

## مدل سازی پدیده‌های درگیر در رسیدن پنیر سفید تولید شده به روش فراپالایش پس از نمک پاشی

مولود نورانی\*، ناصر همدی<sup>۲</sup>، علی نصیرپور<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری علوم و صنایع غذایی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲، ۳. استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۲۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۸/۲۱)

### چکیده

مرحله رسیدن پنیر از مراحل مهم در تولید آن است. در این تحقیق فرایند رسیدن پنیر سفید تهیه شده به روش فراپالایش (UF) عمده ترین پنیر صنعتی تولیدی در کشور از نظر انتقال جرم، حرارت، و تغییرات خصوصیات کیفی و ویژگی‌های حسی به طور جامع بررسی شده و مدلی ریاضی برای توصیف آنها ارائه شده است. بدین منظور پس از اندازه گیری شاخص‌های لیپولیز، پروتئولیز، بافت، و ویژگی‌های حسی، مدل سینتیکی مناسب برای توصیف تغییرات این شاخص‌ها تعیین شد و با مدل انتقال حرارت موجود و با به دست آوردن رابطه عدد اسیدی با طعم و بافت دارای ازت غیر پروتئینی، مدل ریاضی جامعی برای توصیف هم‌زمان این رویدادها شرح و بسط داده شد: انتقال غیر هم‌جهت آب و نمک با قانون دوم فیک، انتقال حرارت با استفاده از قانون دوم فوریه، تغییرات ویژگی‌های کیفی به عنوان تابعی از عوامل درونی و بیرونی در حین رسیدگی، و نمک زنی با استفاده از نرم افزار متلب. به کمک روابط مذکور می‌توان تغییرات شاخص‌های لیپولیز، پروتئولیز، بافت، و ویژگی‌های حسی، نمک، رطوبت، و دما را پیش بینی کرد. مقایسه نتایج حاصل از مدل با داده‌های اندازه گیری شده همبستگی بالای بین این مقادیر را نشان می‌دهد.

**کلیدواژگان:** انتقال جرم، انتقال حرارت، پروتئولیز، لیپولیز، مدل ریاضی.

### مقدمه

پنیر فراورده‌ای است متشکل از چربی و پروتئین شیر به همراه کلسیم و فسفر که به صورت‌های متفاوت با پروتئین شیر ترکیب شده‌اند. پنیر افزون بر ترکیبات مذکور مقادیر کمی از اجزای تشکیل دهنده شیر چون نمک‌های معدنی محلول و مواد ازته غیر پروتئینی را دارد (Mortazavi et al., 1995). یکی از انواع پنیرهای تولیدی در دنیا پنیر فتا است که در گروه پنیرهای نرم یا نیمه سخت قرار می‌گیرد (Afshar, 2004). تولید پنیر فتا به دو روش سنتی و فراپالایش انجام می‌شود. سیستم فراپالایش افزون بر حفظ پروتئین‌های آب پنیر، باعث افزایش راندمان پنیرسازی، افزایش ارزش تغذیه‌ای، و صرفه جویی در هزینه‌های انرژی و نیروی انسانی می‌شود. با این حال حضور پروتئین‌های آب پنیر موجب کندرسیدن، عطر و طعم ضعیف، و بافت نرم می‌گردد. بنابراین لازم است با بهینه کردن عوامل مؤثر در رسیدن پنیر، پنیری با کیفیت مطلوب به دست آورد (Alborzi, 2001). در طول دوره رسیدن، لخته نرم و کم عطر و طعم، به پنیری رسیده با عطر، طعم، و بافت مطلوب تبدیل می‌شود. این

فرایند شامل واکنش‌های پیچیده بیوشیمیایی است که به سه گروه پروتئولیز، لیپولیز، و گلیکولیز طبقه بندی می‌شوند. عوامل بسیاری بر سرعت واکنش‌های مذکور تأثیر می‌گذارند که از مهم ترین آنها می‌توان به دما و غلظت نمک اشاره کرد که به دلیل تأثیر بر  $a_w$ ، فعالیت میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌ها، و به تبع آن تغییر pH، شدت لیپولیز و پروتئولیز، خواص حسی محصول نهایی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. پدیده‌های غالب درگیر در رسیدن پنیر و مؤثر در کیفیت آن را می‌توان در سه گروه الف) انتقال حرارت، ب) انتقال جرم (آب و نمک؛ و ج) واکنش‌های بیوشیمیایی (پروتئولیز و لیپولیز) پروتئولیز طبقه بندی کرد

### انتقال حرارت

انتقال حرارت به روش‌های هدایت، جابه جایی، و تشعشع صورت می‌گیرد و مقدار آن با اختلاف دما نسبت مستقیم و با مقاومت موجود در جهت جریان نسبت عکس دارد (Chalkesh Amiri, 1996; Incorpera & Dewitt, 1996; Ozisik, 1994). در زمینه انتقال حرارت در پنیر مطالعات کمی صورت گرفته است که می‌توان به تحقیقات Pajonk et al. (2003) اشاره کرد. در این پژوهش ابتدا هدایت حرارتی، نفوذ یا انتشار حرارتی، و گرمای ویژه پنیر امنتال با روش‌های سیم داغ (Hot wire method)،

\* نویسنده مسئول: m.noorani@ag.iut.ac.ir

## واکنش‌های بیوشیمیایی (پروتئولیز و لیپولیز)

پروتئولیز در پنیر به دو صورت پروتئولیز اولیه و ثانویه اتفاق می‌افتد که پروتئولیز اولیه ناشی از فعالیت کواگولانت باقیمانده، پلاسمین، و کاتپسین D است در حالی که در پروتئولیز ثانویه میکروارگانیسم‌های آغازگر و غیر آغازگر مؤثرند. در پنیر UF پروتئولیز به آهستگی اتفاق می‌افتد و در طی آن آمینواسیدهایی تولید می‌شوند که در توسعه بافت و طعم اثرگذارند (Hesari *et al.*, 2006). در اغلب وارینه‌های پنیر، لیپولیز نسبتاً کمی در طول رسیدن اتفاق می‌افتد که نامطلوب در نظر گرفته می‌شود. تعادل اسیدهای چرب با محصولات پروتئولیز و سایر واکنش‌ها نقش مثبتی در ایجاد طعم مطلوب دارد. اسیدهای چرب با وزن مولکولی بالا عطر و طعم ضعیفی دارند. اکثر تغییرات لیپولیتیک در پنیر سفید آب‌نمکی در ۱۵ تا ۳۰ روز اول نگهداری اتفاق می‌افتد که کاملاً مطابق با حداکثر رشد باکتری‌هاست. مقدار لیپولیز در پنیرهای UF کمتر از پنیرهای معمولی است (Bech, 1993). پنیر UF در مقایسه با پنیر سنتی آهسته‌تر می‌رسد، زیرا بتالاکتوگلوبولین (پروتئین آب پنیر)، از فعالیت پلاسمین جلوگیری و تبدیل بتاکازئین به گاما‌کازئین و پروتئوزپتون را متوقف می‌کند (Karami *et al.*, 2009).

روابط سینتیک واکنش‌های شیمیایی، ارتباط بین سرعت از بین رفتن واکنش‌دهنده‌ها یا تولید محصولات و غلظت مواد را در هر زمان تعیین می‌کند. به‌منظور طبقه‌بندی معادلات سرعت واکنش، از کلمه مرتبه استفاده می‌شود که عبارت‌اند از مجموع توان‌هایی که در جمله‌های غلظت در شکل دیفرانسیلی معادله سرعت واکنش دیده می‌شوند. در ادامه، معادلات واکنش‌های مرتبه صفر، اول، و آنزیمی ممانعتی دیده می‌شود.

(رابطه ۱)

$$[C] - (C_0) = Kt - Kt_0 \quad \text{واکنش مرتبه صفر}$$

(رابطه ۲)

$$\ln(C) - \ln(C_0) = Kt - Kt_0 \quad \text{واکنش مرتبه یک}$$

(رابطه ۳) واکنش آنزیمی ممانعتی

$$\ln\left(1 - \frac{C}{C_{\max}}\right) = Kt$$

در اکثر واکنش‌های آنزیمی با پیشرفت واکنش، محصول تولیدی می‌تواند برای اشغال جایگاه فعال آنزیم با سوبسترا رقابت کند، به همین دلیل این واکنش‌ها از نوع ممانعتی‌اند (Toledo, 1991). عموماً از رابطه آرنیوس برای تعیین وابستگی دمایی واکنش‌ها استفاده می‌شود:

روش فلاش (method Flash)، و کالریمتر اسکنی تفرقی (Differential Scanning Calorimetry (DSC)) تعیین شد و پس از مطالعه ضریب انتقال حرارت پنیر تحت رطوبت نسبی و سرعت حرکت هوای محیط نگهداری با روش سایکرومتری، پروفیل دما در پنیر با روش تفاضل محدود بررسی شد. مدل حاصل در دامنه دمایی ۵-۱۶°C به خوبی پروفیل دما در پنیر را پیش‌بینی می‌کند. در دماهای بالاتر از ۱۶°C به علت گرمای نهان ذوب چربی و با توجه به میزان بالای چربی در این پنیر مدل نمی‌تواند دما را پیش‌بینی کند.

## انتقال جرم

فرایند انتقال جرم به معنی انتقال یک یا چند ترکیب درون یک فاز و بین فازها به‌وسیله انتشار و جابه‌جایی طبیعی یا اجباری است (Simal *et al.*, 2001). نمک‌زنی پنیر از فرایندهایی است که طی آن انتقال جرم رخ می‌دهد و شامل حرکت غیر همسوی آب و نمک در نتیجه اختلاف فشار اسمزی بین فاز آبی پنیر و آب‌نمک است (Mulet, 1994). افزودن نمک در صنعت به سه روش عمده انجام می‌گیرد: الف) غوطه‌ورکردن پنیر در محلول غلیظ آب‌نمک، ب) افزودن نمک خشک روی سطح پنیر؛ ج) اختلاط نمک خشک با پنیر در انتهای فرایند تولید. نمک‌زنی پنیر سفید تهیه‌شده به‌روش فرایلاش (UF) در ایران بیشتر به‌روش نمک‌پاشی خشک انجام می‌شود. در این روش پس از مدتی به علت انتقال رطوبت از پنیر به‌سمت کریستال‌های نمک در اثر تفاوت فشار اسمزی، محلول اشباع نمک در سطح پنیر تشکیل می‌شود و به‌تدریج نفوذ نمک به درون پنیر شروع می‌شود (Guinee & Fox, 1987). انتقال جرم در مواد غذایی را می‌توان با قوانین فیک و با در نظر گرفتن ضریب انتشار مؤثر توصیف کرد (Boudhrioua *et al.*, 2003). از فاکتورهای مؤثر بر ضریب نفوذ می‌توان به دما و غلظت ترکیب مورد نظر اشاره کرد. ثابت در نظر گرفتن این ضریب موجب ایجاد خطا در نتایج مدل پیشنهادی خواهد شد. بنابراین با تعیین چگونگی تغییر ضریب نفوذ به‌عنوان تابعی از دما و غلظت، می‌توان دقت مدل استفاده‌شده برای انتقال جرم را افزایش داد (Geurts *et al.*, 1974). سالیان متمادی پژوهشگران گوناگونی به پدیده انتقال جرم در پنیرهای متفاوت پرداخته‌اند که برای مثال می‌توان از مطالعات انجام‌شده روی پنیر Fynbo (Zorrilla & Rubialo, 1994)، پنیر Curtirolo (Luna & Bressan, 1987)، پنیر Romano (Guinee & Fox, 1983)، پنیر Feta (Turhan & Kakalantunc, 1992)، پنیر Cheddar (Luna & Chavez, 1992)، پنیر Gouda (Messens *et al.*, 1999)، و پنیر Emmental (Pajonk *et al.*, 2003b) نام برد.

رسیدن پنیر سفید ایرانی انجام داده اند ولی در هیچ یک از این مطالعات همه فرایندها شامل پروتئولیز، لیپولیز، و انتقال جرم و حرارت به طور جامع بررسی نشده است. از این رو مطالعه تغییرات پنیر در طول رسیدن و پیشنهاد مدل ریاضی جامع برای بهینه سازی شرایط به منظور تولید محصولی با کیفیت بالا و یکنواخت در کارخانجات تولید این نوع پنیر در داخل کشور ضروری است. اهداف ما در این تحقیق عبارت بودند از: الف) توسعه مدل ریاضی برای توصیف انتقال حرارت و جرم (نمک و آب) در درون پنیر و پیش بینی تغییرات ایجاد شده روی خواص حسی پنیر فرآپالایش در اثر لیپولیز و پروتئولیز پس از نمک پاشی خشک؛ و ب) تأیید مدل توسعه داده شده به کمک مقایسه مقادیر اندازه گیری شده با داده های پیش بینی شده مدل.

### مواد و روش ها

#### توسعه مدل

در این مطالعه فرایند انتقال جرم در پنیر فرآپالایش به صورت یک بعدی و فرایند انتقال حرارت به صورت سه بعدی مطالعه شد. مدل سازی عددی انتقال حرارت در حالت سه بعدی، به دلیل تقارن حرارتی و شرایط مرزی یکسان برای  $\frac{1}{4}$  از کل بسته مکعب مستطیل شکل پنیر اعمال می شود (شکل ۱). برای ارتفاع بسته به دلیل شرایط مرزی متفاوت، تقارن وجود ندارد (در بخش فوقانی هوای اشباع و در بخش تحتانی لایه پلی پروپیلن).

$$K = K_o \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right) \quad (\text{رابطه ۴})$$

*Sihufe et al.* (2005) تأثیر دما و جایگزینی نسبی KCl

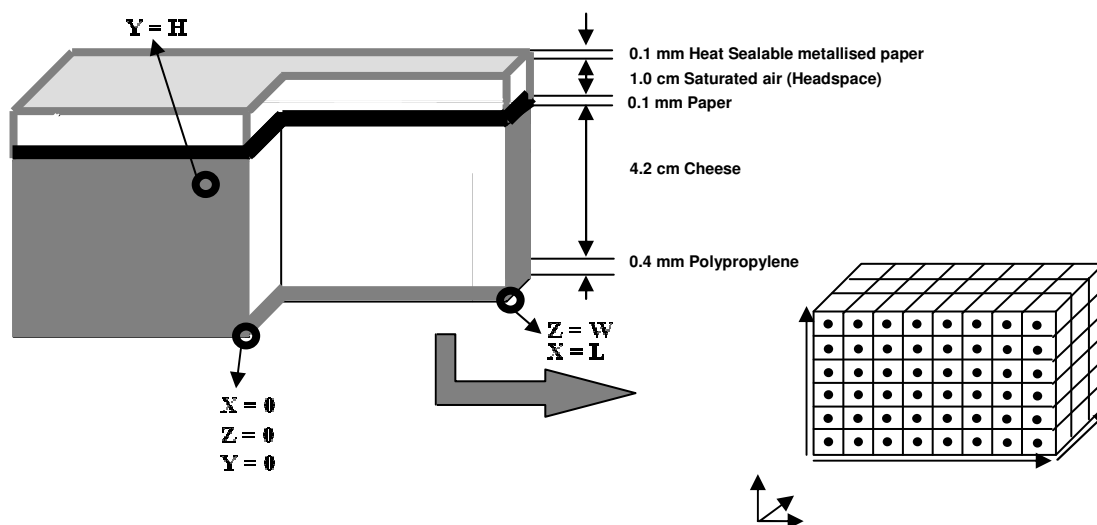
به جای NaCl را روی سینتیک تجزیه  $\beta$ -کازئین در پنیر فاینو مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که می توان این پدیده را با مدل سینتیکی درجه اول توضیح داد. ثابت های سینتیکی در محدوده  $0.004$  و  $0.018$  ( $\frac{1}{\text{روز}}$ ) قرار داشت (طی ۹۰ روز رساندن) و انرژی اکتیواسیون در محدوده دمایی  $5^{\circ}\text{C}$  -  $16^{\circ}\text{C}$  معادل با ۱۹ (کیلوکالری/گرم مول) برآورد گردید. *Folkertsma et al.* (1996) تأثیر ترکیب های متفاوت دما-زمان را روی پروتئولیز، لیپولیز، و پیشرفت طعم پنیر چدار مطالعه کردند و رساندن در  $12^{\circ}\text{C}$  را به عنوان بهترین دمای رساندن توصیه کردند.

مدل سازی یکی از تکنولوژی ها و علوم توسعه یافته در دنیای امروز است. مدل های به کاررفته در مواد غذایی، به دو گروه عمده مدل های بنیادی و تجربی تقسیم می شوند (*Irudayaraj, 2002; Tijksens et al., 2001*). مزیت شبیه سازی، جایگزین کردن آزمایش های عددی رایانه ای با مدل ایجاد شده به جای آزمایش های تجربی وقت گیر و پرهزینه است. شبیه سازی رایانه ای امکان اجرای آزمایش هایی را که در شرایط طبیعی انجام آن ها خیلی سخت و شاید غیر ممکن باشد، فراهم می سازد (*Alborzi, 2001*).

بررسی منابع نشان می دهد که گرچه *Karami et al.* (2009)

*Alizadeh et al.* (2006) و *Hesari et al.* (2006)

مطالعاتی در زمینه بررسی فرایندهای گوناگون درگیر در پدیده



شکل ۱. مش بندی و شبکه گره ها برای پنیر در حالت سه بعدی به منظور بررسی انتقال حرارت

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{T - T_{\infty}}{\frac{S}{k'} + \frac{1}{h} + \frac{\Delta z}{2k}} \quad \text{در } z=0 \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{T - T_{\infty}}{\frac{S}{k'} + \frac{1}{h} + \frac{\Delta y}{2k}} \quad \text{در } y=0 \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{T - T_{\infty}}{\frac{S'}{k''} + \frac{1}{h} + \frac{\Delta y}{2k}} \quad \text{در } y = H \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

(رابطه ۱۳) شرایط اولیه:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad \text{در } 0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq W, 0 \leq z \leq H$$

### انتقال جرم

بهمحض قرارگرفتن پنیر در معرض نمک خشک، نمک جذب رطوبت از پنیر را شروع و در سطح پنیر ایجاد محلول اشباع می‌کند. در این هنگام تبادل جرم در سطح پنیر (حد واسط محلول آب‌نمک و پنیر) رخ می‌دهد که شدت آن با توجه به ثابت‌بودن غلظت اجزا در محلول آب‌نمک عمدتاً به‌وسیله ضرایب تبادل جرم خارجی آب و نمک کنترل می‌گردد. سپس به تبع تبادل جرم در سطح، دیفوزیون یک‌بعدی غیر پایدار و همزمان آب و نمک در داخل پنیر رخ می‌دهد. آب از داخل پنیر به طرف سطح و نمک از سطح به درون پنیر نفوذ می‌کند. میزان نمک خشک موجود در سطح پنیر رفته‌رفته به‌دلیل نفوذ نمک به درون پنیر و نیز خروج آب از پنیر و حل‌شدن نمک در آن کاهش می‌یابد تا نهایتاً بلورهای نمک به اتمام می‌رسند. با اتمام بلورهای نمک در سطح پنیر، مرحله دوم انتقال جرم آغاز می‌شود. در این مرحله، پنیر در معرض محلول اشباع آب‌نمک قرار می‌گیرد و تبادل جرم در سطح پنیر (حد واسط محلول آب‌نمک و پنیر) و به تبع آن، دیفوزیون تک‌بعدی غیر پایدار و همزمان آب و نمک در داخل پنیر همچنان در جریان است. با ورود نمک به داخل پنیر و خروج آب از پنیر، محلول موجود در سطح پنیر از حالت اشباع خارج می‌شود و غلظت آن رفته‌رفته کاهش می‌یابد. انتقال جرم در این مرحله با ضرایب انتقال آب و نمک در پنیر و نیز ضرایب انتقال آب و نمک در محلول آب‌نمک موجود در سطح پنیر کنترل می‌شود. انتقال جرم (نمک و رطوبت) در داخل بافت پنیر تا رسیدن به تعادل کامل ادامه می‌یابد. معادلات استفاده‌شده برای توصیف انتقال رطوبت و نمک عبارت‌اند از:

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = \nabla D_w \nabla C_w \quad (\text{رابطه ۱۴}) \text{ معادلات اصلی}$$

فرضیات استفاده‌شده در توسعه مدل عبارت‌اند از: (۱) شکل هندسی پنیر، به‌صورت مکعب مستطیل است و تغییر حجم آن طی رسیدگی قابل صرف نظر کردن است، (۲) لایه آلومینیومی به‌عنوان عایق انتقال جرم در نظر گرفته شده، ولی اثر آن در انتقال حرارت به‌دلیل هدایت حرارتی بالا، صرف نظر شده است، (۳) از مقاومت حرارتی لایه نمک طی انتقال حرارت به‌دلیل ضخامت کم صرف نظر شده است، (۴) از مقاومت تماسی بین سطح پنیر و بسته صرف نظر شده است، (۵) ضریب انتقال حرارت در سطح (مابین بسته و هوا) ثابت و یکنواخت در نظر گرفته شده است، (۶) در حین گرم‌کردن خواص ترموفیزیکی و جرمی پنیر به‌جز هدایت حرارتی و ضریب دیفوزیون، ثابت فرض شده است، (۷) از حرارت تولیدی پنیر که به میکروارگانسیم‌ها و فرایند تخمیر ربط دارد صرف نظر می‌شود؛ و (۸) دما و غلظت آب و نمک در سرتاسر پنیر قبل از ورود آن به داخل محلول آب‌نمک یکنواخت و برابر با مقدار ثابتی است.

برای توصیف انتقال جرم (رطوبت و نمک) و حرارت ناپایا در پنیر به‌عنوان تابعی از مکان و زمان به‌ترتیب از قانون اول فیک و قانون اول فوریه استفاده شد (معادلات ۵ و ۶).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla(D \cdot \nabla(C)) \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\text{رابطه ۶})$$

### سیستم معادلات

#### انتقال حرارت

بهمحض قرارگرفتن بسته پنیر در معرض هوا، انتقال حرارت در همه ابعاد رخ می‌دهد. حرارت در سطح از طریق هدایت از لایه آلومینیومی، هوای اشباع از رطوبت و کاغذ روی سطح پنیر عبور می‌کند تا به سطح پنیر برسد و در پنیر انتقال یابد، در حالی که در اطراف و بخش تحتانی از لایه پلی‌پروپیلن عبور می‌کند. معادلات استفاده‌شده برای توصیف انتقال حرارت طی گرم یا سردکردن بسته پنیر عبارت‌اند از (Dalvi, 2007):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla k \nabla T \quad (\text{رابطه ۷}) \text{ معادله اصلی}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{در } x=0 \text{ و } z=w$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T - T_{\infty}}{\frac{S}{k'} + \frac{1}{h} + \frac{\Delta x}{2k}} \quad \text{در } x=L \quad (\text{رابطه ۹})$$

(رابطه ۱۵)

(رابطه ۲۱) شرایط اولیه:  $0 \leq y \leq H$

$$C_w = C_{w0} \quad (\text{رابطه ۲۲})$$

$$C_s = C_{s0}$$

در معادلات استفاده شده ضریب دیفوزیون نمک به صورت تابعی از غلظت نمک و دمای آب نمک گذاری مطابق روابط ۲۳ تا ۲۵ به دست آمد:

$$D_s = D_{0s} \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right) \quad (\text{رابطه ۲۳})$$

$$Ea = 69.197 \times C_s + 10794.323 \quad (\text{رابطه ۲۴})$$

$$D_{0s} = 8.4 \times 10^{-8} \times \exp(2.3 \times 10^{-2} C_s) \quad (\text{رابطه ۲۵})$$

معادلات اصلی انتقال حرارت و جرم با اعمال شرایط اولیه و مرزی به طور عددی و با روش تفاضل محدود بر مبنای شمای صریح (Explicit finite difference approach) با نرم افزار Matlab 6.5 حل گردیدند. در این مطالعه، بسته پنیر (به ابعاد  $11/2 \times 7/2 \times 4/2$  سانتیمتر) به ۱۲ گره در هر بعد تقسیم شد. پارامترها و خصوصیات ترموفیزیکی و جرمی به کار گرفته شده در مدل، در جدول های ۱ و ۲ آورده شده است.

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = \nabla D_s \nabla C_s$$

(رابطه ۱۶) شرایط مرزی (در مرحله اول): در  $y = H$

$$-D_w \frac{\partial C_w}{\partial y} = \frac{C_{ws}}{\frac{dy}{2 * D_w} + \frac{1}{k_w}}$$

(رابطه ۱۷)

$$-D_s \frac{\partial C_s}{\partial y} = \frac{C_{ss} - C_{sa}}{\frac{dy}{2 * D_s} + \frac{1}{k_s}}$$

(رابطه ۱۸) شرایط مرزی (در مرحله دوم): در  $y = H$

$$-D_w \frac{\partial C_w}{\partial y} = \frac{C_{ws} - C_{wa}}{\frac{dy}{2 * D_w} + \frac{dy_a}{2 * D_{wa}}}$$

(رابطه ۱۹)

$$-D_s \frac{\partial C_s}{\partial y} = \frac{C_{ss} - C_{sa}}{\frac{dy}{2 * D_s} + \frac{dy_a}{2 * D_{sa}}}$$

$$\frac{\partial C_w}{\partial y} = \frac{\partial C_s}{\partial y} = 0 \quad \text{در } y = 0 \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

جدول ۱. ضرایب انتقال حرارت و جرم خارجی آب و نمک، و ضریب دیفوزیون آب استفاده شده در مدل (Rahmani, 2007)

ضریب انتقال جرم خارجی آب (متر/ثانیه)	ضریب انتقال جرم خارجی نمک (متر/ثانیه)	ضریب دیفوزیون آب (متر/مجدور ثانیه)	ضریب انتقال حرارت در سطح (وات/مترمربع کلوین)
$10^{-5}$	$10^{-6}$	$4/6 \times 10^{-10}$	۲۱

جدول ۲. پارامترها و شرایط به کار گرفته به عنوان ورودی مدل برای پیش بینی دما طی حرارت دهی

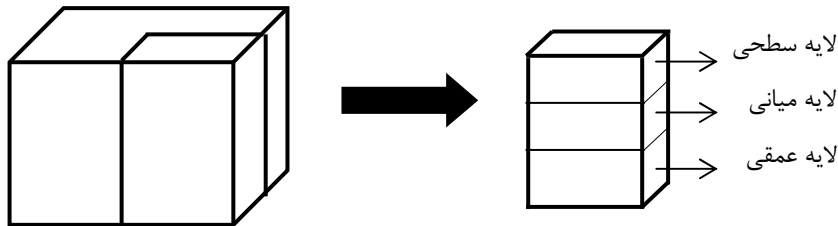
گام زمانی (ثانیه)	دمای اولیه (کلوین)	درجه حرارت محیط (کلوین)	مدت زمان حرارت دهی (ثانیه)
۱۰	۲۹۰/۱۵	۳۲۳/۱۵	۱۰۰۰۰

در  $pH=4/6$ ، به ۲۰ گرم پنیر به اندازه دو برابر آن آب مقطر اضافه شد و پس از اینکه با همزن مغناطیسی به مدت ۵ دقیقه هموژن گردید، pH آن با HCl در ۴/۶ تنظیم شد. بعد از ۳۰ دقیقه مجدداً pH در ۴/۶ تنظیم شد و یک ساعت داخل آن  $40^\circ C$  قرار گرفت. سپس نیم ساعت در ۳۰۰۰g سانتریفوژ شد و با کاغذ واتمن ۴۲ صاف گردید. میزان ازت عصاره با روش کلدال اندازه گیری شد. برای اندازه گیری ازت غیر پروتئینی، به عصاره به دست آمده از قسمت قبل، محلول تری کلرواستیک اسید با غلظت ۶۰ درصد اضافه گردید تا به غلظت ۱۲ درصد برسد. بعد از یک ساعت با کاغذ واتمن شماره ۴۲ صاف و میزان ازت آن با

سینتیک واکنش های بیوشیمیایی (پروتئولیز و لیپولیز) و تغییر خواص ارگانولپتیکی

نمونه برداری برای بررسی سینتیک واکنش های بیوشیمیایی و تغییر خواص ارگانولپتیکی، از  $\frac{1}{4}$  کل بسته پنیر، پس از تقسیم آن به سه لایه مطابق شکل ۲، در زمان های ۰، ۱، ۳، ۶، و ۱۰ هفته پس از گرمخانه گذاری در دماهای ۴ و ۲۰ درجه سلسیوس انجام شد. نسبت ازت محلول در  $pH=4/6$  به ازت کل، ازت غیر پروتئینی به ازت کل، و ازت محلول در  $pH=4/6$  به ازت محلول، به عنوان شاخص های پروتئولیز، و درجه اسیدی چربی به عنوان شاخص لیپولیز اندازه گیری شدند. برای اندازه گیری ازت محلول

گردید. سرعت پروب ۱۰۰ میلیمتر بر دقیقه بود. از نمودار به دست آمده حداکثر نیرو محاسبه شد و با تقسیم مقدار آن به سطح مقطع نمونه، حداکثر نیروی لازم برای شکست تعیین گردید (Berg, 2008). همه آزمایش‌ها در ۳ تکرار صورت گرفت. ارزیابی حسی با تست مقایسه‌ای انجام شد. به این ترتیب که نمونه‌های پنیر بعد از گذشت مقاطع زمانی مخصوص به ارزیاب‌ها ارائه شدند و از آنها خواسته شد براساس میزان مطلوبیت از نظر ظاهر، بافت، طعم، بو، و مقبولیت کلی نمونه‌ها را ارزیابی کنند (Meilgaard et al., 2007). تجزیه آماری شاخص‌های پروتئولیز، لیپولیز، و بافت به صورت اسپلیت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی و تجزیه آماری آزمون ارزیابی حسی به صورت فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با نرم‌افزار SAS انجام شد. از آزمون LSD نیز در صورت معنی‌دار بودن مقدار F برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد.



شکل ۲. تقسیم‌بندی پنیر به لایه‌های گوناگون به منظور اندازه‌گیری شاخص‌های پروتئولیز، لیپولیز، و خواص ارگانولپتیکی

توصیف سینتیک واکنش‌های بیوشیمیایی انتخاب شد. با توجه به ریشه میانگین مربعات خطا و ضرایب همبستگی محاسبه شده (جدول ۳)، برای شاخص‌های پروتئولیز داده‌های حاصل از مدل درجه صفر و برای شاخص لیپولیز داده‌های حاصل از مدل ممانعتی مطابقت بیشتری با داده‌های آزمایشگاهی دارند. بنابراین برای توصیف تغییرات شاخص‌های پروتئولیز و لیپولیز به ترتیب، مدل درجه صفر و مدل ممانعتی انتخاب گردید.

روش کلدال اندازه‌گیری شد (Kuchroo & Fox, 1982). برای اندازه‌گیری میزان ازت کل نیز از روش کلدال استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری درجه اسیدی چربی پنیر، ۱۰ گرم پنیر در حضور ۶ گرم سولفات سدیم بی‌آب، کاملاً خرد شد و با ۶۰ میلی‌لیتر دی‌اتیل‌اتر به ارلن مایر در پیچ‌داری منتقل شد. سپس با همزن مغناطیسی کاملاً هم‌زده شد و با کاغذ واتمن شماره ۱ صاف شد. رسوب باقیمانده در ارلن سه‌بار متوالی با کاربرد ۲۰ میلی‌لیتر دی‌اتیل‌اتر شسته شد. کل حلال جمع‌آوری شده با محلول ۰/۱ نرمال KOH اتانولی تیترا شد. سپس حلال تبخیر شده و چربی باقیمانده وزن گردید. مقدار کل اسیدهای چرب با واحد میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم چربی گزارش شد (Nunez et al., 1986). برای ارزیابی بافت از آزمون فشردن تک‌محوری به وسیله اینستران استفاده شد. بدین منظور نمونه‌های پنیر به شکل استوانه‌هایی با قطر ۲/۵ سانتی‌متر بریده شدند و پروب مخصوص به پیشانی جلودرنده دستگاه متصل

برای انتخاب مناسب‌ترین مدل برای توصیف سینتیک تغییرات شاخص‌های پروتئولیز شامل ازت غیر پروتئینی به کل، ازت محلول به کل، و ازت غیر پروتئینی به محلول از معادلات سینتیکی درجه صفر و اول استفاده شد. برای شاخص لیپولیز (عدد اسیدی) افزون‌بر این معادلات از معادله واکنش‌های ممانعتی نیز استفاده شد. ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مابین داده‌های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده، با هر مدل محاسبه شد و الگویی که حداکثر همبستگی و حداقل RMSE را داشت، مدلی مناسب برای

جدول ۳. مقایسه اختلاف داده‌های آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل شاخص‌های پروتئولیز و لیپولیز

شاخص‌ها		عدد اسیدی		ازت محلول به کل		ازت غیر پروتئینی به کل		ازت غیر پروتئینی به محلول	
درجه واکنش	صفر	اول	ممانعتی	صفر	اول	صفر	اول	صفر	اول
ریشه میانگین مربعات خطا	۰/۵۶	۰/۷۳	۰/۴۶	۲/۲۳	۲/۵۷	۱/۱۲	۱/۸۱	۲/۹۹	۳/۷۲
ضریب همبستگی	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۴	۰/۹۲	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۴

معادله ۲۹ برای شاخص ازت محلول به ازت کل ۰/۹۴، شاخص ازت غیر پروتئینی به ازت کل ۰/۹۸، و شاخص ازت غیر پروتئینی به ازت محلول ۰/۹۶ است.

#### تأیید مدل

تأیید بخش انتقال حرارت مدل توسعه یافته از طریق مقایسه پروفیل های دمای پیش بینی شده به وسیله مدل، با مقادیر اندازه گیری شده به وسیله ترموکوپل در نقاط متفاوت بسته پنیر انجام شد (Dalvi, 2007). تأیید بخش انتقال جرم مدل با مقایسه داده های تئوریک غلظت-فاصله پیش بینی شده به وسیله مدل برای نمک و رطوبت در داخل پنیر با مقادیر اندازه گیری شده غلظت نمک و رطوبت انجام گرفت (Rahmani, 2007). برای تأیید بخش پیش بینی سینتیک واکنش های بیوشیمیایی و تغییر خواص حسی پنیر طی رسیدن، از مقایسه مقادیر پیش بینی شده برای شاخص های پروتئولیز، لیپولیز، سفتی بافت، طعم، و پذیرش کلی با مقادیر اندازه گیری شده استفاده شد. ضریب همبستگی بالا بین مقادیر پیش بینی شده به وسیله مدل با مقادیر اندازه گیری شده و ریشه میانگین مربعات خطای کم نشانگر اعتبار مدل خواهد بود.

در پایان بر مبنای ارزیابی حسی انجام شده، روابط تغییرات سفتی بافت پنیر به صورت تابعی از میزان ازت غیر پروتئینی، طعم با عدد اسیدی، و پذیرش کلی با طعم استخراج گردید. معادلات نهایی برای توصیف تغییرات شاخص های لیپولیز، پروتئولیز، بافت، و ویژگی های حسی عبارتند از:

(رابطه ۲۶)

$$133/317 - (\text{ازت غیر پروتئینی به کل}) \times 0.21 + 30 / (\text{ازت غیر پروتئینی به کل}) \times 0.573 = \text{سفتی بافت}$$

(رابطه ۲۷)  $0.1209 \times (\text{عدد اسیدی}) + 5/1042 = \text{شاخص طعم}$

(رابطه ۲۸)  $0.2936 + (\text{شاخص طعم}) \times 0.9331 = \text{پذیرش کلی}$

#### شاخص های پروتئولیز

(رابطه ۲۹)

$$y = K_{01} \exp(Ea_1 (\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}))t + K_{02} \exp(Ea_2 (\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}))$$

#### شاخص لیپولیز

(رابطه ۳۰)

$$y = 25(1 - (\exp(K_{01} \exp(Ea_1 (\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}))t) + K_{02} \exp(Ea_2 (\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2})))$$

ضرایب معادلات ۲۹ و ۳۰ در جدول ۴ مشاهده می شود. ضریب همبستگی برای معادلات ۲۶ تا ۲۸ برابر با ۰/۹۶ و برای معادله ۳۰ برابر با ۰/۹۹ است. هم چنین ضریب همبستگی

جدول ۴. مقادیر ضرایب معادلات توصیف کننده تغییرات شاخص های پروتئولیز و لیپولیز

شاخص ها	K <sub>01</sub> (۱ بر ثانیه)	Ea <sub>1</sub> (کیلوژول بر کیلوگرم)	K <sub>02</sub> (۱ بر ثانیه)	Ea <sub>2</sub> (کیلوژول بر کیلوگرم)
ازت محلول	$2/94 \times 10^{-6}$	-1787/37	31/96	-442/26
ازت غیر پروتئینی (لایه سطحی)	$2/01 \times 10^{-6}$	3390/87	9/31	-72/18
ازت غیر پروتئینی (لایه میانی)	$1/29 \times 10^{-6}$	2168/31	9/57	174/28
ازت غیر پروتئینی به محلول (لایه سطحی)	$1/98 \times 10^{-6}$	5382/75	29/65	694/89
ازت غیر پروتئینی به محلول (لایه میانی)	$1/33 \times 10^{-6}$	6324/61	29/71	521/90
عدد اسیدی (لایه سطحی)، زمان > 604800 ثانیه	$-7/38 \times 10^{-8}$	10996/53	-0/37	-139/64
عدد اسیدی (لایه سطحی)، زمان < 604800 ثانیه	$-7/38 \times 10^{-8}$	1530/10	-0/37	3348/74
عدد اسیدی (لایه میانی)، زمان > 604800 ثانیه	$-8/97 \times 10^{-8}$	11606/10	-0/37	-431/92
عدد اسیدی (لایه میانی)، زمان < 604800 ثانیه	$-8/97 \times 10^{-8}$	-3325/37	-0/37	4273/80
عدد اسیدی (لایه عمقی)، زمان > 604800 ثانیه	$-8/64 \times 10^{-8}$	10827/49	-0/36	-142/12
عدد اسیدی (لایه عمقی)، زمان < 604800 ثانیه	$-8/64 \times 10^{-8}$	-2284/23	-0/36	4035/87

## نتایج و بحث

### تأیید مدل

طی گرمایش سه بعدی پنیر انجام گردید. شکل ۳ مقایسه نتایج تغییرات دمای پیش بینی شده به وسیله مدل توسعه داده شده بر مبنای ورودی های مندرج در جداول ۱ و ۲ و مقادیر دمای اندازه گیری شده در سطح، مرکز، و بخش تحتانی بسته پنیر طی حرارت دهی سه بعدی در ۵۰ درجه سلسیوس را نشان می دهد.

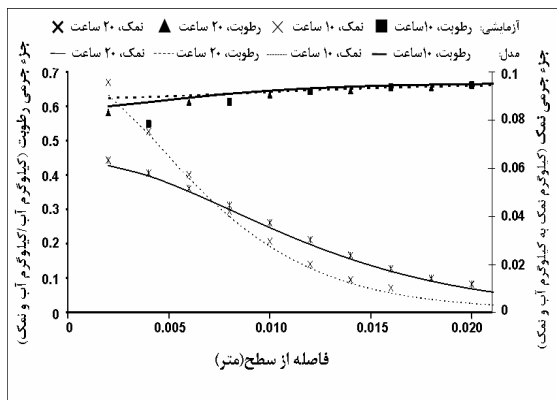
همان گونه که در بخش مواد و روش ها توضیح داده شد، تأیید بخش انتقال حرارت مدل با مقایسه پروفیل های دمایی اندازه گیری شده و پیش بینی شده به وسیله مدل توسعه داده شده

به‌وسیله مدل و مقادیر آزمایشی وجود دارد (به‌ترتیب بیش از ۹۸ و ۹۹ درصد برای نمک و رطوبت).

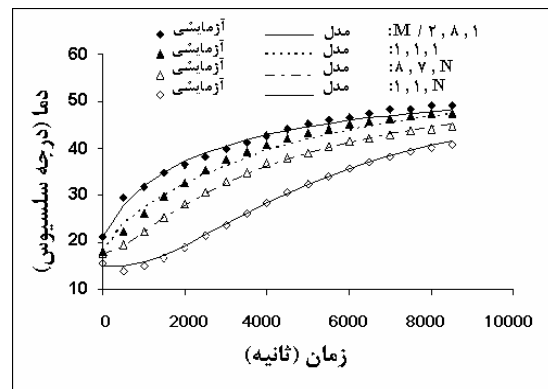
شکل‌های ۵ و ۶ و ۷ تأییدبخش پیش‌بینی سینتیک واکنش‌های بیوشیمیایی و تغییر خواص حسی پنیر طی رسیدگی با مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده برای تغییرات شاخص‌های پروتئولیز و لیپولیز، سفتی بافت، طعم، و پذیرش کلی طی رسیدگی پنیر با مقادیر اندازه‌گیری شده‌اند. ضریب همبستگی بالا نشان‌دهنده مناسب بودن روابط استفاده‌شده برای توصیف تغییرات این شاخص‌هاست.

همان‌طور که مشاهده می‌گردد انطباق خوبی بین دماهای پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده وجود دارد.

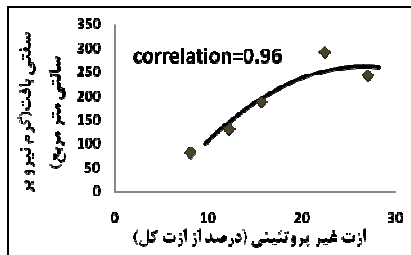
تأیید بخش انتقال جرم مدل با مقایسه داده‌های غلظت‌فاصله پیش‌بینی‌شده به‌وسیله مدل برای نمک و رطوبت در داخل پنیر با مقادیر اندازه‌گیری‌شده انجام گرفت. شکل ۴ مقایسه غلظت‌های نمک و رطوبت پیش‌بینی‌شده به‌وسیله مدل با داده‌های اندازه‌گیری‌شده در دمای ۱۵ درجه سلسیوس پس از ۱۰ و ۲۰ ساعت از نمک‌پاشی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود همبستگی بالایی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده



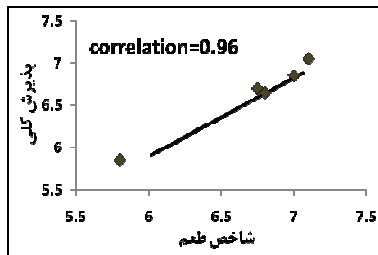
شکل ۴. مقایسه غلظت‌های نمک و رطوبت پیش‌بینی‌شده به‌وسیله مدل با داده‌های آزمایشی در دمای ۱۵ درجه سلسیوس پس از ۱۰ و ۲۰ ساعت از نمک‌پاشی



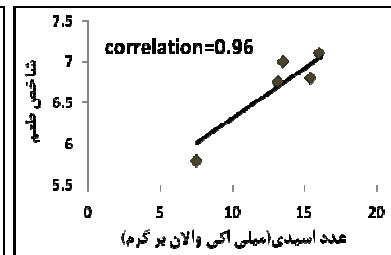
شکل ۳. مقایسه پروفیل داده‌های آزمایشی و داده‌های پیش‌بینی‌شده به‌وسیله مدل در نقاط گوناگون طی حرارت‌دهی در  $50^{\circ}\text{C}$  (مطابق شکل (۱)) M نود سطحی در بعد طولی و N نود سطحی در بعد ارتفاع است



(ج)

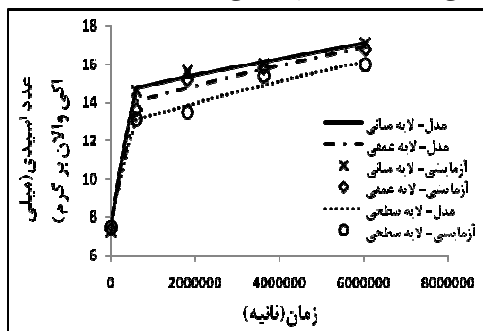


(ب)

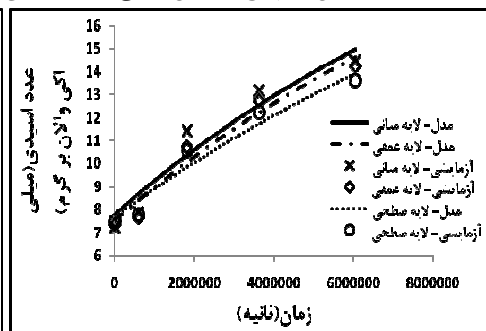


(الف)

شکل ۵. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با داده‌های حاصل از مدل (الف): شاخص طعم به‌عنوان تابعی از عدد اسیدی، (ب): شاخص پذیرش کلی به‌عنوان تابعی از شاخص طعم؛ (ج) شاخص سفتی بافت به‌عنوان تابعی از مقدار ازت غیر پروتئینی به ازت کل



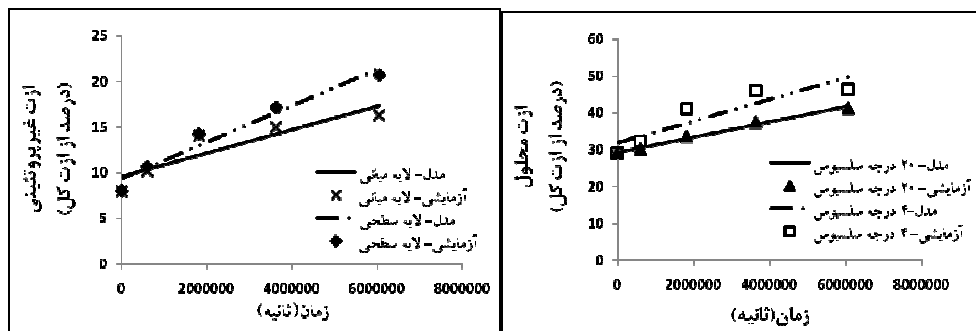
(ب)



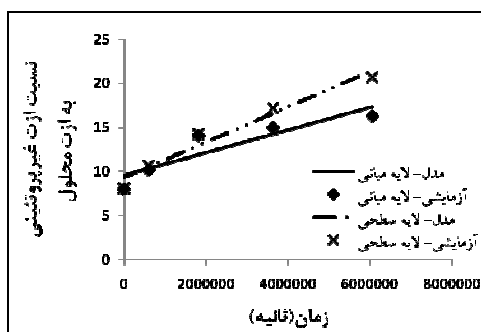
(الف)

شکل ۶. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با داده‌های حاصل از مدل مانعیتی برای عدد اسیدی: (الف): دمای  $4^{\circ}\text{C}$ ; (ب): دمای  $20^{\circ}\text{C}$





(الف) (ب)



(ج)

شکل ۷. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با داده‌های حاصل از مدل درجه صفر برای شاخص‌های پروتئولیز: (الف): ازت محلول به کل (میانگین اعداد لایه سطحی و میانی)، (ب): ازت غیر پروتئینی به کل دمای ۴°C؛ (ج): ازت غیر پروتئینی به محلول دمای ۴°C

آب‌نمک‌گذاری در لایه سطحی سرعت و میزان آب خارج شده زیاد است، چون در ابتدا نمک خشک موجود در سطح پنیر به شدت رطوبت لایه سطحی را جذب می‌کند ولی با گذشت زمان این مقدار کاهش پیدا می‌کند و همان‌طور که در شکل دیده می‌شود رطوبت در این لایه افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل کاهش سرعت و میزان آب خارج شده از این لایه در اثر کاهش گرادیان غلظت رطوبت بین لایه سطحی و محلول آب‌نمک و در کنار آن ورود آب لایه‌های پایینی به لایه سطحی است. درباره میزان نمک جذب شده نیز همین روند وجود دارد و مشاهده می‌شود که در لایه سطحی ابتدا مقدار نمک به شدت افزایش یافته است که به دلیل رسیدن نمک به حالت اشباع و ایجاد گرادیان غلظت بین لایه سطحی پنیر و محلول آب‌نمک و آغاز نفوذ است و سپس به دلیل خروج نمک از لایه سطحی و ورود آن به لایه‌های پایینی و نیز کم شدن گرادیان غلظت بین لایه سطحی پنیر و محلول آب‌نمک، غلظت نمک در لایه سطحی کاهش یافته است. در دو لایه دیگر همواره رطوبت در حال کاهش و نمک در حال افزایش است و سطح نمک در همه زمان‌ها در لایه میانی بیشتر از لایه عمقی و سطح رطوبت در همه زمان‌ها در لایه عمقی بیشتر از لایه میانی است. این بدان معناست که با فاصله گرفتن از سطح، غلظت نمک کاهش و

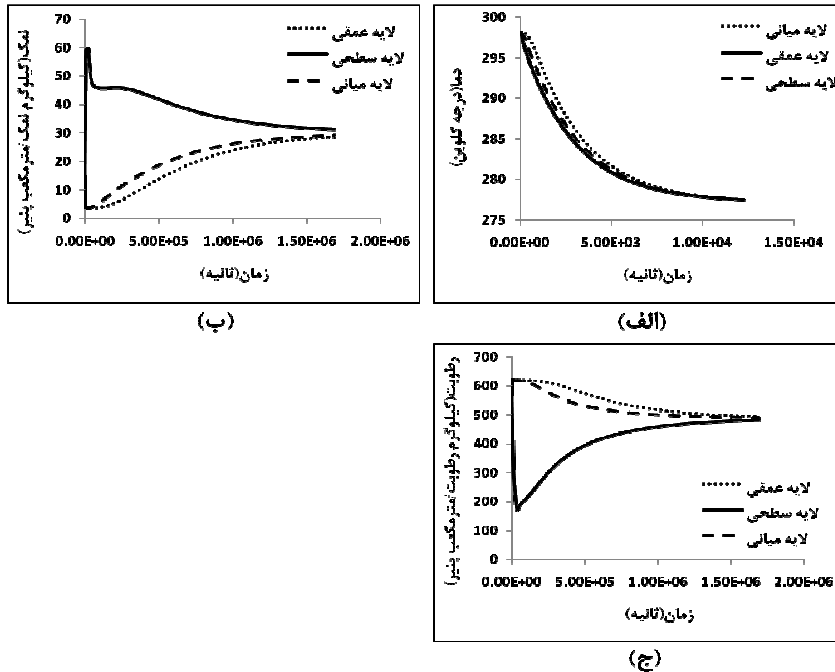
با توجه به دقت مناسب مدل در برآورد مقادیر آزمایشی، اعتبار مدل توسعه داده شده، تأیید شد و مدل برای استخراج نتایج در شرایط متفاوت کاربرد دارد.

#### استخراج نتایج از مدل

مدل توسعه داده شده قادر است مقادیر نمک و رطوبت نمونه را به عنوان تابعی از دما، زمان و مکان، سرعت خروج آب از پنیر در هر زمان، مقدار کل آب خارج شده، میزان بلورهای نمک حل شده، زمان لازم برای به تعادل رسیدن دما و غلظت آب و نمک داخل پنیر (پایان نفوذ نمک به داخل پنیر)، غلظت نمک و رطوبت در محلول آب‌نمک موجود در سطح پنیر، تغییرات شاخص‌های لیپولیز، پروتئولیز، بافت، و ویژگی‌های حسی را در کل طول فرایند پیش‌بینی کند. قسمت (الف) شکل ۸ پروفیل تغییرات دما در سه لایه پنیر طی رسیدگی تا زمان رسیدن به تعادل دمایی در دمای ۴°C را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود زمان لازم برای رسیدن به این تعادل در دمای ۴°C، ۱۲۳۰۰ ثانیه است. با توجه به شکل دیده می‌شود که لایه میانی دمای بالاتری در مقایسه با دو لایه دیگر دارد. شکل ۸ قسمت‌های (ب) و (ج)، پروفیل‌های پیش‌بینی شده برای تغییرات نمک و رطوبت را در سه لایه پنیر طی رسیدگی تا زمان رسیدن به تعادل در دمای ۴°C نشان می‌دهند. در شروع

محلول آب نمک، دچار تغییرات بیشتری در مقایسه با لایه‌های پایین‌تر می‌گردند.

میزان رطوبت افزایش می‌یابد. در ضمن با افزایش زمان به میزان غلظت نمک در لایه میانی و عمقی افزوده می‌شود و میزان رطوبت کاهش می‌یابد. به‌طور کلی لایه‌های نزدیک به سطح و



شکل ۸. پروفیل تغییرات دما و غلظت در لایه‌های گوناگون پنیر در طی رسیدگی تا زمان رسیدن به تعادل، در دمای  $4^{\circ}\text{C}$ : (الف) پروفیل تغییرات دما، (ب) پروفیل تغییرات نمک؛ (ج) پروفیل تغییرات رطوبت

انتقال نمک به لایه‌های پایین‌تر، کاهش می‌یابد. مقایسه داده‌های آزمایشی با داده‌های پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل نشان‌دهنده کارایی مدل توسعه داده شده در پیش‌بینی مقادیر آزمایشی است. بنابراین می‌توان از مدل به‌دست آمده برای کنترل و بهینه‌سازی فرایند نمک‌پاشی خشک، در جهت تولید پنیری با کیفیت بالا و یکنواخت استفاده کرد.

### سپاسگزاری

از جناب آقای دکتر شاهدی و جناب آقای مهندس بهرامی به پاس زحمات‌های بی‌دریغشان سپاسگزاریم.

### معرفی نمادها

C	غلظت
$C_0$	غلظت اولیه
$C_{max}$	حداکثر غلظت
$C_p$	گرمای ویژه (ژول بر کیلوگرم کلونین)
$C_s$	غلظت نمک (کیلوگرم بر مترمکعب پنیر)
$C_{s0}$	غلظت اولیه نمک (کیلوگرم بر مترمکعب پنیر)

در دمای  $4^{\circ}\text{C}$  پس از گذشت ۱۴۱۹۷۸۰ ثانیه و در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  پس از گذشت ۱۶۸۷۷۴۰ ثانیه میزان نمک و رطوبت در سه لایه به تعادل می‌رسد. بنابراین سرعت تبادل جرم در دمای بالا بیشتر است. افزایش دما به افزایش جنبش مولکولی آب و نمک می‌انجامد و همچنین عوامل ذاتی بازدارنده نفوذ در پنیر همانند ویسکوزیته فاز آبی پنیر و مقدار آب پیوندشده با شبکه پروتئینی را می‌کاهد. بنابراین میزان نفوذ با افزایش دما افزایش می‌یابد.

### نتیجه‌گیری کلی

مدلی ریاضی برای توصیف انتقال حرارت، جرم، سینتیک واکنش‌های شیمیایی، و تغییرات ویژگی‌های حسی پنیر، طی گرمخانه‌گذاری و سردخانه‌گذاری بسته‌های مکعبی شکل حاوی پنیر بعد از نمک‌پاشی خشک، با استفاده از حل عددی قانون دوم فوریه و قانون دوم فیک (روش تفاضل محدود) روی نرم افزار متلب توسعه داده شد. نتایج پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل نشان داد که غلظت نمک در طی نمک‌پاشی خشک در لایه‌های سطحی ابتدا به شدت افزایش، و سپس با گذشت زمان و با

ضریب هدایت حرارتی مؤثر (وات بر مترکلوین)	k	غلظت نمک در محلول فوق اشباع آب نمک	C <sub>sa</sub>
ثابت سرعت (۱ بر زمان)	K	(کیلوگرم نمک بر کیلوگرم آب نمک)	
فاکتور پری اکسپوننشیا (Pre-exponential)	K <sub>0</sub>	غلظت نمک در پنیر (کیلوگرم بر مترمکعب پنیر)	C <sub>ss</sub>
ضریب هدایت حرارتی پلی پروپیلن (وات بر مترکلوین)	k'	مقدار رطوبت (کیلوگرم بر مترمکعب پنیر)	C <sub>w</sub>
		مقدار اولیه رطوبت (کیلوگرم بر مترمکعب پنیر)	C <sub>w0</sub>
ضریب هدایت حرارتی هوا (وات بر مترکلوین)	k''	مقدار رطوبت در محلول آب نمک (کیلوگرم رطوبت بر کیلوگرم آب نمک)	C <sub>wa</sub>
ضریب تبادل نمک در سطح (متر بر ثانیه)	k <sub>s</sub>	مقدار رطوبت در پنیر (کیلوگرم بر مترمکعب پنیر)	C <sub>ws</sub>
ضریب تبادل رطوبت در سطح (متر بر ثانیه)	k <sub>w</sub>	ضریب انتقال جرم	D
طول بسته (متر)	L	فاکتور پری اکس پوننشیا	D <sub>0s</sub>
ثابت گازها ۸/۳۱۴۵۰ (ژول بر مول کلوین)	R	ضریب انتقال نمک در پنیر (متر بر مجذور ثانیه)	D <sub>s</sub>
ضخامت پلی پروپیلن (متر)	S	ضریب انتقال نمک در آب نمک (متر بر مجذور ثانیه)	D <sub>sa</sub>
ضخامت لایه هوا (متر)	S'		
زمان (ثانیه)	t	ضریب انتقال رطوبت در پنیر (متر بر مجذور ثانیه)	D <sub>w</sub>
دمای مطلق (کلوین)	T	ضریب انتقال رطوبت در آب نمک (متر بر مجذور ثانیه)	D <sub>wa</sub>
زمان اولیه (ثانیه)	t <sub>0</sub>	ارتفاع آب نمک (متر)	dy <sub>a</sub>
دمای اولیه (کلوین)	T <sub>0</sub>	انرژی اکتیواسیون (کیلوژول بر مول)	E <sub>a</sub>
دمای هوا (کلوین)	T <sub>∞</sub>	میانگین ضریب انتقال حرارت در سطح (وات بر مترمربع کلوین)	h
عرض بسته (متر)	W		H
ضریب هدایت حرارتی (وات بر مترکلوین)	λ		
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	ρ		

## REFERENCES

- Afshar, S. (2004). Study of effects of somatic cells on physical and chemical properties and efficiency of traditional and UF cheese. M. Sc. thesis, Tabriz University, Iran. (In Farsi)
- Alborzi, S. (2001). Study of affective factors in enhancing the hygiene quality of UF cheese with an emphasis on fungal contamination prevention. M. Sc. Thesis, Shiraz University, Iran. (In Farsi)
- Alizadeh, M., Hamedi, M. & Khosroshahi, A. (2006). Modeling of proteolysis and lipolysis in Iranian white brine cheese. *Food Chemistry*, 97, 294-301.
- Bech, A. M. (1993). Characterizing ripening in UF-Cheese. *International Dairy Journal*, 3, 329-342.
- Berg, L. (2008). Texture of food gels explained by combining structure and large deformation properties. Ph. D. dissertation, Wageningen University, Wageningen.
- Boudhrioua, N., Bionazzi, C. & Daudin, J. D. (2003). Estimation of moisture diffusivity in gelatin-starch gels using time-dependent concentration-distance curves at constant temperature. *Food Chemistry*, 82, 139-149.
- Chalkesh Amiri, M. (1996). *Fundamentals of heat transfer*. Isfahan: Isfahan University of Technology Publications (In Farsi)
- Dalvi, M. (2007). *Heat transfer modeling in UF cheese*. M. Sc. thesis, Isfahan University of Technology, Iran. (In Farsi)
- Folkertsma, B., Fox, P. F. & McSweeney, P. L. H. (1996). Accelerated ripening of Cheddar cheese at elevated temperatures. *International Dairy Journal*, 6(11-12), 1117-1134.
- Geurts, T. J., Walstra, P. & Mulder, H. (1974). Transport of salt and water during salting of cheese. 1. Analysis of the process involved. *Netherlands Milk and Dairy Journal*, 28, 102-129.
- Guinee, T. P. & Fox, P. F. (1983). Sodium chloride and moisture changes in Ramano-type cheese during salting. *Journal of Dairy Research*, 50, 511-518.
- Guinee, T. P. & Fox, P. F. (1987). Cheese: chemistry, physics and microbiology. *Elsevier Application Science*, 1, 251-297.
- Hesari, J., Ehsani, M.R., Kosroshahi, A & McSweeney, P. L. H. (2006). Contribution of rennet and starter to proteolysis in Iranian UF white cheese. *Lait*, 86, 291-302.
- Incropera, F. P. & DeWitt, D. P. (1996) *Introduction to heat transfer* (3rd ed.), New York: John Wiley & Sons

- Irudayaraj, J. (2002) *Food processing operation modeling*, New York: Marcel Dekker
- Karami, M., Ehsani, M. R., mousavi, S. M., Rezaei, K. & Safari, M. (2009). Changes in the rheological properties of Iranian UF-Feta cheese during ripening. *Food Chemistry*, 112, 539-544
- Kuchroo, C. N. & Fox, P. F. (1982). Soluble nitrogen in Cheddar cheese: comparison of extraction procedures. *Milchwissenschaft*, 37, 331-335.
- Luna, J. A. & Bressan, J. A. (1987). Mass transfer during ripening of Cuartitolo Argentino cheese. *Journal of Food Science*, 52(2), 308-311.
- Luna, J. A. & Chavez, M. S. (1992). Mathematical model for water diffusion during brining of hard and semi-hard cheese. *Journal of Food Science*, 57(1), 55-58.
- Meilgaard, M., Civille, G. V. & Thomas, C. B. (2007). *Sensory evaluation techniques* (3rd ed.). New York: CRC Press/Taylor & Francis
- Messens, W., Dewettinck, K., Van Camp, J. & Huyghebaert, A. (1999). Transport of sodium chloride and water in Gouda cheese as affected by high-pressure brining. *International Dairy Journal*, 9, 569-576.
- Mortazavi, A., Qods Rouhani, M. & Jouyandeh, H. (1995) *Milk and dairy products technology*. Mashhad: Ferdousi University Publications (In Farsi)
- Mulet, A. (1994) Drying modelling and water diffusivity in carrots and potatoes. In P. Fito, A. Mulet, & B. McKenna (Eds.), *Water in foods*. London: Elsevier Application Science.
- Nunez, M., Garcia-Aser, C., Rodriguez-Marin, M. A., Medina, M. & Gaya, P. (1986). The effect of ripening and cooking temperatures on proteolysis and lipolysis in Manchego cheese. *Food Chemistry*, 21, 115-123.
- Ozsisik, M. N. (1994) *Finite differences methods in heat transfer*. London: CRC press
- Pajonk, A., Saurel, R. & Andrieu, G. (2003a). Experimental study and modeling of effective NaCl diffusion coefficient value during Emmental cheese brining. *Journal of Food Engineering*, 60(3), 307-313.
- Pajonk, A., Saurel, R., Blanc, D., Laurent, P. & Andrieu, J. (2003b). Heat transfer study and modeling during Emmental ripening. *Journal of Food Engineering*, 57, 249-255.
- Rahmani, K. (2007) Simulating of mass transfer (salt and water) during salting of UF cheese. M. Sc. thesis, Tabriz University, Iran. (In Farsi)
- Sihufe, G. A., Zorrilla, S. E. & Rubiolo, A. C. (2005). Kinetics of proteolysis of  $\beta$ -casein during ripening of Fynbo cheese salted with NaCl or NaCl/KCl and ripened at different temperatures. *Journal of Food Science*, 68(1), 117-123.
- Simal, S., Sanchez, E. S., Bon, J., Femenia, A. & Rossello, C. (2001). Water and salt diffusion during cheese ripening: effect of external and internal resistances to mass transfer. *Journal of Food Engineering*, 48, 269-275.
- Tijsskens, L.M.M., Schijvens, E.P.H.M. & Biekman, E.S.A. (2001) Modelling the change in colour of broccoli and green beans during blanching. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2, 303-313.
- Toledo, R. T. (1991) *Fundamentals of food process engineering* (2nd ed.). New York: Van Nostrand, Reinhold
- Turhan, M. & Kakalantunc, G. (1992). Modelling of salt transfer in White cheese during cheese brining. *Journal of Food Science*, 57(5), 1082-1085.
- Zorrilla, S. E. & Rubiolo, A. C. (1994). Fynbo cheese, NaCl and KCl changes during ripening. *Journal of Food Science*, 59(5), 972-975.