



مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی-پژوهشی

توسعه و شبیه سازی مدل انتقال همزمان نمک و رطوبت در پنیر با بررسی اثر دما و نیروهای اسمزی

محسن دلوی-اصفهان^{۱*}، حمید خفاجه^۲

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

۲-استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰

تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶

کلمات کلیدی:

آب نمک گذاری پنیر،

ضریب نفوذ،

دما،

نیروهای اسمزی،

شبیه سازی عددی

DOI: 10.48311/fsct.2026.119858.83108

* مسئول مکاتبات:

Dalvi@jahromu.ac.ir,
mohsen.Dalvi@gmail.com

نمک زنی یکی از مراحل کلیدی در تولید پنیر است که نقش مهمی در ایمنی میکروبی، ماندگاری، بافت و توسعه طعم محصول دارد. در این پژوهش، فرایند جذب نمک در پنیر طی آب نمک گذاری با رویکردی تجربی و مدل سازی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا ترکیب شیمیایی نمونه های پنیر تعیین شد و سپس با استفاده از قانون دوم فیک، ضریب نفوذ مؤثر نمک در دماهای مختلف محاسبه گردید. همچنین برای توصیف دقیق تر فرایند، یک مدل عددی توسعه یافته با در نظر گرفتن انتقال همزمان نمک و آب و اثر نیروی اسمزی شبیه سازی شد. نتایج نشان داد که غلظت نمک در پنیر با گذشت زمان افزایش یافته و این افزایش در ساعات ابتدایی سریع تر است، اما به تدریج با کاهش گرادیان غلظت، آهنگ جذب نمک کاهش می یابد. همچنین دما تأثیر قابل توجهی بر فرایند نفوذ داشت؛ به طوری که با افزایش دما از ۶ به ۲۰ درجه سانتی گراد، ضریب نفوذ مؤثر نمک افزایش یافت و میزان جذب نمک بیشتر شد. بررسی وابستگی دمایی ضریب نفوذ با استفاده از رابطه آرنیوس نشان داد که انرژی فعال سازی فرایند نفوذ نمک برابر با ۵۳/۳۲ کیلوژول بر مول است. نتایج شبیه سازی عددی نیز نشان داد که در نظر گرفتن اثر اسمزی، پیش بینی واقع بینانه تری از کاهش رطوبت و توزیع همزمان نمک و آب در بافت پنیر ارائه می دهد. نقشه های دوبعدی توزیع غلظت نمک نیز بیانگر آن بودند که در دماهای بالاتر، عمق نفوذ نمک در مدت زمان ثابت بیشتر است.

۱-مقدمه

نمک یکی از اجزای اساسی در تولید و فرآوری بسیاری از مواد غذایی است و نقش مهمی در ایمنی میکروبی، ایجاد طعم و بهبود بافت محصولات ایفا می‌کند. افزودن نمک با کاهش فعالیت آبی (a_w)، رشد میکروارگانیسم‌های نامطلوب را محدود کرده و در نتیجه ماندگاری محصول را افزایش می‌دهد. همچنین، پدیده نفوذ و جذب نمک یکی از فرآیندهای مهم انتقال جرم در محصولات مانند گوشت، ماهی و پنیر است که اثر قابل توجهی بر ویژگی‌های کیفی، پایداری و ایمنی میکروبی آن‌ها دارد [1]. در صنعت پنیرسازی، نمک علاوه بر نقش‌های عمومی، تأثیرات اختصاصی و تعیین‌کننده‌ای نیز دارد. نمک با اثرگذاری بر فعالیت باکتری‌های آغازگر و آنزیم‌های دخیل در رسیدگی، سرعت واکنش‌های بیوشیمیایی مانند پروتئولیز و لیپولیز را تنظیم کرده و به شکل‌گیری طعم، عطر و قوام بافت پنیر کمک می‌کند. از نظر ساختاری نیز حضور نمک موجب تغییر در شبکه پروتئینی کازئین، کاهش رطوبت و افزایش استحکام بافت پنیر می‌شود [2].

به طور کلی سه روش اصلی برای نمک‌زنی پنیر وجود دارد: نمک‌زنی خشک، نمک‌زنی خشک سطحی و نمک‌زنی در آب‌نمک. در نمک‌زنی خشک، نمک در مراحل پایانی تولید با دلمه‌های خردشده مخلوط شده و پس از حل شدن در رطوبت سطحی، به تدریج به داخل دلمه نفوذ می‌کند. در روش نمک‌زنی خشک سطحی، نمک یا دوغاب نمکی بر سطح قالب پنیر مالیده می‌شود و از سطح به سمت داخل انتشار می‌یابد. در روش آب‌نمک نیز قالب‌های پنیر در محلول آب‌نمک غوطه‌ور می‌شوند و در اثر اختلاف غلظت و فشار اسمزی، یون‌های سدیم و کلرید به داخل پنیر نفوذ کرده و همزمان بخشی از آب پنیر به محیط آب‌نمک منتقل می‌شود.

مکانیسم جذب نمک در پنیر عمدتاً بر پایه پدیده‌های انتقال جرم و انتشار در ماتریس پروتئینی است. در هنگام قرار

گرفتن پنیر در محیط نمکی، یون‌های Na^+ و Cl^- از سطح به سمت مرکز پنیر نفوذ می‌کنند، در حالی که بخشی از رطوبت داخلی پنیر در جهت مخالف و به سمت محیط خارج منتقل می‌شود. این فرآیند سبب ایجاد گرادیان‌های غلظتی نمک و رطوبت از سطح به مرکز پنیر شده و با گذشت زمان توزیع نمک در بافت به تدریج یکنواخت‌تر می‌شود. میزان جذب نمک تحت تأثیر عوامل متعددی نظیر غلظت آب‌نمک، مدت زمان نمک‌زنی، اندازه و هندسه پنیر و شرایط سطحی آن قرار دارد. به طور معمول افزایش غلظت محلول نمک و طولانی‌تر شدن زمان تماس با آب‌نمک باعث افزایش جذب نمک می‌شود، هرچند این افزایش در طول زمان با نرخ کاهشی همراه است. همچنین پنی‌هایی با نسبت سطح به حجم بیشتر، نمک را سریع‌تر جذب می‌کنند و خشک شدن سطح می‌تواند سرعت نفوذ یون‌ها را کاهش دهد. در ادامه و طی دوره نگهداری یا رسیدن، انتشار تدریجی نمک در ماتریس پنیر ادامه یافته و توزیع آن به سمت تعادل نسبی حرکت می‌کند [3-4].

در سال‌های اخیر مطالعات متعددی با هدف درک بهتر مکانیسم‌های انتقال جرم و توسعه مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی رفتار نمک در ماتریس‌های غذایی انجام شده است. برای مثال، Marchetti و همکاران (۲۰۲۱) کینتیک‌های انتقال جرم را در فیله‌های ماهی هاک^۱ تحت سه روش نمک‌زنی شامل نمک‌زنی خشک، نمک‌زنی مخلوط و آب‌نمک‌دهی بررسی کردند. در این مطالعه تغییرات محتوای نمک و آب، فعالیت آبی و تغییرات جرم نمونه‌ها ارزیابی شد. نتایج نشان داد که در تمامی روش‌ها کاهش جرم رخ می‌دهد، اما روش آب‌نمک کمترین افت وزن و در نتیجه بازده بالاتری ایجاد می‌کند، در حالی که نمک‌زنی خشک بیشترین میزان آب‌گیری و بالاترین محتوای نمک را به همراه دارد. همچنین مدل‌سازی کینتیک انتقال جرم با استفاده از مدل‌های تجربی مختلف انجام شد، که در میان آن‌ها مدل ویبال^۲ بهترین تطابق را با داده‌های تجربی نشان داد [5].

علاوه بر رویکردهای انتقال جرم مبتنی بر معادلات کلاسیک فیک، برخی پژوهش‌ها از مدل‌های ترمودینامیکی برای توصیف انتقال جرم استفاده کرده‌اند. Velázquez-Varela (۲۰۱۴) با استفاده از یک چارچوب ترمودینامیکی غیرخطی و برگشت‌ناپذیر، انتقال همزمان آب و یون‌ها را در طی فرآیند نمک‌زنی پنیر در یک سیستم سه‌فازی شامل پروتئین، چربی و فاز آبی مدل‌سازی کرد. نتایج نشان داد که نیروهای محرک مختلفی از جمله پتانسیل‌های شیمیایی، مکانیکی و الکتریکی در انتقال جرم نقش دارند و برهم‌کنش‌های پیچیده میان اجزای ماتریس پنیر و تغییرات ریزساختاری می‌تواند رفتار نفوذ را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد [9].

همچنین Santapaola (۲۰۱۳) فرآیند نمک‌زنی خشک پنیر بز را از دیدگاه نفوذی بررسی کرد. در این مطالعه با تعیین پروفیل‌های زمانی و مکانی غلظت نمک و آب در عمق نمونه، قانون دوم فیک در قالب مدل نیمه‌بی‌نهایت برای توصیف انتقال جرم به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که نمک پس از ۲۴ ساعت تنها تا عمق حدود ۲ سانتی‌متر در نمونه نفوذ می‌کند و بیشترین غلظت در سطح تماس با نمک مشاهده می‌شود. همچنین کاهش ضریب نفوذ مؤثر در طول زمان به تغییرات ساختاری پروتئین‌ها و انقباض بافت در مراحل اولیه فرآیند نسبت داده شد [10].

در مجموع، مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که مدل‌سازی نفوذ و جذب نمک در مواد غذایی با استفاده از رویکردهای مختلفی شامل مدل‌های تجربی کینتیک، مدل‌های مبتنی بر قانون فیک، مدل‌های عددی چندبعدی و چارچوب‌های ترمودینامیکی انجام شده است. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که عواملی مانند ساختار بافت، ترکیب شیمیایی، دما، زمان فرآیند و تغییرات ریزساختاری می‌توانند به طور قابل توجهی بر ضرایب نفوذ و رفتار انتقال جرم تأثیر بگذارند. از این رو توسعه مدل‌های دقیق‌تر برای توصیف جذب نمک در فرآیندهایی نظیر آب‌نمک‌دهی پنیر می‌تواند به بهینه‌سازی شرایط فرآیند، کنترل یکنواختی توزیع نمک و بهبود کیفیت نهایی محصول در مقیاس صنعتی کمک کند. لذا هدف از

در حوزه عمل‌آوری گوشت نیز Graiver و همکاران (۲۰۰۹) یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی جذب نمک‌های عمل‌آوری شامل NaNO_2 ، KNO_3 و NaCl در قطعات گوشت خوک ارائه کردند. این مدل مبتنی بر حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی انتقال جرم در شرایط ناپایا و در هندسه سه‌بعدی استوانه محدود بود. در این چارچوب علاوه بر انتشار مولکولی، اثر انتقال همرفتی ناشی از جذب آب توسط بافت نیز در نظر گرفته شد و وابستگی ضرایب نفوذ نمک‌ها به غلظت کلرید سدیم لحاظ گردید. نتایج نشان داد که گرادیان غلظت NaCl می‌تواند باعث تغییرات ریزساختاری در بافت شده و در نتیجه نفوذ نمک‌ها را افزایش دهد [6].

در مطالعه‌ای دیگر، Torres-Baix (۲۰۲۴) به مدل‌سازی جذب نمک در فرآیند تولید ژامبون خشک پرداخت. در این پژوهش از فناوری غیرمخرب القای مغناطیسی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های بافتی ژامبون‌های کم‌چرب و پرچرب استفاده شد و سپس با بهره‌گیری از روش‌های آماری مختلف، مدل‌های پیش‌بینی جذب نمک توسعه یافت. نتایج نشان داد که افزایش زمان نمک‌زنی موجب افزایش محتوای نمک با رفتار مجانبی می‌شود، در حالی که در ژامبون‌های پرچرب میزان جذب نمک کمتر است. بهترین عملکرد مدل‌ها زمانی حاصل شد که زمان نمک‌زنی، وزن و میزان چربی به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند [7].

Pajonk (۲۰۰۳) کینتیک نفوذ نمک در پنیر امتال طی فرآیند آب‌نمک‌دهی را بررسی کرد. در این پژوهش پروفیل‌های غلظت نمک در نمونه‌های استوانه‌ای در بازه دمایی ۴ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد و سه رویکرد مدل‌سازی شامل قانون دوم فیک با ضریب نفوذ ثابت، روش بولتزمن با ضریب نفوذ وابسته به غلظت و شناسایی عددی معادله نفوذ با ضریب نفوذ متغیر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در نظر گرفتن وابستگی ضریب نفوذ به غلظت و دما تطابق بهتری با داده‌های تجربی دارد و ضریب نفوذ مؤثر نمک با افزایش غلظت نمک کاهش و با افزایش دما افزایش می‌یابد [8].

این پژوهش، بررسی فرایند جذب نمک در پنیر طی آب نمک گذاری با رویکردی تجربی و مدل سازی است.

۲- مواد و روش ها

۲-۱ آنالیز شیمیایی و ارزیابی ضریب نفوذ نمک در پنیر
آنالیز شیمیایی نمونه های پنیر شامل خاکستر، نمک، رطوبت، چربی و پروتئین دو هفته پس از تولید انجام شد. میزان چربی نمونه ها با استفاده از روش گربر و مقدار رطوبت با روش آون تعیین گردید. برای تعیین مقدار پروتئین از روش ماکرو-

کجدال استفاده شد. به منظور تعیین خاکستر، نمونه ابتدا در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد خشک شد و سپس تا حصول خاکستر سفید یا خاکستری روشن در کوره الکتریکی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت. پس از آن، مقدار کلرید سدیم (NaCl) با استفاده از روش ولهارد اندازه گیری شد. تمامی آنالیزهای شیمیایی در سه تکرار انجام شدند. نتایج آنالیز شیمیایی نمونه های پنیر به صورت درصد وزنی در جدول ۱ ارائه شده است [11].

Table 1. Chemical composition of cheese samples before brining

Cheese	Moisture	Protein	Fat	Carbohydrate *	Ash
Non-salted	67.35±0.23	11.20±0.11	17.12±0.38	3.12	1.48±0.36

*Carbohydrate percentage was calculated as $100 - (\text{moisture}\% + \text{fat}\% + \text{protein}\% + \text{ash}\%)$

صرفاً از طریق سطح مقطع انتهایی در تماس با محلول صورت گیرد. فرایند جذب نمک در مخزنی حاوی محلول آب نمک، همراه با افزودن ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر کلسیم کلراید و تنظیم pH در مقدار ۵/۴ (توسط اسید لاکتیک) انجام شد؛ در این روش، با استفاده از همزن مغناطیسی با سرعت آرام و مداوم، ضمن حذف مقاومت انتقال جرم در لایه مرزی فاز مایع و ثابت نگه داشتن غلظت در سطح تماس، شرایط مرزی لازم برای انطباق با مدل های ریاضی نفوذ و استخراج دقیق پارامترهای سینتیکی را فراهم آمد [8].

در این پژوهش، به منظور در نظر گرفتن پنیر به عنوان یک محیط نیمه محدود، شرط عدد فوریه مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس رابطه $F_0 = \frac{D_t}{L^2}$ ، زمانی می توان محیط را نیمه محدود فرض کرد که مقدار عدد فوریه کمتر از ۰/۰۵ باشد. با در نظر گرفتن ضریب نفوذ نمک در پنیر برابر با و زمان آب نمک دهی ۴۸ ساعت، حداقل ضخامت لازم در جهت نفوذ برابر با حدود ۳/۱ سانتی متر محاسبه شد. از آنجا که ضخامت نمونه های مورد استفاده در این آزمایش ۵ سانتی متر بود، مقدار عدد فوریه کمتر از ۰/۰۵ به دست آمد و در نتیجه شرایط لازم برای فرض نیمه محدود بودن محیط برقرار بود؛ بنابراین می توان فرض کرد که در طول زمان آزمایش، جبهه نفوذ به انتهای نمونه نرسیده و شرایط مدل نفوذ مورد استفاده معتبر و پایدار بوده است. با توجه به این شرایط، ضریب نفوذ با استفاده از مدل انتقال جرم یک بعدی و نیمه نامتناهی با فرض نفوذ یک طرفه استفاده شد. حل تحلیلی معادله نفوذ فیک برای این شرایط به صورت معادله (۱) بیان می شود [12]. به منظور بررسی سینتیک انتقال جرم و تعیین ضریب نفوذ نمک، نمونه ها از بخش مرکزی پنیر تهیه و جهت دستیابی به پایداری حرارتی، به مدت ۲۴ ساعت در دمای آزمایش تثبیت شدند. برای تضمین شرایط نفوذ یک بعدی و جلوگیری از خروج رطوبت یا تغییرات ساختاری، سطوح جانبی نمونه ها توسط لایه ای از پارافین و پوشش محافظ (پارافیلیم) عایق بندی گردید تا انتقال جرم

$$\frac{C_{S,\infty} - C_{S,t}}{C_{S,\infty} - C_{S,0}} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad [1]$$

که در آن: $C_{S,0}$ غلظت اولیه نمک در پنیر (گرم نمک بر گرم پنیر)، $C_{S,\infty}$ غلظت نمک در حال تعادل (گرم نمک بر گرم پنیر)، Ds ضریب نفوذ مؤثر نمک در پنیر (m^2/s)، erf تابع خطا، t زمان آب نمک گذاری (s) و L ضخامت نمونه پنیر (m) می باشد.

برای تعیین اثر دما بر روی ضریب نفوذ نمک، از رابطه آرنیوس (۲) استفاده شد. در این رابطه D_0 ضریب پیش نمایی یا ضریب نفوذ در دمای بسیار بالا، E_a انرژی

در این رابطه c_w کسر جرمی آب در پنیر، D_w ضریب نفوذ مؤثر آب در بافت پنیر، c_s غلظت نمک در پنیر، $C_{s,eq}$ غلظت تعادلی نمک و k_{osm} ضریب انتقال مرتبط با پدیده اسمزی می باشد. هرچه اختلاف غلظت نمک بین داخل پنیر و حالت تعادل بیشتر باشد، نیروی اسمزی قوی تر شده و خروج آب از بافت افزایش می یابد. در این سطح، جمله $-k_{osm}(c_s - C_{s,eq})$ به عنوان یک جمله چاه^۳، نشان دهنده خروج رطوبت از لایه های داخلی پنیر است. در واقع، حضور موضعی نمک در هر نقطه از بافت (c_s) ، پتانسیل شیمیایی رطوبت را تغییر داده و نیروی محرکه اسمزی را برای حرکت آب به سمت خارج ایجاد می کند [13-14].

ب) تبادل جرم در سطح تماس^۴:

برخلاف فرآیند داخلی، تبادل جرم در سطح مشترک پنیر و محلول ($x = 0$) تابع شرایط مرزی همرفتی (معادلات ۶ و ۷) است. در این مرز، مقادیر تعادلی نمک $C_{s,eq}$ و رطوبت $C_{w,eq}$ مستقل از یکدیگر نبوده و بر اساس ویژگی های ترمودینامیکی محلول آب نمک در سطح تماس تعیین می شوند. غلظت بالای نمک در محلول خارجی، با کاهش پتانسیل آبی در سطح، شیب غلظت لازم برای شروع نفوذ و خروج رطوبت را فراهم می آورد. بنابراین، غلظت نمک نه تنها در مرز (برای تعیین $C_{w,eq}$)، بلکه در تمام نقاط داخلی (به عنوان متغیر محرک در جمله اسمزی) بر سینتیک انتقال رطوبت تأثیرگذار است. برای شبیه سازی این رفتار پیچیده، از نرم افزار COMSOL Multiphysics نسخه 6.0 بر پایه روش المان محدود استفاده شد. هندسه مدل مطابق با ابعاد آزمایشگاهی تعریف، برای سطوح عایق بندی شده (دیواره ها و مرکز نمونه در $x=L$)، شرط مرزی عدم عبور جریان مطابق با معادلات ۸ و ۹ اعمال گردید.

شرایط اولیه و مرزی

فعال سازی نفوذ (کیلوژول بر مول)، R ثابت گازها (8.314 $J mol^{-1} K^{-1}$) و T دمای مطلق (کلوین) می باشد.

$$D(T) = D_0 e^{-E_a/RT} \quad [2]$$

۲-۲ مدل عددی توسعه یافته با در نظر گرفتن اثر نیروی اسمزی

در فرایند آب نمک گذاری، انتقال نمک از محلول آب نمک به درون بافت پنیر عمدتاً از طریق نفوذ مولکولی رخ می دهد. با این حال، به دلیل وجود اختلاف غلظت میان محلول آب نمک و رطوبت داخلی پنیر، فشار اسمزی ایجاد شده و موجب خروج آب از بافت پنیر و حرکت آن به سمت محلول می شود. این پدیده علاوه بر تغییر محتوای رطوبت پنیر، می تواند بر انتقال نمک نیز تأثیر گذاشته و باعث ایجاد یک مؤلفه جابجایی در انتقال جرم شود. از این رو، برای توصیف دقیق تر فرایند آب نمک گذاری، مدل نفوذی کلاسیک با در نظر گرفتن اثر نیروی اسمزی توسعه داده شد. در ضمن، در فرآیند آب نمک گذاری، نفوذ نمک و خروج رطوبت دو پدیده هم زمان و وابسته به یکدیگر هستند. برای توصیف دقیق این سینتیک، تمایز مشخصی میان «پدیده اسمزی در بافت داخلی» و «تبادل جرم در سطح تماس» در مدل لحاظ شده است که جزئیات آن به شرح زیر است:

الف) پدیده اسمزی در بافت داخلی^۱:

تغییرات غلظت نمک (c_s) و کسر جرمی آب (c_w) در تمامی نقاط داخلی بافت، توسط معادلات دیفرانسیل جفت شده^۲ (معادله ۳) توصیف می شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_s}{\partial t} &= \nabla \cdot (D_s \nabla C_s) \\ \frac{\partial C_w}{\partial t} &= \nabla \cdot (D_w \nabla C_w) - k_{osm}(c_s - C_{s,eq}) \end{aligned} \quad [3]$$

3- Sink term

4 -Contact Surface

1- Internal Tissue

2 -Coupled

که در آن k_s و k_w ضریب انتقال جرم همرفتی برای نمک و آب می باشد و $C_{s,eq}$ و $C_{w,eq}$ غلظت تعادلی نمک و آب در سطح پنیر می باشد.

میزان نمک در کل سطح نمونه در طی زمان با استفاده از معادله (۴) تعیین شد.

$$M(t) = \int C_s(x, y, t) dA \quad [10]$$

که در آن $C(x, y, t)$ غلظت نمک در مختصات مکانی و زمان و dA سطحی از مقطع نمونه است. این رابطه بیانگر مقدار تجمعی نمک در کل سطح مورد بررسی در زمان t می باشد. پارامترهای بکارگرفته شده در مدل، در جدول ۲ آورده شده است.

شرایط اولیه و مرزی مدل به صورت زیر در نظر گرفته شد: شرط اولیه:

$$t = 0 \quad C_s(x, y, 0) = 0 \quad [4]$$

$$t = 0 \quad C_w(x, y, 0) = C_{w,0} \quad [5]$$

شرایط مرزی:

$t > 0 \quad \text{at } x = 0 - n.J_s = k_s(C_{s,eq} - C_{s,t})$	[6]
$t > 0 \quad \text{at } x = 0 - n.J_w = k_w(C_{w,eq} - C_{w,t})$	[7]
$t > 0 \quad \text{at } x = L \quad \frac{\partial C_s(x, y, t)}{\partial x} = 0$	[8]
$t > 0 \quad \text{at } x = L \quad \frac{\partial C_w(x, y, t)}{\partial x} = 0$	[9]

Table 2. Model parameters used in COMSOL Multiphysics simulations

Parameter	Value
Salt diffusivity at 6 °C	9.2E-11 [m ² /s]
Salt diffusivity at 13 °C	1.5E-10 [m ² /s]
Salt diffusivity at 20 °C	2.8E-10 [m ² /s]
Water diffusivity at 6 °C	3.4E-10 [m ² /s]
Water diffusivity at 13 °C	5.6E-10 [m ² /s]
Water diffusivity at 20 °C	7.8E-10 [m ² /s]
Initial moisture content of unsalted cheese	0.672
Molecular weight of water	0.018 [kg/mol]
Equilibrium salt concentration	5179.79 [mol/m ³]
Convective mass transfer coefficient (salt)	5e-6 [m/s]
Molecular weight of sodium chloride	0.05844 [kg/mol]
Density of cheese	1100 [kg/m ³]
Convective mass transfer coefficient (water)	1e-6 [m/s]
Equilibrium water	38500.00 [mol/m ³]
Osmotic rate constant	1.89e-6 [1/s]

انتقال جرم نمک با سرعت بالایی صورت می گیرد. با گذشت زمان و کاهش گرادیان غلظت، سرعت نفوذ کاهش یافته و منحنی ها به تدریج به حالت تقریباً پایدار نزدیک می شوند. همچنین نتایج نشان می دهد که افزایش دما موجب افزایش میزان جذب نمک در پنیر می شود. در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد بیشترین غلظت نمک در تمام زمان ها مشاهده شده است، در حالی که کمترین مقدار مربوط به دمای ۶ درجه سانتی گراد است. این رفتار را می توان به افزایش

۳- نتایج و بحث

نمودار ۱ تغییرات غلظت نمک در پنیر بر حسب زمان در سه دمای مختلف (۶، ۱۳ و ۲۰ درجه سانتی گراد) نشان می دهد که فرایند نفوذ نمک در طول زمان به صورت افزایشی بوده و در ساعات اولیه با سرعت بیشتری انجام می شود. در ابتدای فرایند آب نمک گذاری، به دلیل اختلاف زیاد غلظت نمک بین محلول آب نمک و سطح پنیر، شیب منحنی ها زیاد بوده و

پنیر بوده و افزایش دما موجب تسريع فرايند نمک‌گيري و رسيدن سريع‌تر به غلظت‌های بالاتر نمک در پنير می‌شود-2]

15]

ضريب نفوذ نمک و کاهش ويسکوزيته محلول با افزايش دما نسبت داد که در نتيجه انتقال جرم را تسهيل می‌کند. به طور کلی، نتايج بيانگر آن است که دما یکی از عوامل مهم در کنترل سرعت و ميزان نفوذ نمک در فرايند آب‌نمک‌گذاري

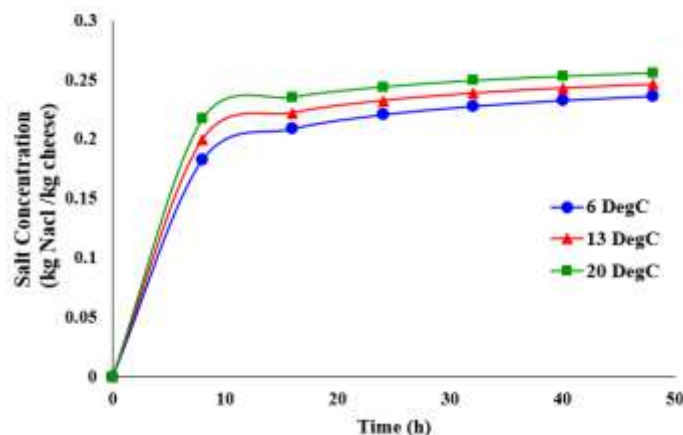
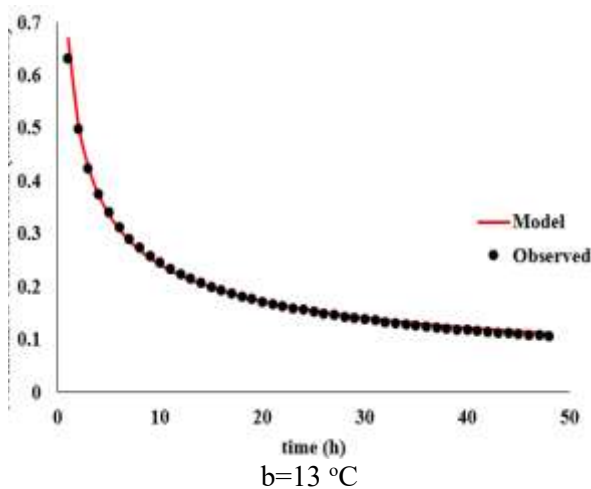
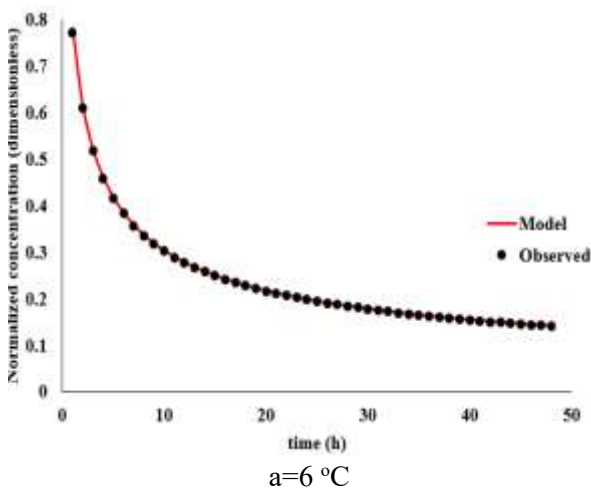


Fig. 1. Salt concentration in cheese as a function of brining time at three temperatures (6, 13, and 20 °C)

تطابق خوبی بين داده‌های تجربی و منحنی‌های مدل در دماهای مختلف مورد بررسی (۶، ۱۳ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد) وجود دارد که بيانگر مناسب بودن مدل نفوذ نیمه‌بی‌نهايت برای توصيف انتقال نمک در طی فرايند آب‌نمک‌گذاري پنير است. بر اين اساس مقدار ضريب نفوذ مؤثر برای سه دمای مذکور به ترتيب $9/2 \times 10^{-11}$ ، $1/5 \times 10^{-11}$ و $2/8 \times 10^{-11}$ متر بر مجذور ثانيه به دست آمد، که افزايش با دما را نشان می‌دهد [12-16].

در گام بعدی، مقدار ضريب نفوذ مؤثر کلريد سدیم (NaCl) در داخل نمونه‌های پنير تعيين شد. بدین منظور، حل تحليلی قانون دوم فيک برای حالت نفوذ یک‌بعدی در محيط نیمه‌بی‌نهايت به کار گرفته شد. سپس مقادير غلظت نرمال‌شده به‌دست‌آمده از داده‌های تجربی با نتايج مدل تحليلی برازش داده شد (شکل ۲) و ضريب نفوذ مؤثر با حداقل‌سازی اختلاف بين داده‌های مشاهده‌شده و مقادير پيش‌بینی‌شده توسط مدل محاسبه گردید. نتايج نشان داد که



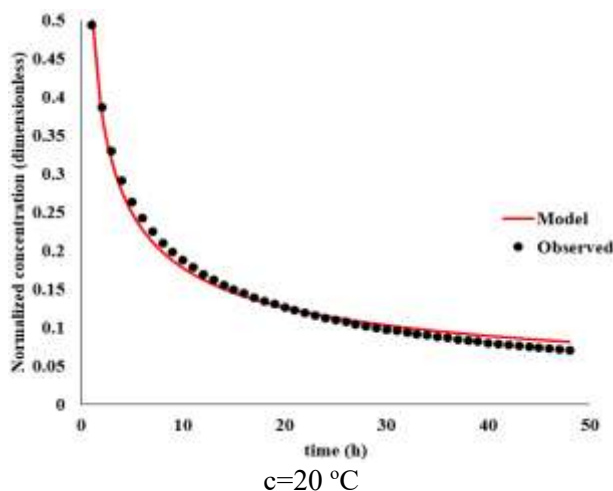


Fig. 2 Experimental and simulated normalized concentration for estimation of the effective diffusion coefficient at three different brining temperatures

6413.1(1/T) + 8.0207 به دست آمد که نشان‌دهنده

وابستگی قابل توجه ضریب نفوذ به دما است. شیب خط به‌دست‌آمده امکان محاسبه انرژی فعال‌سازی فرایند نفوذ را فراهم کرد و مقدار انرژی فعال‌سازی برابر با ۵۳/۳۲ کیلوژول بر مول محاسبه شد. این مقدار بیانگر آن است که با افزایش دما، ضریب نفوذ نمک در ماتریس پنیر افزایش یافته و در نتیجه فرایند نفوذ و انتقال نمک در طی آب‌نمک‌گذاری با سرعت بیشتری انجام می‌شود.

با استفاده از مقادیر ضریب نفوذ مؤثر نمک به‌دست‌آمده در سه دمای ۶، ۱۳ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد، وابستگی دمایی ضریب نفوذ بر اساس معادله آرنیوس (معادله ۲) مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، نمودار $\ln(D)$ بر حسب معکوس دما (کلوین) ترسیم شد که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق این نمودار، رابطه آرنیوسی برای ضریب نفوذ نمک در پنیر به صورت $\ln D = -$

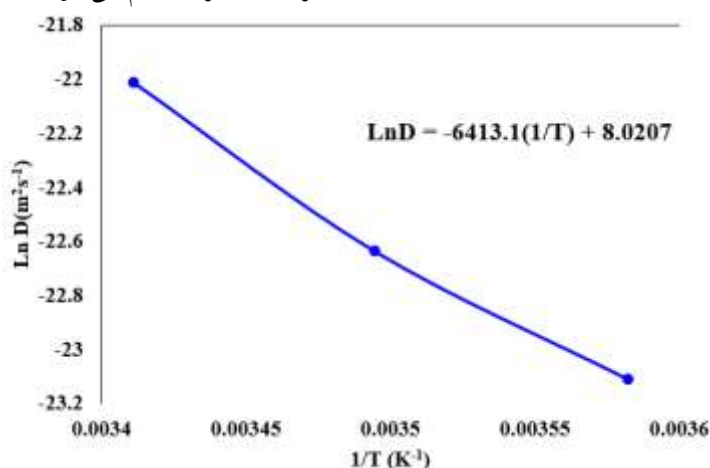


Fig. 3. Temperature Dependence of Salt Diffusivity Predicted by the Arrhenius Equation

در هر دو مدل، رطوبت با گذشت زمان کاهش می‌یابد که ناشی از انتقال جرم و خروج آب از ماتریس پنیر به محیط آب‌نمک است. کاهش رطوبت در ساعات ابتدایی سریع‌تر است که به دلیل گرادیان زیاد غلظت و اختلاف پتانسیل شیمیایی بین پنیر و محلول آب‌نمک می‌باشد. با گذشت زمان و کاهش این گرادیان‌ها، نرخ کاهش رطوبت نیز تدریجاً کمتر

شکل ۴ تغییرات رطوبت پنیر در طول فرایند آب‌نمک‌گذاری را برای دو حالت مدل‌سازی نشان می‌دهد: مدل با ضریب نفوذ ثابت (منحنی‌های مشکی) و مدل کوپل‌شده شامل نفوذ همزمان نمک و آب همراه با اثر اسمزی (منحنی‌های قرمز). نتایج برای سه نقطه درون نمونه ارائه شده‌اند که از ناحیه نزدیک سطح تا بخش‌های عمیق‌تر پنیر را پوشش می‌دهند.

رطوبت در مدل شامل اسمز بیشتر از مدل مبتنی بر دیفوزیون ساده باشد و رفتار فیزیکی واقعی فرایند آب نمک گذاری پنیر بهتر بازنمایی شود [17]. برای ارزیابی دقت پیش بینی مدل ها در مقایسه با داده های تجربی، شاخص های آماری محاسبه گردید. نتایج نشان داد که مدل کوپل شده اسمزی با میانگین ضریب تبیین $R^2=0.98$ و میانگین خطای $RMSE=0.38$ ، تطابق بالاتری نسبت به مدل نفوذ ساده $R^2=0.92$ و $RMSE=1.24$ با داده های تجربی دارد. این بهبود در شاخص های آماری، مؤید این مطلب است که لحاظ کردن فشار اسمزی به عنوان نیروی محرکه جانبی، برای پیش بینی دقیق رفتار دینامیکی انتقال جرم در پنیر ضروری است.

می شود. مقایسه دو مدل نشان می دهد که در حالت در نظر گرفتن کوپل نفوذ نمک و آب (منحنی های قرمز)، مقدار رطوبت در تمام نقاط و در تمام زمان ها کمتر از مدل دیفوزیون ثابت است. این رفتار نشان می دهد که افزودن ترم اسمزی در معادلات انتقال جرم باعث تشدید خروج آب از پنیر شده است. در این حالت، نفوذ نمک از محیط آب نمک به داخل پنیر موجب ایجاد اختلاف فشار اسمزی بین سطح پنیر و محیط اطراف می شود. این اختلاف فشار اسمزی نیروی محرکه ای برای انتقال آب از داخل ماتریس پنیر به سمت محلول آب نمک ایجاد می کند و در نتیجه خروج رطوبت افزایش می یابد. بنابراین در مدل کوپل شده، علاوه بر مکانیزم انتشار رطوبت، اثر اسمز نیز به عنوان یک نیروی محرکه اضافی عمل کرده و باعث تسریع کاهش رطوبت در نمونه می شود. این موضوع سبب می شود که پیش بینی کاهش

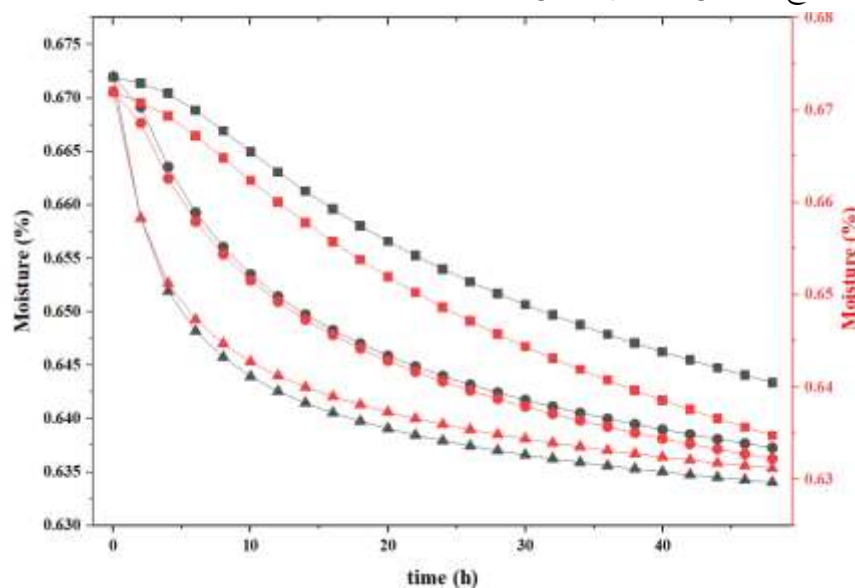


Fig. 4 Moisture content evolution during cheese brining predicted by constant diffusion model and coupled salt-water diffusion model including osmotic effects at different internal positions at 13 °C ($\blacktriangle$ (0.025 m, 0.0025 m) $\bullet$ (0.025 m, 0.005 m) $\blacksquare$ (0.025 m, 0.01 m)).

افزایش در نقاط نزدیک تر به سطح بیشتر است. در نقطه نزدیک به سطح جذب نمک در ساعات اولیه سریع تر رخ می دهد، در حالی که در نقاط عمیق تر افزایش غلظت نمک با تأخیر و به صورت تدریجی اتفاق می افتد که این رفتار بیانگر کنترل فرایند توسط نفوذ مولکولی در داخل ماتریس پنیر است.

نمودار ۵ تغییرات غلظت نمک و رطوبت را در سه موقعیت مختلف داخل نمونه پنیر در طول فرایند آب نمک گذاری نشان می دهد. در این شکل، منحنی های مشکی بیانگر نفوذ نمک در داخل پنیر و منحنی های قرمز نشان دهنده تغییرات رطوبت نمونه هستند. نتایج برای سه نقطه مختلف در داخل نمونه ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، غلظت نمک در تمامی نقاط با گذشت زمان افزایش می یابد، اما سرعت

مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل توسعه یافته، علاوه بر اثر دما، نیروی اسمزی نیز در معادلات انتقال جرم لحاظ شده است (بخش مواد و روش‌ها)، که این امر امکان پیش‌بینی هم‌زمان نفوذ نمک و خروج رطوبت در نقاط مختلف نمونه را فراهم کرده و رفتار واقعی فرایند آب‌نمک‌گذاری پنیر را با دقت مناسبی توصیف می‌کند [18].

در مقابل، تغییرات رطوبت روندی کاهشی را نشان می‌دهد و منحنی‌های قرمز بیانگر خروج آب از بافت پنیر در اثر گرادیان اسمزی بین پنیر و محلول آب‌نمک هستند. کاهش رطوبت در نقاط نزدیک به سطح شدیدتر بوده و با افزایش فاصله از سطح، این کاهش با شیب ملایم‌تری رخ می‌دهد. با توجه به تأیید مدل یک‌بعدی و نتایج معتبرسازی، ضریب نفوذ مؤثر نمک برای سه دما تعیین و در مدل توسعه یافته

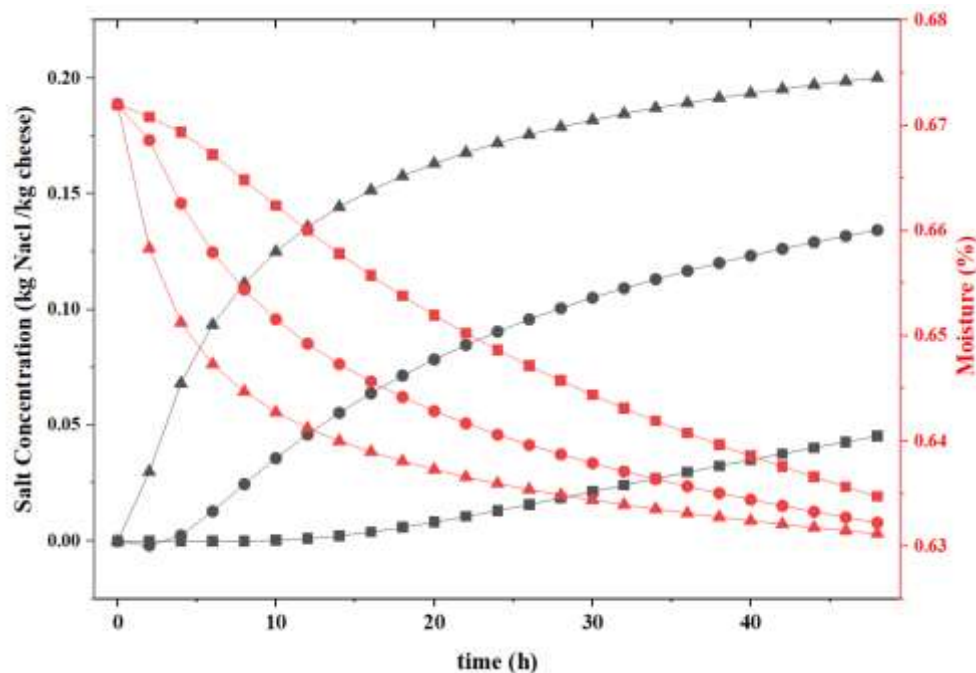


Fig. 5 Salt concentration (black) and moisture content (red) at different internal positions in cheese during brining at 13 °C ($\blacktriangle$ (0.025 m, 0.0025 m) $\bullet$ (0.025 m, 0.005 m) $\blacksquare$ (0.025 m, 0.01 m)).

است که به‌عنوان نیروی محرک اصلی انتقال جرم عمل می‌کند. همچنین اثر دما به‌طور واضح در نمودار قابل مشاهده است؛ به‌طوری‌که در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین مقدار جذب نمک و در دمای ۶ درجه سانتی‌گراد کمترین مقدار مشاهده می‌شود. افزایش دما موجب افزایش ضریب نفوذ مؤثر نمک و در نتیجه تسریع انتقال جرم در داخل ماتریس پنیر می‌شود. به همین دلیل در دماهای بالاتر، مقدار تجمعی نمک در کل سطح نمونه در مدت زمان یکسان بیشتر است. این نتایج نشان می‌دهد که دما یکی از عوامل کلیدی در کنترل سرعت نفوذ نمک و میزان جذب کلی آن در طی فرایند آب‌نمک‌گذاری پنیر محسوب می‌شود [13-16].

نمودار ۶ تغییرات مقدار کل نمک جذب‌شده در پنیر را بر حسب زمان در سه دمای مختلف ۶، ۱۳ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. مقدار کل نمک در هر لحظه زمانی با استفاده از انتگرال‌گیری از توزیع غلظت نمک روی کل سطح مقطع نمونه محاسبه شده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، مقدار کل نمک جذب‌شده با گذشت زمان در هر سه دما به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده ادامه‌دار بودن فرایند نفوذ نمک در داخل بافت پنیر است. در ساعات اولیه، نرخ افزایش نمک بیشتر بوده و سپس با گذشت زمان شیب منحنی‌ها کاهش می‌یابد. این رفتار ناشی از کاهش تدریجی گرادیان غلظت بین محلول آب‌نمک و داخل پنیر

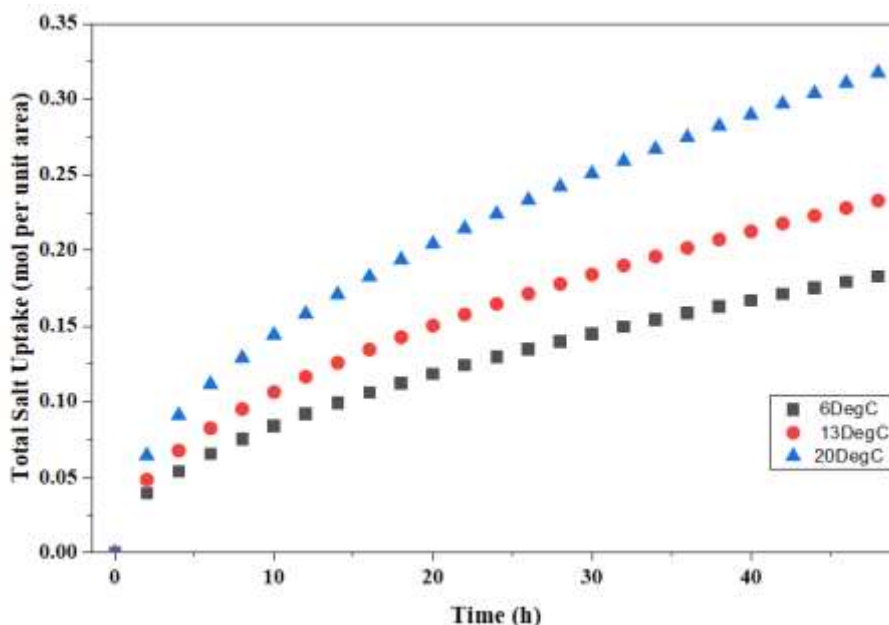


Fig. 6 Total Salt Uptake in Cheese During Brining at Different Temperatures

جرم عمدتاً در جهت عمودی و عمود بر سطح تماس رخ می‌دهد. این امر با فرض نفوذ یک‌بعدی در یک محیط نیمه‌بی‌نهایت همخوانی دارد و نشان می‌دهد که نفوذ از طرفین ناچیز یا محدود به شرایط مرزی خاص بوده است. (۳) تأثیر دما بر سینتیک نفوذ: افزایش دما باعث افزایش انرژی جنبشی مولکول‌ها و در نتیجه افزایش ضریب نفوذ مؤثر (D) طبق رابطه آرنیوس می‌شود. نتایج بصری حاصل از شبیه‌سازی تایید می‌کند که با افزایش دمای فرآیند، سرعت انتقال جرم افزایش یافته و در یک بازه زمانی ثابت (۲۴ ساعت)، نفوذ مؤثرتری در بافت پنیر صورت می‌گیرد. این نقشه‌های دوبعدی به خوبی توانایی مدل را در پیش‌بینی مکانی و زمانی غلظت نمک نشان می‌دهند و ابزار مفیدی برای درک بهتر سینتیک فرآیند و طراحی بهینه زمان‌بندی آب‌نمک‌گذاری در صنعت پنیرسازی هستند [18-19].

شکل ۷، توزیع دوبعدی غلظت نمک را در مقطع پنیر پس از ۲۴ ساعت فرآیند آب‌نمک‌گذاری در سه دمای ۶، ۱۳ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهند. این تصاویر دیدگاه جامعی از نحوه پیشروی جبهه نمک از سطح به سمت عمق پنیر ارائه می‌دهند. بر این اساس، (۱) توزیع غلظت و نفوذ عمقی: در تمامی دماها، بیشترین غلظت نمک (ناحیه قرمز) در مرز پایین (محل تماس با آب‌نمک) مشاهده می‌شود. با حرکت به سمت لایه‌های داخلی (محور y)، رنگ‌ها از قرمز به زرد، سبز و در نهایت آبی تغییر می‌یابند که نشان‌دهنده کاهش تدریجی غلظت نمک است. مقایسه سه تصویر نشان می‌دهد که در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، نوار رنگی ضخامت بیشتری دارد؛ به این معنا که نمک مسافت بیشتری را به سمت مرکز پنیر طی کرده و عمق نفوذ نسبت به دماهای ۶ و ۱۳ درجه به‌وضوح بیشتر است. (۲) خطوط خطوط سفید همراه با پیکان‌ها، جهت شار نفوذ نمک را نشان می‌دهند. عمودی بودن این خطوط بیانگر این است که در این مدل‌سازی، انتقال

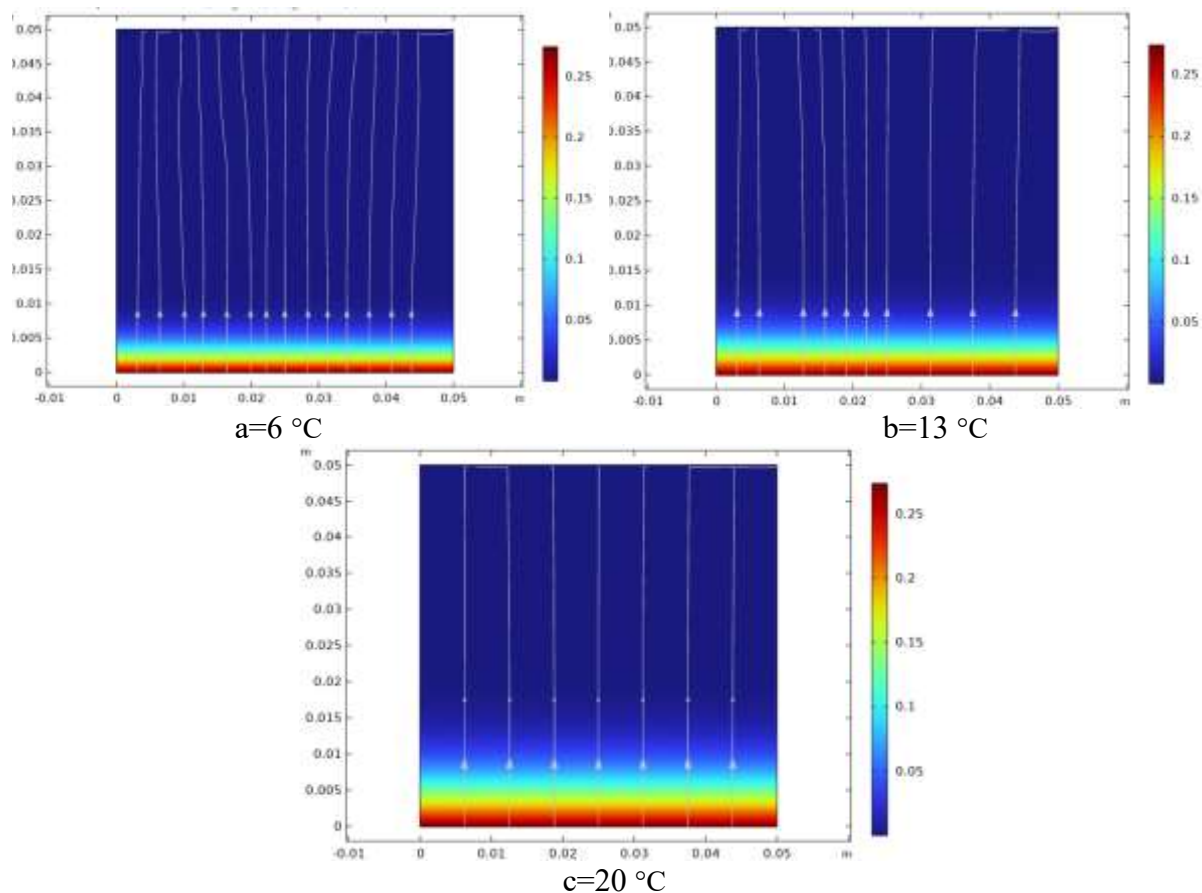


Figure 7. Two-dimensional salt concentration distribution in cheese during brining at different temperatures (6 °C, 13 °C, and 20 °C) after 24 h brining

آب نمک گذاری را با دقت مطلوبی شبیه سازی کند. بنابراین استفاده از چنین مدل هایی می تواند ابزار مؤثری برای بهینه سازی شرایط آب نمک گذاری، کنترل یکنواختی توزیع نمک، تنظیم میزان رطوبت و در نهایت بهبود کیفیت نهایی پنیر در مقیاس صنعتی باشد.

دسترسی به داده ها

مجموعه داده هایی که در طول این مطالعه تولید شده و/یا مورد تحلیل قرار گرفته اند، در صورت درخواست از نویسنده مسئول قابل دریافت هستند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می کنند که هیچ گونه منافع مالی رقابتی شناخته شده یا روابط شخصی که بتواند بر کار گزارش شده در این مقاله تأثیر گذاشته باشد، ندارند.

مشارکت نویسندگان

۴- نتیجه گیری

یافته های این پژوهش نشان داد که فرایند آب نمک گذاری پنیر یک پدیده انتقال جرم وابسته به زمان، دما و شرایط اسمزی است و دما یکی از مهم ترین عوامل مؤثر بر سرعت و میزان جذب نمک در بافت پنیر محسوب می شود. افزایش دما موجب افزایش ضریب نفوذ مؤثر نمک، تسریع نفوذ آن در ماتریس پنیر و در نتیجه افزایش مقدار نمک جذب شده در زمان معین می شود. از سوی دیگر، خروج رطوبت از پنیر نیز همزمان با نفوذ نمک رخ داده و در صورت در نظر گرفتن اثر اسمز، شدت این کاهش رطوبت بیشتر و توصیف فرایند واقعی دقیق تر خواهد بود. همچنین نتایج نشان داد که مدل نفوذ یک بعدی مبتنی بر قانون دوم فیک، در شرایط نیمه بی نهایت، توانایی مناسبی در برآورد ضریب نفوذ مؤثر نمک دارد و مدل توسعه یافته عددی نیز با لحاظ همزمان نفوذ نمک، انتقال آب و اثر اسمزی، می تواند رفتار واقعی فرایند

۵-منابع

- محسن دلوی اصفهان: نظارت، مدیریت پروژه، مفهوم‌پردازی، اعتبارسنجی، نگارش - بازبینی و ویرایش. حمید خفاجه: روش‌شناسی، تحلیل رسمی، گردآوری داده‌ها، نگارش - پیش‌نویس اولیه.
- [1] Bisig W., Arias-Roth, E., Fröhlich-Wyder, M. T., Guggisberg, D., Jakob, E., Sheehan, J. J., & Skeie, S. (2025). Chapter 13 - Salt in Cheese: Physical, Chemical, Biological, and Sensory Aspects—Water Activity☆☆This is a revised and partly newly written version of the previous 4th edition by Timothy P. Guinee and Patrick F. Fox. In P. L. H. McSweeney, P. D. Cotter, D. W. Everett & R. Govindasamy-Lucey (Eds.), *Cheese (Fifth Edition)* (pp. 349-406). San Diego: Academic Press.
- [2] Guinee T. P. (2004). Salting and the role of salt in cheese. *International Journal of Dairy Technology*, 57(2-3), 99-109.
- [3] Luo J., Pan, T., Guo, H. Y., & Ren, F. Z. (2013). Effect of calcium in brine on salt diffusion and water distribution of Mozzarella cheese during brining. *Journal of Dairy Science*, 96(2), 824-831.
- [4] Melilli C., Barbano, D. M., Licitra, G., Tumino, G., Farina, G., & Carpino, S. (2003). Influence of Presalting and Brine Concentration on Salt Uptake by Ragusano Cheese1. *Journal of Dairy Science*, 86(4), 1083-1100.
- [5] Marchetti M. D., Gomez, P. L., Yeannes, M. I., & Garcia Loredó, A. B. (2021). Mathematical modeling of mass transfer kinetics during salting procedures of hake fillets. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(1), e15002.
- [6] Graiver N., Pinotti, A., Califano, A., & Zartzy, N. (2009). Mathematical modeling of the uptake of curing salts in pork meat. *Journal of Food Engineering*, 95(4), 533-540.
- [7] Torres-Baix E., Illana, A., Gou, P., Olmos, A., Arnau, J., & Fulladosa, E. (2024). Modelling of salt uptake for salt content standardization in dry-cured ham. *Meat Science*, 214, 109523.
- [8] Pajonk A. S., Saurel, R., & Andrieu, J. (2003). Experimental study and modeling of effective NaCl diffusion coefficients values during Emmental cheese brining. *Journal of Food Engineering*, 60(3), 307-313.
- [9] Velázquez-Varela J., Fito, P. J., & Castro-Giráldez, M. (2014). Thermodynamic analysis of salting cheese process. *Journal of Food Engineering*, 130, 36-44.
- [10] Santapaola J., Maldonado, S., & Medina, J. L. (2013). NaCl diffusion kinetics in dry salting of goat cheese. *Journal of Food Engineering*, 118(2), 172-177.
- [11] Dalvi M., & Hamdami, N. (2011). Characterization of Thermophysical Properties of Iranian Ultrafiltrated White Cheese: Measurement and Modeling. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 13(1), 67-78.
- [12] Izady L., Hamdami, N., & Mohamadi, A. (2009). Determination of Moisture Diffusivity in Iranian White Cheese During Brining. *JSTNAR*, 13(47), 15. [In Persian]
- [13] Illescas-Chavez E., & Vélez-Ruiz, J. F. (2009). Effect of the Salting Process on the Mass Transfer Kinetics of Manchego-type Cheese. *International Journal of Food Properties*, 12(4), 791-807.
- [14] Dalvi-Isfahan M. (2023). Mathematical modeling for investigating the effect of single-sided flipping on moisture, fat content, and safety of hamburger patty. *Journal of Food Process Engineering*, 46(12), e14450.
- [15] Costa R., Gomes, V., & Gândara, J. F. M. (2021). Modeling mass transfer in brine salting of chickpea. *Heat and Mass Transfer*, 57(9), 1439-1452.
- [16] Nourani M., Hamdami, N., & Nasirpour, A. (2014). Modeling of Involved Phenomena in UF White Cheese Ripening after Dry Salting. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 45(1), 61-72. [In Persian]
- [17] Floury J., Rouaud, O., Le Poullennec, M., & Famelart, M.-H. (2009). Reducing salt level in food: Part 2. Modelling salt diffusion in model cheese systems with regards to their composition. *LWT - Food Science and Technology*, 42(10), 1621-1628.
- [18] Simal S., Sánchez, E. S., Bon, J., Femenia, A., & Rosselló, C. (2001). Water and salt diffusion during cheese ripening: effect of the external and internal resistances to mass

- transfer. *Journal of Food Engineering*, 48(3), 269-275.
- [19] Hofmeister L. C., Souza, J. A. R., & Laurindo, J. B. (2005). Use of dyed solutions to visualize different aspects of vacuum impregnation of Minas cheese. *LWT - Food Science and Technology*, 38(4), 379-386.



Scientific Research

Development and Simulation of a Coupled Salt and Moisture Transfer Model in Cheese Considering the Effects of Temperature and Osmotic Forces

Mohsen Dalvi-Isfahan^{1*}, Hamid Khafajeh²

1-*Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Jahrom University, Jahrom, Iran

2-Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Jahrom University, Jahrom, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 2026/04/19

Review: 2026/06/05

Accepted: 2026/06/06

Keywords:

Brining,

Cheese,

Diffusivity,

Temperature,

Osmotic force,

Numerical simulation

DOI: 10.48311/fsct.2026.119858.83108

*Corresponding Author E-

Dalvi@jahromu.ac.ir,
mohsen.Dalvi@gmail.com

Salting is a critical step in cheese production, contributing to microbial safety, shelf life, texture, and flavor development. In this study, salt uptake during the brining process was investigated using both experimental measurements and modeling approaches. The chemical composition of cheese samples was first determined. The effective diffusion coefficient of salt at different temperatures was then calculated using Fick's second law. To more accurately describe the brining process, an extended numerical model incorporating simultaneous salt and water transport as well as osmotic effects was developed and simulated. Results showed that salt concentration in cheese increases over time, with the highest rate of uptake occurring in the early stages due to strong concentration gradients. As brining progresses, the rate of diffusion decreases. Temperature had a significant impact: increasing the temperature from 6 to 20 °C led to higher effective diffusion coefficients and greater overall salt uptake. The temperature dependence of diffusivity followed the Arrhenius relationship, yielding an activation energy of 53.32 kJ/mol. Numerical simulations demonstrated that incorporating osmotic forces provides a more realistic prediction of moisture loss and the coupled spatial distribution of salt and water within the cheese matrix. Two-dimensional concentration maps further confirmed that higher temperatures promote deeper salt penetration over a fixed brining duration.