۰ گرم در لیتر و تقریب هندسه ماهی به مکعب مستطیلی محاط بر ماهی، مقدار این ضریب جابجایی در محیط آب نمک سرد، برابر ۱۰ وات بر مترمربع درجه کلون، در نظر گرفته شده است (ASHRAE Refrigeration Handbook, 2002). هنگام استفاده از سیال خنک‌کننده هوا و انتقال حرارت جابجایی اجباری از سطح ماهی، رابطه زیر برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی (\bar{h}_m) بکار گرفته شده است (Hu & Sun, 2001; ASHRAE Refrigeration Handbook, 2002):

$$\bar{h}_m = 0.224 Re^{0.6} \frac{k}{D} \quad (6)$$

طبق معادله ۶ مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری در حضور سیال هوای سرد با سرعت ۱ متر بر ثانیه، برابر ۶۵ وات بر مترمربع درجه کلون محاسبه می‌شود.

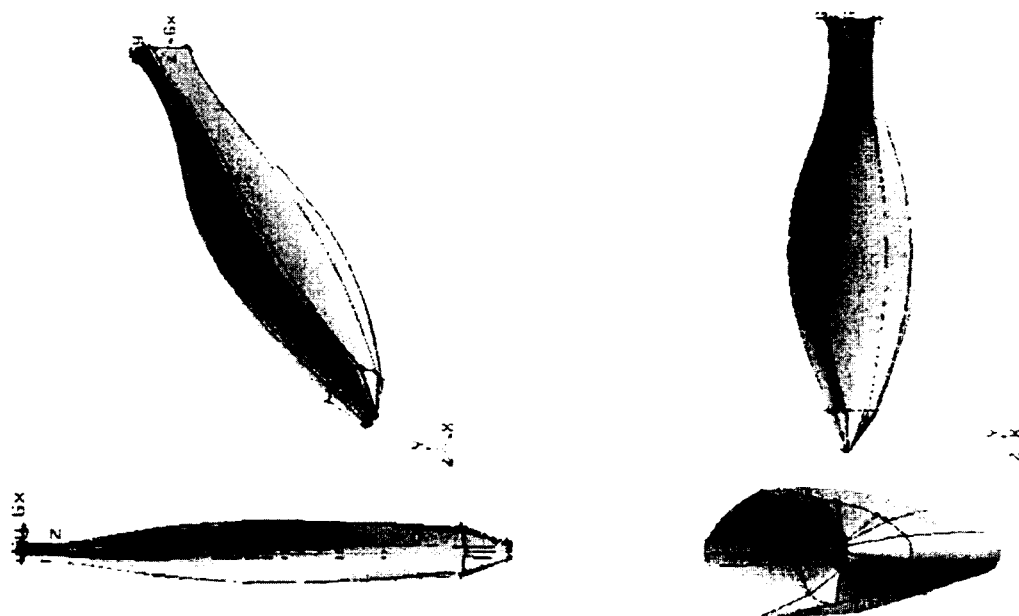
یکی از مسائل مهم در مدل‌سازی فرآیند انجماد ماهی، خصوصیات ترموفیزیکی آن می‌باشد که در این تحقیق سعی شده خواص بطور دقیق و به صورت تابعی از دمای محصول و رطوبت اولیه، صورت‌زیر وارد محاسبات گردند (Moraga & Barraza, 2002; Agnelli & Mascheroni, 2001):

دمای انجماد اولیه ماهی:

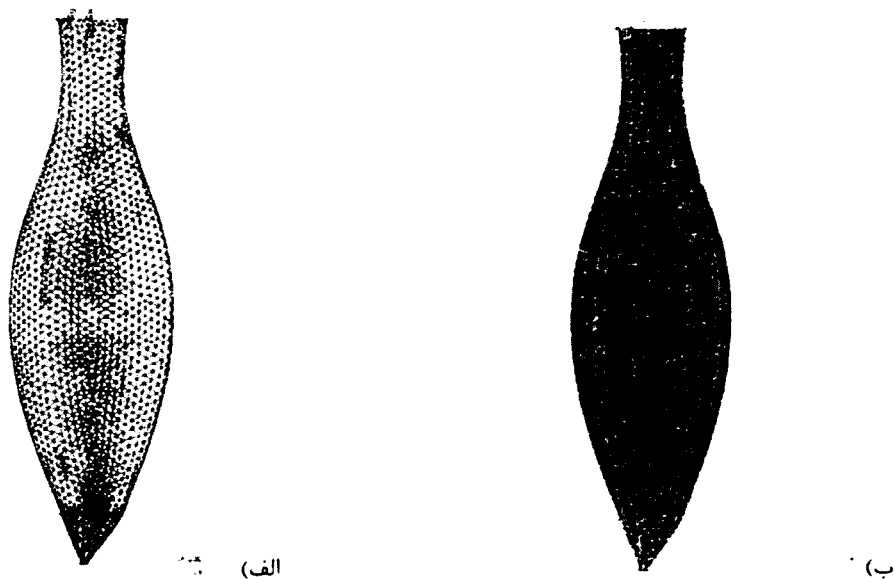
$$T_f = (1 - Y_0) / (0.06908 - 0.4393 Y_0) \quad (7)$$

چگالی ماهی:

$$\begin{cases} \rho = 1053 & \text{اگر } T \geq T_f \quad (8) \\ \rho = 1053 / 0.98221 + 0.1131 Y_0 + 0.25746(1 - Y_0) / T & \text{اگر } T < T_f \end{cases}$$



شکل ۲: هندسه سه‌بعدی ماهی در نرم‌افزار گمیت



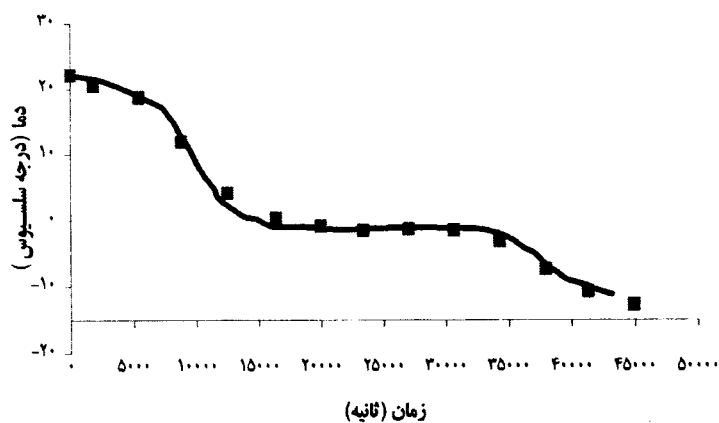
شکل ۳: الف) شبکه‌بندی سطح ماهی از نوع مثلثی ب) شبکه‌بندی حجمی ماهی در یک مقطع طولی

آمده است. این نتایج برای انجماد در آب نمک با دمای ۱۲- درجه سانتیگراد است و دمای اولیه ماهی مورد بررسی حدود ۲۲ درجه سانتیگراد می‌باشد. از آنجایی که نتایج تجربی برای

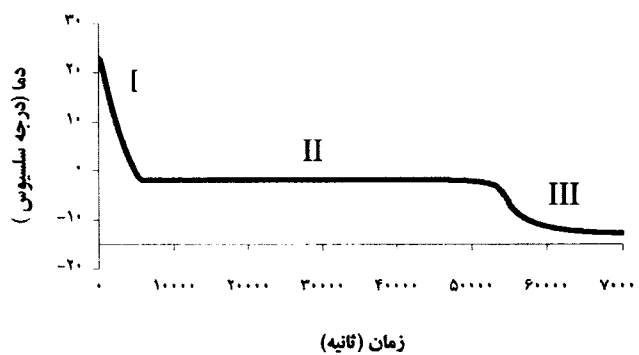
جهت ارزیابی مدل عددی مورد بررسی، دمای مرکز ماهی در دوره انجماد با نتایج عددی ارائه شده توسط Kolbe و همکاران در سال ۲۰۰۴، مقایسه شده و نتیجه این مقایسه در نمودار ۱

علت تفاوت مقادیر مشاهده شده، تفاوت خصوصیات و ابعاد ماهیهای بکار رفته جهت مدل‌سازی است. آنچه در این شکل مهم می‌نماید تشابه در روند انجماد دو ماهی است که قابل تقسیم به سه مرحله یعنی منطقه سرمایش قبل انجماد (I)، منطقه انجماد در دمای ثابت (II) و نهایتاً منطقه کاهش دما بعد از انجماد تا دمای مطلوب (III)، می‌باشد.

نمونه‌ای که مد نظر این تحقیق قرار گرفته، وجود ندارد لذا به نتایج عددی و آزمایشگاهی Kolbe و همکاران در خصوص ماهی Albacore به جرم ۱۰ پوند (معادل ۴٫۵ کیلوگرم) که دارای اندازه و خواص فیزیکی متفاوت از ماهی آزاد (مورد بررسی این تحقیق) بود، روی آورده شده است تا از این طریق روند انجماد مقایسه و به نتایج تحقیق حاضر به صورت کیفی صحت گذاشته شود.



(الف)



(ب)

نمودار ۱: مقایسه توزیع دمای مرکز ماهی در حین فرآیند انجماد
الف) مربع توپر: نتایج تجربی و خط تیره: نتایج عددی مربوط به Kolbe و همکاران (2004)
ب) حل عددی حاضر

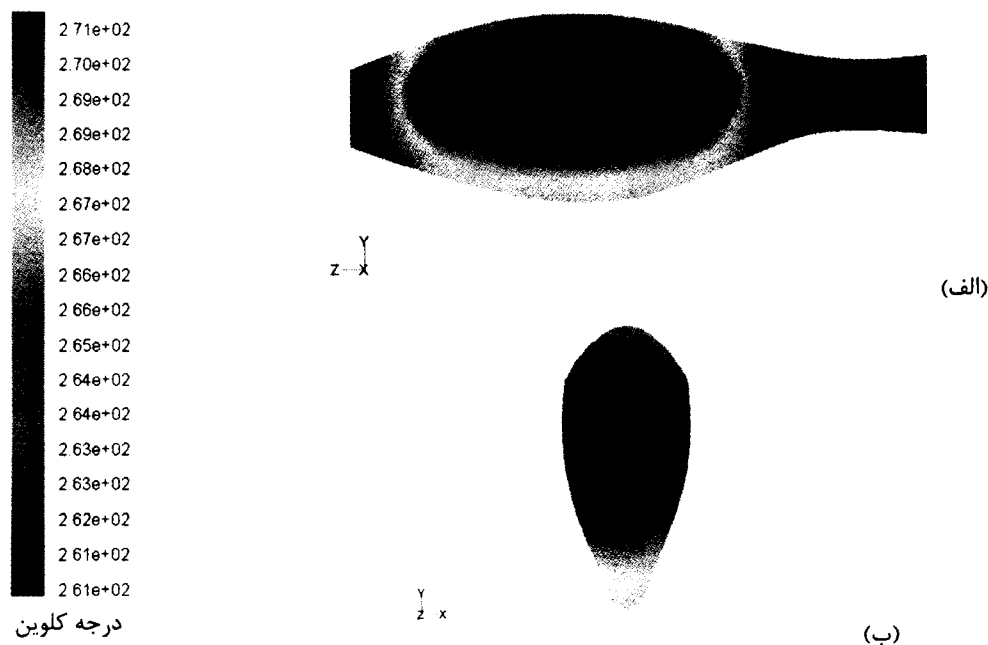
نتایج

و نتایج آن با حل سه بعدی در نمودار ۲ مقایسه شده است. نکته مهم در حل دوبعدی آن است که برش مورد نظر باید به گونه‌ای باشد که نتایج حل دوبعدی و سه‌بعدی ماهی بر هم منطبق شوند. بررسی‌های بعمل آمده نشان می‌دهد که بهترین برش، برش عرضی در پهن‌ترین قسمت ماهی می‌باشد (شکل ۴-ب).

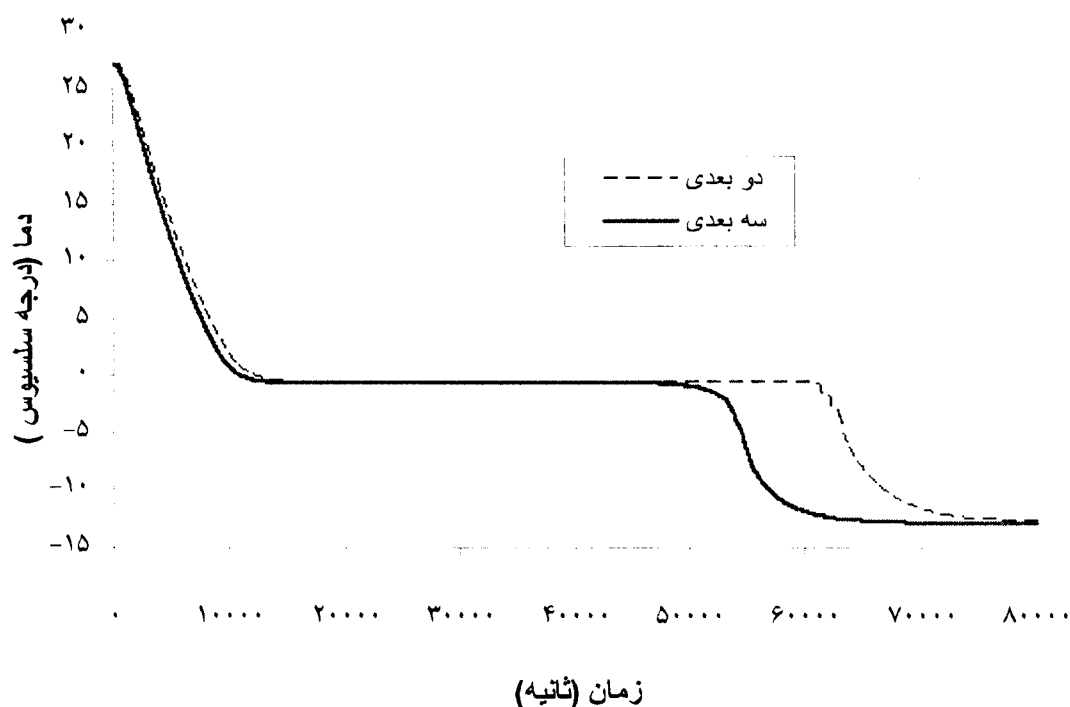
با توجه به نمودار ۲، حداکثر اختلاف دو مدل در برآورد توزیع دما حدود ۱۶ درصد است که مربوط به قسمت انجماد می‌شود. روند کاهش دما در وضعیت قبل از انجماد و بعد از انجماد تطابق بسیار مطلوبی دارد. لذا با توجه به اینکه مدل دوبعدی از نظر زمان حل، بسیار کم‌هزینه‌تر از مدل سه بعدی بود و تطابق قابل قبولی بین حل سه‌بعدی و دوبعدی مشاهده می‌شود، بررسی عوامل موثر بر زمان انجماد می‌تواند بر طبق حل دوبعدی صورت بگیرد.

در ابتدا ماهی بصورت سه بعدی مدل شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند انجماد ماهی به روش غوطه‌وری در آب نمک ۱۲- درجه سانتیگراد به غلظت ۸۰ گرم در لیتر ارائه شده است. توزیع دما داخل ماهی، در یک زمان خاص و برای یک برش عرضی و طولی ماهی در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به شکل، نفوذ تدریجی لایه‌های سرد به داخل ماهی کاملاً مشهود است. آنچنانکه مشاهده می‌شود مناطق ابتدایی و انتهایی ماهی بدلیل ضخامت کم زودتر حرارت خود را از دست می‌دهند و به سرعت منجمد می‌شوند. اما در پهن‌ترین قسمت، انجماد ماهی به کندی صورت گرفته است.

الف- مقایسه مدل سه‌بعدی و مدل دوبعدی: از آنجایی که حل سه بعدی ماهی با خواص متغیر بسیار زمان‌بر است، لذا جهت صرفه‌جویی در زمان، حل دو بعدی ماهی نیز انجام گرفته



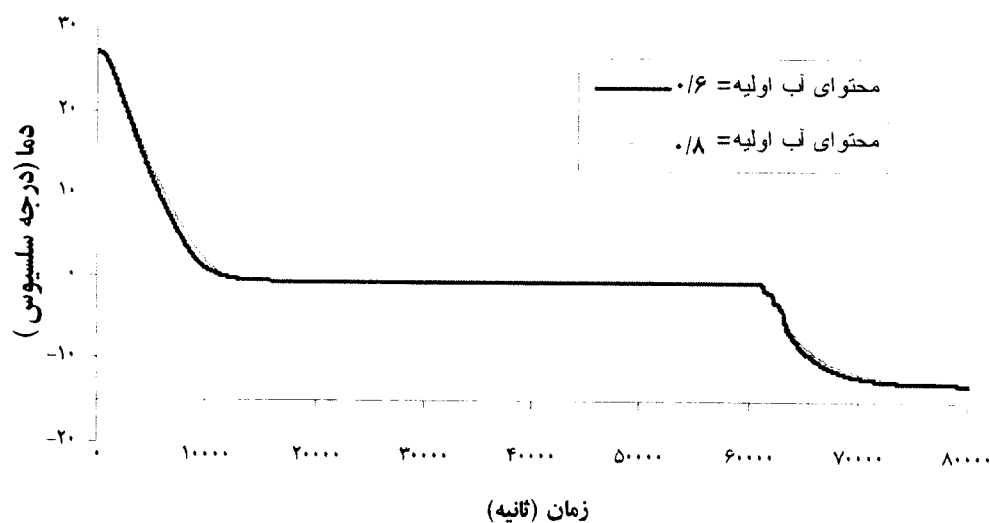
شکل ۴: توزیع دما داخل ماهی، ۴۰۰۰۰ ثانیه پس از شروع انجماد به روش غوطه‌وری
الف) در مقطع طولی ب) در مقطع عرضی



نمودار ۲: مقایسه زمان انجماد به روش غوطه‌وری در مدل‌سازی سه‌بعدی و دوبعدی برای دمای مرکز ماهی

می‌کند. بیشترین اختلاف، در درجه حرارت حدود ۵ درجه سلسیوس بود که ماهی با محتوای آب اولیه ۰/۱۶ حدود ۶۶۰ ثانیه زودتر نسبت به ماهی با محتوای آب اولیه ۰/۸ به این دما می‌رسد. با این وجود براساس نتایج بدست آمده، می‌توان از اثر محتوای آب اولیه بر زمان انجماد چشم‌پوشی نمود.

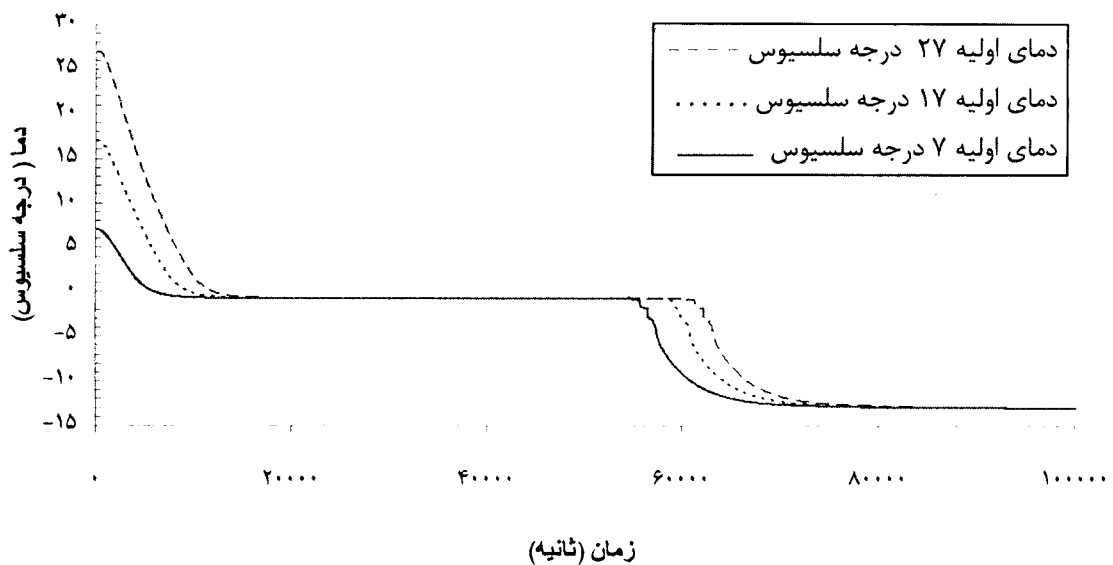
ب- بررسی عوامل موثر بر انجماد ماهی: همانطور که در روابط (۳) تا (۶) نشان داده شده محتوای آب اولیه ماهی بر خواص ماهی اثرگذار است. نمودار ۳ زمان انجماد ماهی در آب نمک ۱۲- درجه سانتیگراد، را با دو محتوای آب اولیه مختلف ۰/۱۶ و ۰/۸ (۶۰ و ۸۰ درصد وزن ماهی) نشان می‌دهد. ماهی با محتوای آب اولیه کمتر، اندکی زودتر فرآیند انجماد را طی



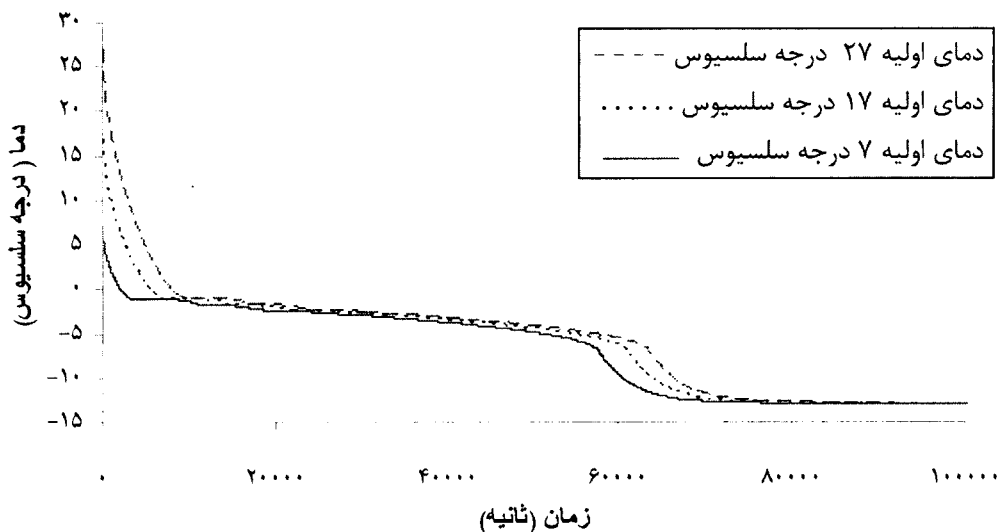
نمودار ۳: مقایسه توزیع دمای مرکز ماهی برای انجماد به روش غوطه‌وری با دو مقدار رطوبت اولیه مختلف ۰/۱۶ و ۰/۸ Y_0

اثر دمای اولیه بر انجماد ماهی را می‌توان با توجه به کسر جرمی آب یخ نزده نیز بررسی نمود. با توجه به نمودار ۶ هر چه دمای اولیه ماهی پایین‌تر باشد، کسر جرمی آب یخ نزده با سرعت بیشتری کم می‌شود. به طوری که کل ماهی با دمای اولیه ۲۷ درجه سلسیوس تا زمان ۶۳۱۴۰ ثانیه، با دمای اولیه ۱۷ درجه سلسیوس تا زمان ۶۰۴۸۰ ثانیه و با دمای اولیه ۷ درجه سلسیوس تا زمان ۵۷۶۴۰ ثانیه منجمد می‌شود. یعنی کاهش دمای اولیه تا ۲۰ درجه، باعث کاهش زمان انجماد تا حدود ۵۵۰۰ ثانیه می‌گردد.

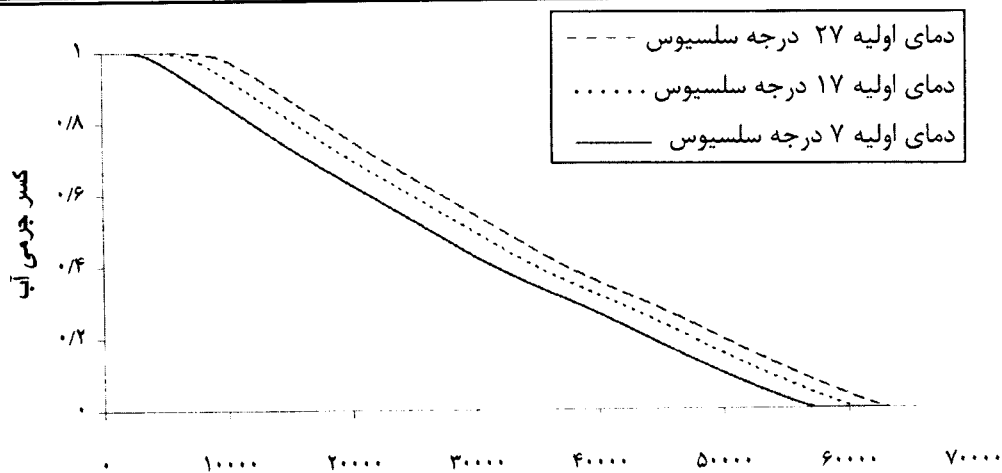
از دیگر عوامل موثر بر زمان انجماد، دمای اولیه ماهی می‌باشد. در نمودارهای ۴ و ۵ دمای مرکز ماهی و میانگین دمای سطح ماهی در طول فرآیند انجماد، برای سه دمای اولیه مختلف بررسی شده است. با توجه به نمودار ۴، انجماد مرکز ماهی برای دمای اولیه ۷ درجه سلسیوس حدود ۵۶۳۸ ثانیه، و برای دمای اولیه ۱۷ درجه حدود ۲۳۱۸ ثانیه نسبت به ماهی با دمای اولیه ۲۷ درجه سلسیوس سریعتر رخ داده است.



نمودار ۴: دمای مرکز ماهی در طول فرآیند انجماد به روش غوطه‌وری، برای سه دمای اولیه مختلف



نمودار ۵: دمای میانگین سطح ماهی در طول فرآیند انجماد به روش غوطه‌وری، برای سه دمای اولیه مختلف



زمان (ثانیه)

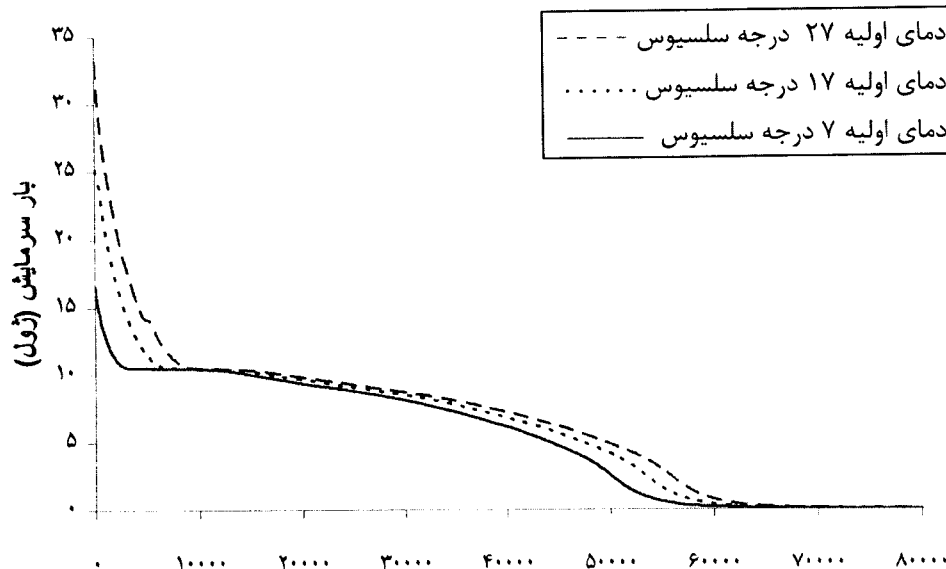
نمودار ۶: کسر جرمی آب یخ نزده در طول فرآیند انجماد ماهی به روش غوطه‌وری

طبق رابطه ۱۱ مقدار حرارت تبادل شده با محیط ۵۱۲۰۰۰ ژول محاسبه می‌شود. مقدار اختلاف در کمیت محاسبه شده از دو روش حدود ۳ درصد است.

مقایسه بار سرمایش لازم برای دمای‌های اولیه مختلف نشان می‌دهد (سطح زیر منحنی) که مقدار بار سرمایش لازم جهت انجماد، برای دمای اولیه ۱۷ درجه سلسیوس، ۴۸۰۸۳۹ ژول و برای دمای اولیه ۷ درجه سلسیوس، ۴۲۳۹۹۷ ژول حاصل می‌شود. لذا با توجه به موارد مذکور کاهش دمای اولیه به اندازه ۲۰ درجه، باعث صرفه‌جویی در بار سرمایش به اندازه ۱۰۳۷۴۸ ژول (حدود ۲۰ درصد) است که قابل توجه می‌باشد.

میزان حرارت تبادل شده با محیط هنگام انجماد ماده غذایی برای دمای اولیه مختلف در نمودار ۷ بررسی شده است. سطح زیر منحنی در این نمودارها بیانگر میزان بار سرمایش لازم جهت انجماد ماهی است. آنچه‌آنکه از نمودارها ملاحظه می‌شود با کاهش دمای اولیه، سطح زیر نمودار و در نتیجه بار سرمایشی لازم جهت انجماد کاهش می‌یابد. سطح زیر منحنی یعنی حرارت تبادل شده با محیط برای منحنی انجماد با دمای اولیه ۲۷ درجه سلسیوس برابر ۵۲۷۷۴۵ ژول بدست آمده است. مقدار واقعی این کمیت را می‌توان از معادله ۱۱ محاسبه نمود.

$$Q = mC_p\Delta T + mL_f \quad (11)$$

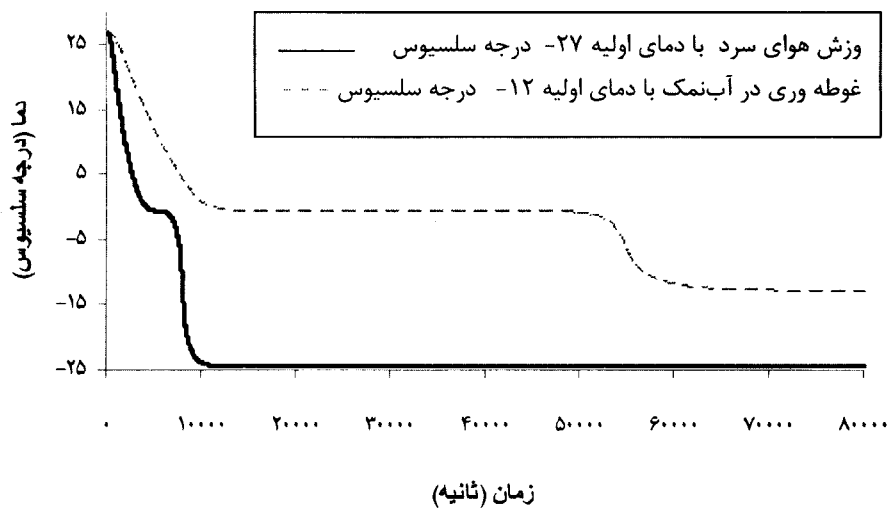


زمان (ثانیه)

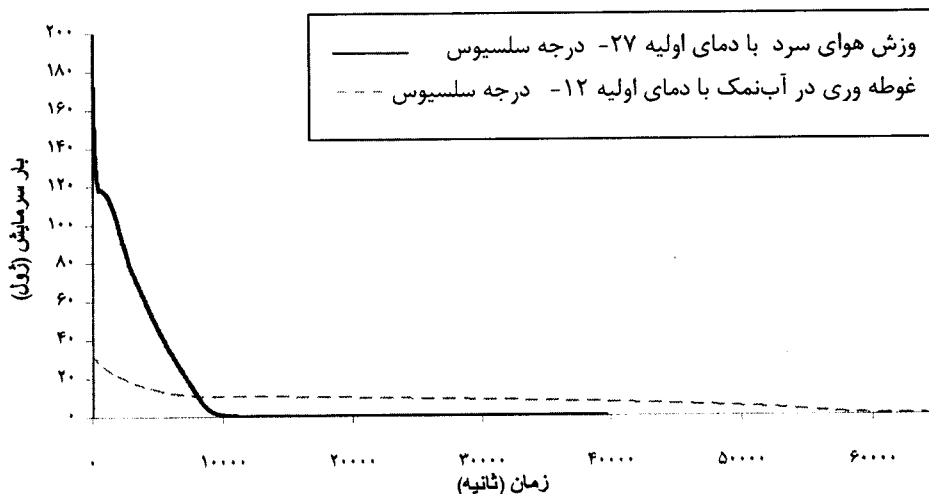
نمودار ۷: بار سرمایش لازم برای انجماد ماهی به روش غوطه‌وریدر طول دوره سرمایش

با توجه به نمودار ۹، نرخ انتقال حرارت از ماهی ضمن انجماد با سیال خنک کننده هوا بسیار سریعتر از سرمایش آب نمک است. انتقال حرارت در منطقه قبل از انجماد (I) براساس نمودارهای فوق به سرعت رخ می‌دهد. لذا می‌توان ابتدا ماهی را به روش غوطه‌وری تا دمای انجماد سرد کرده و سپس در معرض وزش هوای سرد جهت تکمیل فرآیند انجماد قرار داد. نمودار ۱۰، نتایج شبیه‌سازی این روش ترکیبی را نشان می‌دهد.

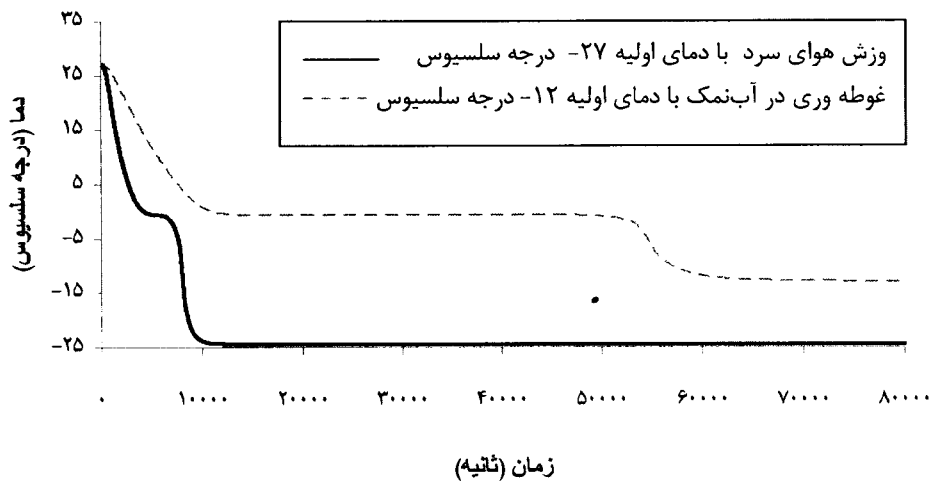
ج- انجماد به روش وزش هوای سرد: یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار بر زمان انجماد ماهی استفاده از جریان هوای سرد جهت انجماد می‌باشد. در نمودار ۸، زمان انجماد ماهی در حضور سیال خنک‌کننده هوا با غوطه‌وری در آب نمک مقایسه شده است. براساس مطالبی که قبلاً گفته شد، با توجه به انتقال حرارت جابجایی طبیعی از سطح ماهی در محفظه آب نمک، ضریب جابجایی، برابر ۱۰ وات بر مترمربع درجه کلون در نظر گرفته شد. از طرفی هنگامی که از وزش هوا سرد استفاده می‌شود، با توجه به انتقال حرارت جابجایی اجباری از سطح ماهی طبق رابطه (۸) مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری آن در حضور سیال هوای سرد با سرعت یک متر بر ثانیه، برابر ۶۵ وات بر مترمربع درجه کلون بدست می‌آید.



نمودار ۸: مقایسه توزیع دمای مرکز ماهی در انجماد با وزش هوای سرد و غوطه‌وری در آب نمک



نمودار ۹: بار سرمایش لازم برای انجماد ماهی در طول دوره سرمایش هنگام انجماد با وزش هوای سرد و غوطه‌وری در آب نمک



نمودار ۱۰: دمای مرکز ماهی در انجماد با روش ترکیبی وزش هوای سرد و غوطه‌وری در آب نمک

بحث

گوشت، کاهش بار حرارتی لازم برای انجماد در سردخانه و کاهش تغییرات دمایی داخل بدن ماهی می‌گردد. لازم به ذکر است طراحی مناسب تانک از نظر ظرفیت و قدرت انجماد باعث بهبود راندمان اقتصادی نیز خواهد گشت.

کیفیت ماهی و همچنین سایر غذاهای دریایی بطور مستقیم به زمان و دمای انجماد وابسته است. اطلاع از عوامل موثر بر تغییرات دما در طول زمان انجماد، امکان تخمین نرخ انجماد و درک و فهم بهتر برای بهبود عملکرد انجماد را میسر می‌سازد. بررسی عوامل مختلف در این تحقیق نشان می‌دهد که کاهش محتوای آب اولیه باعث کاهش زمان انجماد به مقدار خیلی اندک می‌شود. اما کاهش دمای اولیه ماهی تاثیر چشمگیری بر کاهش زمان انجماد و بار سرمایشی دارد. همچنین با توجه به نتایج، سرمایش با هوای سرد بسیار سریع‌تر از سرمایش با آب نمک صورت می‌گیرد. مشاهده می‌شود که ضریب انتقال حرارت در حضور سیال هوای سرد ۶/۵ برابر ضریب انتقال حرارت در حضور سیال آب نمک است. از طرفی دمای سیال خنک کننده برای هوای سرد -۲۷- درجه سلسیوس و برای آب نمک حدود -۱۲- درجه سلسیوس منظور شده است (Kolbe et al., 2004). واضح است با افزایش اختلاف دمای سیال خنک کننده و دمای اولیه ماهی نرخ انجماد افزایش خواهد یافت. در مجموع مدت زمان انجماد در هوای سرد ۶/۵ برابر کمتر از روش غوطه‌وری می‌باشد. اختلاف در طول ناحیه انجماد دما ثابت با توجه به شکلها در دو روش مورد بررسی کاملاً مشهود است.

بنابر موارد مذکور، به دلیل کم هزینه بودن سرمایش با آب نمک و از طرفی تسریع انجماد با هوای سرد، ترکیبی از دو روش جهت انجماد استفاده شود. یعنی ابتدا ماهی با غوطه‌وری تا دمای

تغییرات کیفیت ماهی در مدت زمان بین صید و انجماد مورد بررسی محققین مختلف قرار گرفته است. این تغییرات عموماً در ساعات اولیه بعد از صید ماهی ایجاد می‌شود. زیرا در حالت عادی دمای بدن ماهی بیشتر از دمای آب محل صید است. علاوه بر این در ضمن صید و مرگ ماهی این دما افزایش بیشتری می‌یابد. دمای بیشتر باعث افزایش سرعت تخریب سلولها و بافتهای ماهی بوسیله آنزیمهای ترشح شده (autolytic breakdown) و در نتیجه کاهش کیفیت ماهی می‌گردد (Kolbe, 1990).

از طرفی نگرانی‌هایی در مورد تشکیل سم $C_5H_9N_3$ (هیستامین) در ماهیهایی نظیر ماهی آزاد وجود دارد. طبق گزارشات صورت گرفته بهترین راه جلوگیری از تشکیل انجماد ماهی پس از صید می‌باشد. جهت جلوگیری از تشکیل سم، دمای داخلی ماهی تا ۶ ساعت پس از مرگ باید به زیر ۱۰ درجه سانتیگراد برسد. کاهش دما از ۱۰ درجه سانتیگراد تا نقطه انجماد، بدون آسیب رسیدن به محصول می‌تواند تا ۱۸ ساعت طول بکشد (Food and Drug Administration (FDA), 1996).

نتایج ارائه شده در تحقیق حاضر نشان می‌دهد پس از گذشت حدود ۲ ساعت از غوطه‌وری در آب نمک -۱۲- درجه سانتیگراد دمای ماهی از مقدار اولیه ۲۷ درجه سانتیگراد به حدود ۱۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. در نتیجه با توجه به امکان افزایش این زمان تا ۶ ساعت، برای دماهای بالاتر محلول آب نمک، نگرانی از تشکیل سم هیستامین وجود ندارد.

با توجه به نتایج این تحقیق، استفاده از روش غوطه‌وری در محلول آب نمک باعث کاهش سریع دمای ماهی، افزایش کیفیت

- Kolbe E., 1990.** Refrigeration energy prediction for flooded tanks on fishing vessels. *Applied Engineering in Agriculture*, 6:624-628.
- Kolbe E., Craven C., Sylvia G. and Morrissey M., 2004.** Chilling and freezing guidelines to maintain onboard quality and safety of Albacore tuna,. *Special Report 1006*, pp.1-25.
- Moraga N.O. and Barraza H.G., 2002.** Prediction heat conduction during solidification of food inside a freezer due to natural convection. *Journal of Food Engineering*, 56:17-26.
- Moraga N.O. and Medina E.E., 2000.** Conjugate forced convection and heat conduction with freezing of water content in a plate shaped food. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43:53-67.
- Patankar V., 1980.** Numerical heat transfer and fluid flow. Washington, DC, Hemisphere Publishing Corp, 210P.
- Plank R., 1913.** Die gefrierdauer von eisblocken. *Zeitschrift fur die gesamte. Kalte-Industrie*, 20:109-114.
- Remy J., 1987.** Modern freezing facilities. *International Journal of Refrigeration*, 10:165-174.
- Salvadori V. O., de Michelis A. and Mascheroni R.H., 1997.** Prediction of freezing times for regular multi-dimensional foods using simple formulae. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 30:30-35.
- Tocci A.M. and Mascheroni R.H., 1995.** Heat and mass transfer coefficients during the refrigeration, freezing and storage of meats, meat products and analogues. *Journal of Food Engineering*, 26:147-160.
- Wang Z., Wu H. and Zhao G., 2007.** One dimensional finite difference modeling on temperature history and freezing time of individual food. *Journal of Food Engineering*, 79:502-510.
- انجماد سرد شده و سپس ادامه فرآیند انجماد با وزش هوای سرد انجام گیرد. با این روش ترکیبی، مدت زمان انجماد نسبت به روش غوطه‌وری از حدود ۶۵۰۰۰ ثانیه به حدود ۲۰۰۰۰ ثانیه کاهش یافته است. این روش ترکیبی باعث حفظ کیفیت ماهی در ضمن انتقال، صرفه‌جویی در بار سرمایشی لازم جهت انجماد و در نتیجه کوچک شدن حجم تاسیسات سرمایشی می‌شود.

منابع

- Agnelli M.E. and Mascheroni R.H., 2001.** Cryomechanical freezing. A model for the heat transfer process, *Journal of Food Engineering*, 47:263-270.
- Ansari F.A., 1999.** Finite difference solution of heat and mass transfer problems related to pre-cooling of food. *Energy Conversion and Management*, 40:795-802.
- ASHRAE Refrigeration Handbook (SI), 2002.** Chapter 8, Thermal Properties of Foods.
- De Qian W. and Kolbe E., 1994.** Analysis of food block freezing using a P-C based finite element package. *Journal of Food Engineering*, 21:521-530.
- Delgado A.E. and Sun D.W., 2001.** Heat and mass transfer models for predicting freezing processes. A review, *Journal of Food Engineering*, 47:157-174.
- Food and Drug Administration (FDA), 1996.** Fish and Fishery Products Hazards and Controls Guide. First Edition. FDA, Washington, D.C., USA.
- Hamdami N., Monteau J. and Bail A., 2004.** Simulation of coupled heat and mass transfer during freezing of a porous humid matrix. *International Journal of Refrigeration*, 27:595-603.
- Hu Z. and Sun D.W., 2001.** Prediction local surface heat transfer coefficient by different turbulent k-ε models to simulate heat and moisture transfer during air-blast chilling. *International Journal of Refrigeration*, 24: 702-717.

Numerical simulation of fish freezing process by Immersion Cooling and Cold Air Blasting Methods

Teymourtash A.R.*; Javadi S.M. and Ebrahimnia Bajestan E.

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, P.O.Box: 91775-1111
Mashhad, Iran

Received: December 2007

Accepted: October 2009

Keywords: Fish Freezing, Temperature, Bio-informatics

Abstract

A three dimensional simulation of cooling and freezing process of fish as a complex geometry is presented. The 3d geometry of the fish was produced by digitizing and the thermo-physical properties of the fish were considered as functions of temperature and water content of the fish. Heating loads and product temperatures during chilling, freezing and post cooling processes for immersion cooling method in brine and for cold air blasting method were predicted. The influence of effective parameters such as initial temperature and fish water content are also investigated on processing time. Because of the slow freezing rate in immersion cooling technique, the results show that the initial temperature of fish highly affects freezing time. We suggest that a combination of immersion and cold air blasting methods will decrease the freezing time in comparison with immersion method when solely applied. Comparison of temperature distribution in present study shows a good agreement with other numerical and experimental results.

* Corresponding author: Teymourtash@um.ac.ir