

تعیین ضریب نفوذ رطوبت در پنیر سفید ایرانی طی مرحله آب نمک گذاری

لیلا ایزدی نجف آبادی^{۱*}، ناصر همدی^۱ و سید ابوالقاسم محمدی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۵/۱۱/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۱۰/۳۰)

چکیده

میزان رطوبت و فعالیت آبی تعیین کننده فعالیت میکروبی و آنزیمی در نقاط متفاوت در داخل پنیر و به تبع آن کیفیت محصول نهایی است. یکی از اصلی ترین پارامترهای انتقال جرم، ضریب نفوذ (D) می باشد. در این مطالعه به منظور پیش بینی تغییرات مقدار رطوبت در لایه های پنیر طی آب نمک گذاری پنیر سفید ایرانی، ضریب نفوذ ثابت و متغیر آب با استفاده از داده های آزمایشگاهی غلظت-فاصله در نمونه های مکعب مستطیل شکل و با اطمینان از انتقال جرم نیمه محدود و یک بعدی در محلول آب نمک اشباع در دماهای مختلف (۶، ۱۴، ۱۹ و ۲۴ °C) در زمان های آب نمک گذاری ۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت برآورد گردید. نتایج نشان داد که با افزایش دما و مقدار رطوبت، ضریب نفوذ آب افزایش می یابد. برای توصیف اثر دما روی ضریب نفوذ متغیر از رابطه آرنیوس استفاده گردیده و در پایان یک رابطه ریاضی ساده برای توصیف تغییرات ضریب نفوذ مؤثر آب به عنوان تابعی از دما و غلظت ارائه شد. مقایسه مقادیر ضرایب نفوذ پیش بینی شده توسط رابطه مذکور با ضرایب نفوذ آزمایشگاهی نشان داد که هم بستگی بالایی مابین آنها وجود دارد.

واژه های کلیدی: پنیر، آب نمک گذاری، انتقال جرم، ضریب نفوذ آب

مقدمه

انتقال جرم در مواد غذایی از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از مثال های مهم انتقال جرم در فرایند مواد غذایی، خروج رطوبت از پنیر در طی غوطه وری پنیرهای قالب گیری شده در محلول آب نمک است (جذب نمک از محلول آب نمک توسط پنیر و خروج هم زمان آب از پنیر). نیروی محرکه اصلی این فرایند اختلاف فشار اسمزی بین فاز آبی پنیر و محلول آب نمک است. شناخت جامع از سینتیک جذب نمک و افت رطوبت پنیر و توانایی برای پیش بینی پروفیل های غلظت نمک و آب در داخل پنیر در طی مرحله آب نمک گذاری دارای اهمیت

فراوانی است زیرا غلظت های محلی (Local) تعیین کننده فعالیت میکروبی و آنزیمی در نقاط متفاوت در داخل پنیر و به تبع آن کیفیت محصول نهایی می باشند. در محاسبات مهندسی معمول، استفاده از یک ضریب نفوذ میانگین برای محاسبه انتقال رطوبت در کل ماده کافی می باشد. اما برای محاسبات دقیق تر در فرایندهایی مانند خشک کردن اسمزی و آب نمک گذاری، اطلاع از توزیع رطوبت در محصول در طی فرایند برای کنترل فرایند و حفظ کیفیت ماده غذایی ضروری است و نیاز به یک ضریب نفوذ متغیر می باشد. اندازه گیری میزان رطوبت محلی (Local) و مقدار مواد محلول

۱. به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و استادیار علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. دانشیار زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: l_izady@yahoo.com

برطرف شده است (۲).

هیچ روش استاندارد برای ارزیابی ضریب نفوذ وجود ندارد و انتخاب روش آزمایشی بستگی به نیازها و امکانات آزمایشگاهی دارد. منحنی غلظت - فاصله یک روش ساده و ارزان است که می‌تواند اطلاعات زیادی در مورد حرکت آب و دیگر مواد محلول در نمونه در اختیار ما قرار دهد. ضریب نفوذ می‌تواند از داده‌های آزمایشی با استفاده از حل عددی یا آنالیتیک قانون دوم Fick به دست آید (۲).

بررسی منابع نشان می‌دهد که مطالعات آزمایشگاهی گوناگونی در ارتباط با انتقال نمک و رطوبت در انواع متفاوت پنیر طی آب نمک‌گذاری انجام شده است: پنیر Fynbo (۱۹)، پنیر Cuartiolo (۹)، پنیر Romano (۶)، پنیر Feta (۱۷ و ۱۸)، پنیر چدار (۱۲)، و برای پنیر Emmental (۱۰ و ۱۳). بررسی روش‌های جدید آب نمک‌گذاری پنیر همانند آب نمک‌گذاری تحت خلأ (۵)، آب نمک‌گذاری تحت فشار (۱۱) و آب نمک‌گذاری تحت اولتراسوند (۱۵) نیز در سال‌های اخیر مورد مطالعه قرار گرفته است.

در بسیاری از مطالعات انجام شده روی فرایند نفوذ نمک و آب در پنیر با استفاده از قانون دوم Fick، ضریب نفوذ ثابت فرض گردیده و به صورت مجزا برای نمک و آب در کل پنیر برآورد شده است (۴، ۶، ۹، ۱۰، ۱۲، ۱۸ و ۱۹).

ضریب نفوذ مؤثر نمک در فاز آبی پنیر با در نظر گرفتن انتقال جرم هم‌زمان آب و نمک فقط در چند تحقیق معدود تعیین گردیده که در اکثر آنها نیز ضریب نفوذ مؤثر ثابت فرض شده است. وجود مقادیر ضریب نفوذ مؤثر متفاوت در زمان‌های آب نمک‌گذاری مختلف در شرایط یکسان دلالت بر این دارد که نمی‌توان این ضریب را ثابت فرض نمود و ضریب نفوذ به غلظت و دما وابسته می‌باشد (۱۳، ۱۴ و ۱۷).

نتایج بررسی منابع نشان می‌دهد که مطالعه منتشر شده‌ای در این زمینه روی پنیرهای تولیدی در کشور انجام نشده است و از طرف دیگر در بسیاری از مطالعات قبلی که در سایر کشورها روی پدیده نفوذ نمک و آب در داخل پنیر با استفاده از قانون

به‌عنوان تابعی از موقعیت مکانی در محصول طی آب نمک‌گذاری می‌تواند برای اندازه‌گیری ضریب نفوذ رطوبت و مواد جامد محلول استفاده شود. این ضرایب برای پیش‌بینی زمان لازم جهت به‌دست آوردن ترکیب مناسب (نمک و رطوبت) در محصول و یا ترکیب محصول پس از مدت زمان مشخص استفاده می‌شود. دامنه مقادیر منتشر شده برای ضریب نفوذ رطوبت در فراورده‌های غذایی نسبتاً وسیع می‌باشد (در محدوده 10^{-12} تا $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ با یک توزیع نسبتاً نرمال).

دلایل این نوسان عبارت‌اند از:

- روش اندازه‌گیری انتخاب شده برای تعیین ضریب نفوذ رطوبت
- نحوه تیمار داده‌ها (حل معادله Fick با استفاده از روش‌های تحلیلی یا عددی، احتساب تغییر حجم، فرض ضریب نفوذ به‌صورت ثابت یا متغیر)
- تنوع و تفاوت فراورده‌های غذایی (ترکیب شیمیایی، بافت و ...).

معمول‌ترین روش‌های مورد استفاده جهت تعیین ضریب نفوذ رطوبت در مواد غذایی جامد عبارت‌اند از (۲):

۱. روش‌های مبتنی بر تعیین نفوذپذیری (Permeation method)
۲. روش‌های مبتنی بر ایزوترم‌های جذب و دفع (sorption isotherms) و داده‌های خشک کردن
۳. روش‌های مبتنی بر منحنی غلظت - فاصله

با توجه به استفاده از روش آخر در مطالعه حاضر، به شرح آن در زیر پرداخته می‌شود:

روش مبتنی بر داده‌های غلظت - فاصله شامل تعیین پروفیل غلظت در زمان t در نمونه به‌عنوان تابعی از فاصله در طول یک فرایند نفوذ ناپایای یک بعدی می‌باشد. این روش می‌تواند برای حرکت رطوبت و یا مواد جامد محلول به‌کار رود. مشکل اصلی در کاربرد این روش به مرحله برش دادن نمونه مربوط می‌شود که اخیراً با روش‌های غیر تخریبی اندازه‌گیری پروفیل غلظت مثل MRI (Magnetic Resonance Imaging) این مشکل نیز

دوم Fick انجام شده ضریب نفوذ ثابت فرض گردیده است (۴)، ۶، ۹، ۱۰، ۱۲، ۱۸ و ۱۹).

لذا اهداف تحقیق حاضر عبارت بودند از:

- تعیین ضریب نفوذ جرمی مؤثر آب در داخل پنیر با استفاده از روش غلظت - فاصله
- تعریف یک رابطه ریاضی ساده برای توصیف تغییرات ضریب نفوذ مؤثر آب به عنوان تابعی از دما و غلظت

مواد و روش ها

تهیه نمونه

پنیر سفید ایرانی تولید شده توسط کارخانه پگاه گلپایگان برای انجام مراحل آزمایشی استفاده شد. نمونه های پنیر مورد استفاده در این پژوهش مستقیماً از خط تولید قبل از مرحله آب نمک گذاری برداشت گردیدند.

آماده سازی نمونه و به دست آوردن داده های غلظت - فاصله

بعد از نمونه برداری، نمونه های پنیر به سرعت به قطعات مکعب مستطیل با ابعاد $4 \times 7 \times 10$ سانتی متر بریده شده و سپس سریعاً توسط پارافین جامد ذوب شده پوشش داده شدند. پوشش پارافینی مانع خروج رطوبت از پنیر و سفت شدن نمونه ها می شود و امکان انتقال جرم (نمک و رطوبت) یک بعدی را فراهم می نماید. نمونه های آماده شده همراه با محلول آب نمک تهیه شده به مدت ۱۸ ساعت قبل از شروع آزمایش در دمای مورد نظر قرار داده شدند تا در آن دما به تعادل برسند. محلول آب نمک فوق اشباع به منظور ثابت نگه داشتن غلظت نمک در محلول آب نمک در طول مدت آزمایش (به طور تقریبی 340 g/l) تهیه شده و به میزان 300 mg/l کلرید کلسیم به آن اضافه شد. pH این محلول با استفاده از اسید لاکتیک روی $\text{pH}=5$ تنظیم گردید. مقدار آب نمک تهیه شده تقریباً ۵ برابر حجم نمونه های پنیر بود (۱۳).

برای به دست آوردن داده های غلظت - فاصله، آزمایش آب

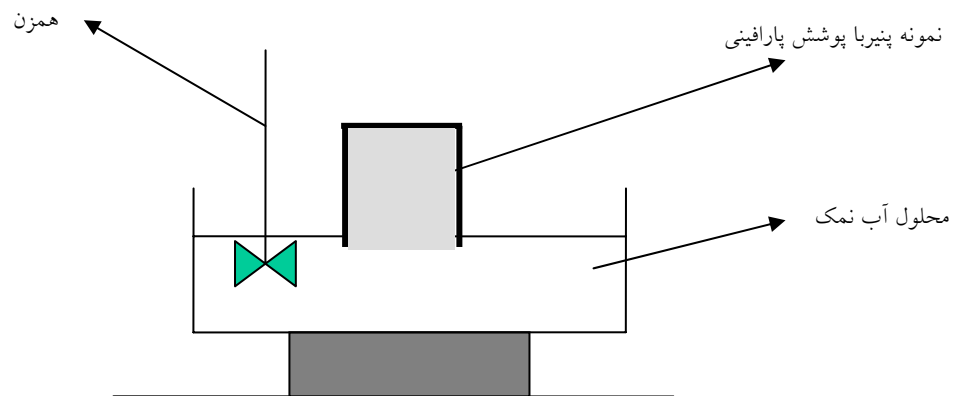
نمک گذاری در چهار دمای متفاوت (24°C و ۱۹، ۱۴، ۶) و در سه سطح زمان آب نمک گذاری (۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت) در سه تکرار در داخل انکوباتور انجام گرفت. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود، نمونه های پنیر پس از برداشتن لایه پارافینی از روی یک سطح آن روی سطح آب نمک با استفاده از یک صفحه مشبک سیمی شناور شدند تا انتقال نمک به صورت یک بعدی صورت گیرد. محلول آب نمک طی آزمایش آب نمک گذاری به منظور حفظ شرایط مرزی یک نواخت به طور آرام همزده شد. در پایان زمان آب نمک گذاری (۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت)، نمونه های پنیر از محلول آب نمک خارج شده و لایه پارافینی روی آنها حذف گردید. سپس سطح در تماس با آب نمک با مقداری آب مقطر شستشو داده شد و با کاغذ صافی خشک گردید. پس از آن نمونه پنیر به صورت ورقه هایی با ضخامت تقریباً ۲ میلی متر برش داده شد. هر ورقه پنیر جهت جلوگیری از خروج رطوبت سریعاً داخل کیسه پلی اتیلنی که قبلاً شماره گذاری شده بود تا زمان اندازه گیری رطوبت و نمک آن قرار گرفت (۸ و ۱۳).

مقدار رطوبت ورقه های پنیر پس از خشک شدن در 105°C به مدت ۲۴ ساعت و ثابت شدن وزن با استفاده از ترازویی با دقت 0.001 گرم اندازه گیری شد (۱). میزان نمک نمونه ها با روش موهر تعیین گردید (۱).

در پایان منحنی های غلظت رطوبت و نمک نمونه های پنیر به ترتیب بر حسب کیلوگرم رطوبت در هر متر مکعب پنیر و کیلوگرم نمک در هر متر مکعب پنیر به عنوان تابعی از فاصله ورقه برش داده شده تا سطح تماس با محلول آب نمک اشباع رسم گردیدند (۱۳).

تعیین ضریب نفوذ ثابت

ضریب نفوذ (diffusivity) با استفاده از داده های منحنی غلظت - فاصله برآورد شد. به طور کلی نفوذ در حالت ناپایای یک ترکیب را می توان با استفاده از قانون دوم فیک توصیف



شکل ۱. سیستم تجهیزات مورد استفاده برای آب نمک گذاری در داخل انکوباتور

نمود (۳):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad [1]$$

که در آن D ضریب نفوذ ظاهری و $\partial C / \partial x$ گرادیان غلظت آب یا نمک را نشان می‌دهد.

هنگامی که پنیر به عنوان یک ماده جامد نیمه محدود در نظر گرفته شود که در تماس با ماده حل شونده یعنی محلول نمک با یک غلظت ثابت C_s باشد، حل آنالیتیکی معادله ۱ با فرض شرایط زیر:

$$\begin{aligned} t = 0, \quad x \geq 0 \quad C &= C_0 \\ t > 0, \quad x = 0 \quad C &= C_s, \quad x \rightarrow \infty \quad C = C_0 \end{aligned}$$

منتج به رابطه زیر می‌گردد (۳):

$$\frac{C_s - C}{C_s - C_0} = \text{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad [2]$$

که در آن C غلظت آب در پنیر در زمان t و فواصل مختلف از سطح پنیر (x) می‌باشد. C_0 مقدار اولیه رطوبت در نمونه پنیر است و C_s غلظت ثابت آب در محلول آب نمک است. نمونه پنیر زمانی به عنوان یک ماده نیمه محدود در نظر گرفته می‌شود که عدد فوریر کمتر از ۰/۰۵ باشد ($Fo = \frac{Dt}{l^2} < 0.05$) و در واقع شرایط آزمایش باید صحیح انتخاب گردد. l ضخامت پنیر است که نفوذ در آن جهت انجام می‌گیرد.

مقدار D در دماها و زمان‌های مختلف آب نمک گذاری با استفاده از داده‌های آزمایشی غلظت - فاصله و معادله ۲ توسط

روش اپتیموم سازی در نرم افزار MATLAB تعیین شد. در این روش با داشتن مقادیر تجربی مقادیر رطوبت و رابطه موجود مناسب ترین مقدار D تعیین گردید.

تعیین ضریب نفوذ متغیر

در قانون دوم فیک، مقدار D تنها تابعی از غلظت می‌باشد. با در نظر گرفتن نمونه به صورت ایزوترمال و نیمه محدود و با تغییر متغیر می‌توان پروفیل‌های غلظت را به عنوان تابعی از متغیر

جدید ($\xi = \frac{x}{\sqrt{t}}$ Boltzman variable) توصیف نمود (۳):

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{\sqrt{t}} \frac{dC}{d\xi} \quad [3]$$

و

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{x}{4t^{3/2}} \frac{dC}{d\xi} \quad [4]$$

و سپس

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D}{\sqrt{t}} \frac{\partial C}{\partial \xi} \right) = \frac{1}{4t} \frac{d}{d\xi} \left(D \frac{dC}{d\xi} \right) \quad [5]$$

و سرانجام

$$-2\xi \frac{dC}{d\xi} = \frac{d}{d\xi} \left(D \frac{dC}{d\xi} \right), \quad [6]$$

با در نظر گرفتن شرایط اولیه و مرزی زیر:

$$C = C_0, \quad x > 0, \quad t = 0$$

$$C = C_s, \quad x = 0, \quad t > 0$$

می‌توان مقدار D را چنین محاسبه نمود:

رابطه آرنیوس بیان نمود (۸).

نتایج و بحث

شکل ۲ میانگین توزیع غلظت های آب و نمک را در نمونه های پنیر در دمای 19°C برای زمان های آب نمک گذاری مختلف نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش زمان آب نمک گذاری، غلظت نمک افزایش یافته و مقدار رطوبت کاهش می یابد.

شکل ۳ منحنی غلظت - فاصله را در دماهای مختلف پس از ۲۴ ساعت آب نمک گذاری نشان می دهد. با افزایش دما، نفوذ غیر هم جهت آب و نمک افزایش می یابد. دما با اثر بر روی فاکتورهای ذاتی بازدارنده نفوذ در پنیر (همانند کاهش ویسکوزیته فاز آبی پنیر و مقدار آب متصل شده به شبکه پروتئین) میزان نفوذ و به تبع آن ضریب نفوذ را افزایش می دهد (۷).

ضرایب نفوذ ثابت و متغیر آب به روش هایی که توضیح داده شد، محاسبه شدند.

تعیین ضریب نفوذ ثابت

مقادیر ضرایب نفوذ ثابت آب برآورد شده با استفاده از داده های غلظت - فاصله در جدول ۱ نشان داده شده است. دامنه تغییر ضریب نفوذ ثابت آب در دماها و زمان های آب نمک گذاری متفاوت در محدوده 10^{-10} تا 10^{-3} m^2/s می باشد. مقایسه داده های موجود در این جداول نشان می دهد که با افزایش دما و زمان آب نمک گذاری مقدار ضریب نفوذ ثابت آب تغییر می کند. بنابراین نیاز به تعیین ضریب نفوذ متغیری به عنوان تابعی از غلظت و دما کاملاً محسوس است.

تعیین ضریب نفوذ متغیر آب

برای تعیین ضریب نفوذ متغیر آب، منحنی های متغیر بولتزمن در مقابل مقدار رطوبت در دماهای مختلف رسم گردیدند

$$D_i = -2 \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)_{C_0}^{C_i} \int \xi \partial C \quad [7]$$

زمانی که منحنی متغیر بولتزمن به عنوان تابعی از مقدار آب رسم شود (master curve)، شیب این منحنی معادل قسمت اول معادله ۷ یعنی $\frac{\partial \xi}{\partial x}$ ، و سطح زیر منحنی از نقطه C_0 تا C_i برابر با قسمت دوم معادله یعنی $\int_{C_0}^{C_i} \xi \partial C$ می شود. با به کار بردن این روش برای مقادیر متفاوت C_i امکان محاسبه D به عنوان تابعی از غلظت $D=f(C)$ وجود دارد. با برنامه نویسی در MATLAB، شیب و سطح زیر منحنی در مقادیر متفاوت رطوبت جهت محاسبه D در دماهای متفاوت برآورد گردید.

تعیین اثر دما بر ضریب نفوذ

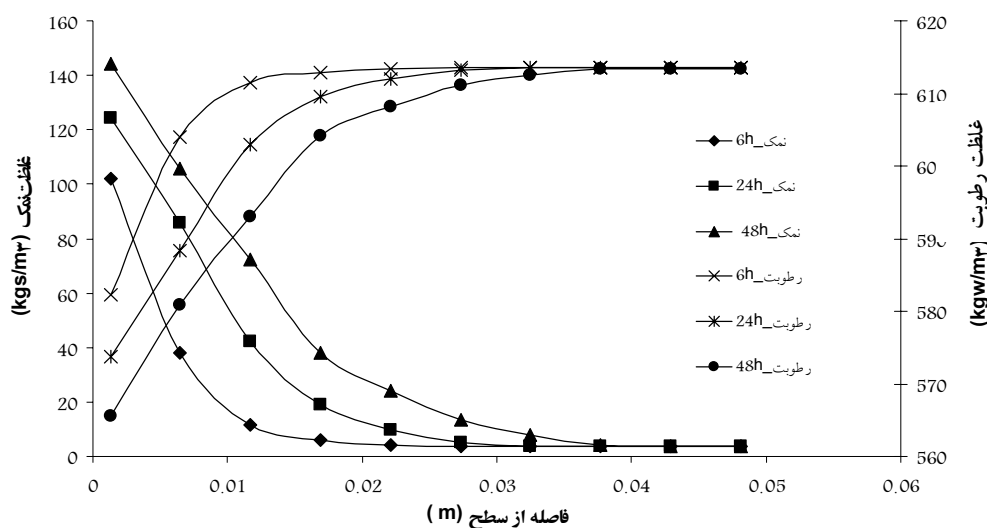
دما تأثیر قابل توجهی بر سرعت نفوذ و بنابراین ضریب نفوذ دارد. در این تحقیق علاوه بر بررسی اثر غلظت، تأثیر دما به عنوان فاکتور مؤثر بر ضریب نفوذ نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

تغییرات ضریب نفوذ با دما به طور کلاسیک با استفاده از رابطه آرنیوس (Arrhenius relationship) نشان داده می شود:

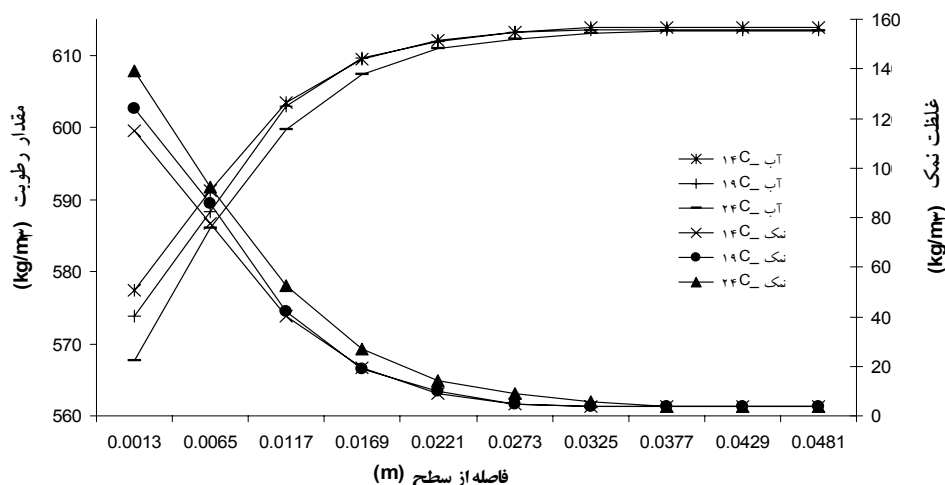
$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad [8]$$

در این معادله E_a (J/mol) انرژی اکتیواسیون می باشد که بیشتر به خصوصیات شیمیایی ماده مورد نظر بستگی دارد (۸ و ۱۶)، در حالی که D_0 (m^2/s) فاکتور pre-exponential است که بستگی به ویژگی های فیزیکی ماده مورد آزمایش دارد. R (8/314510 J/(mol. °K)) ثابت عمومی گازها بوده و T (°K) دمای مطلق می باشد.

مقادیر انرژی اکتیواسیون و D_0 را می توان از رسم منحنی $\ln(D)$ به عنوان تابعی از $1/T$ به دست آورد. شیب این منحنی خطی برابر با $-E_a/R$ و عرض از مبدأ آن معادل با $\ln(D_0)$ است. بدین ترتیب می توان رابطه E_a و D_0 را به عنوان تابعی از غلظت به دست آورد و ضریب نفوذ آب را به عنوان تابعی از دو فاکتور دما و غلظت با استفاده از



شکل ۲. نمودار غلظت - فاصله برای آب و نمک در نمونه‌های پنیر بر مبنای مقادیر میانگین سه تکرار در پایان زمان آب نمک‌گذاری (۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت) در 19°C



شکل ۳. نمودار غلظت - فاصله برای آب و نمک در نمونه‌های پنیر بر مبنای مقادیر میانگین سه تکرار در پایان ۲۴ ساعت آب نمک‌گذاری در دماهای مختلف

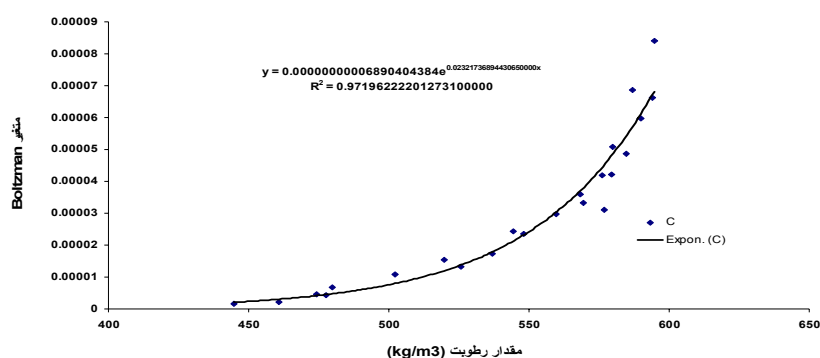
$$\xi_w = a \exp^{b.C_{i,w}} \quad [9]$$

شکل ۵ تغییرات ضرایب نفوذ متغیر برآورد شده با استفاده از معادله ۷ بر مبنای سطح زیر منحنی $(\int_0^C \xi_i \partial C)$ و شیب منحنی متغیر بولتزمن-مقدار رطوبت در دماهای متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دما و میزان رطوبت، ضریب نفوذ افزایش می‌یابد. این

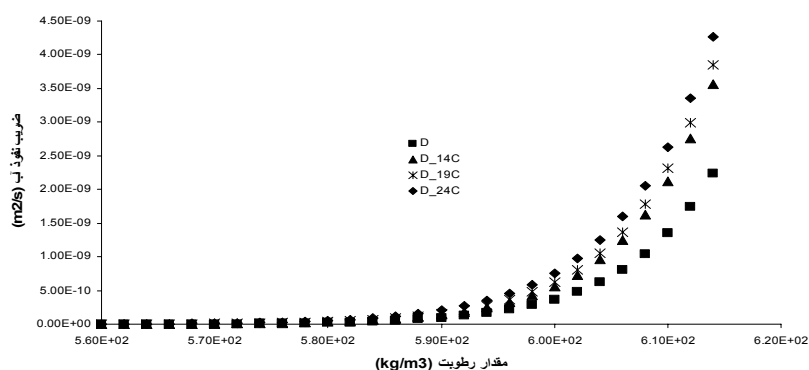
(master curves). شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش رطوبت مقدار ξ افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر رطوبت در لایه‌های نزدیک به سطح و در زمان‌های آب نمک‌گذاری طولانی‌تر (مقدار ξ کوچک‌تر)، کمتر خواهد بود. منحنی تغییرات متغیر بولتزمن به عنوان تابعی از میزان رطوبت پنیر از معادله زیر پیروی می‌نماید (شکل ۴):

جدول ۱. میانگین مقادیر ضرایب نفوذ ثابت برآورد شده برای آب در دماها (24°C و 19°C و 14°C و 6°C) و زمان‌های آب نمک گذاری مختلف (۶، ۲۴، ۴۸ ساعت)

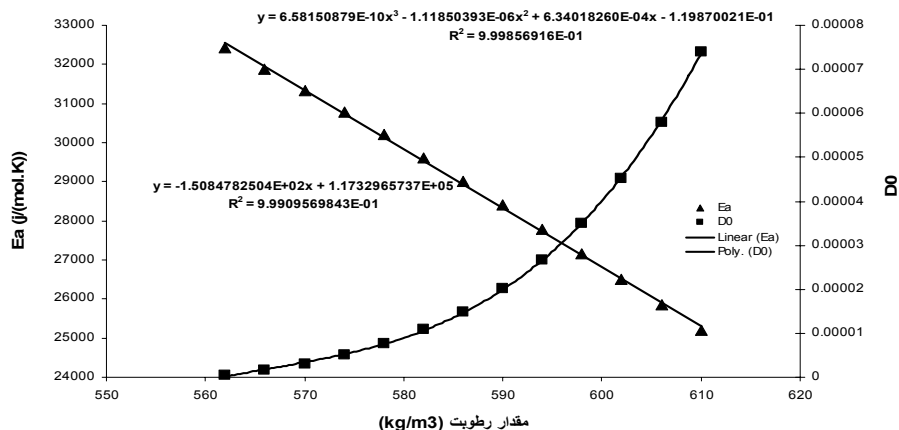
دما ($^{\circ}\text{C}$)	زمان (h)	ضریب نفوذ آب (m^2/s)	انحراف معیار (m^2/s)
۶	۶	$3/00 \times 10^{-11}$	$4/34 \times 10^{-19}$
۶	۲۴	$4/33 \times 10^{-11}$	$3/21 \times 10^{-11}$
۶	۴۸	$7/33 \times 10^{-11}$	$2/89 \times 10^{-11}$
۱۴	۶	$4/00 \times 10^{-11}$	$1/00 \times 10^{-19}$
۱۴	۲۴	$4/00 \times 10^{-11}$	$5/20 \times 10^{-11}$
۱۴	۴۸	$1/53 \times 10^{-11}$	$1/27 \times 10^{-10}$
۱۹	۶	$5/00 \times 10^{-11}$	$1/00 \times 10^{-11}$
۱۹	۲۴	$7/67 \times 10^{-11}$	$2/08 \times 10^{-11}$
۱۹	۴۸	$9/67 \times 10^{-11}$	$5/77 \times 10^{-12}$
۲۴	۶	$5/33 \times 10^{-11}$	$5/77 \times 10^{-12}$
۲۴	۲۴	$1/33 \times 10^{-11}$	$5/77 \times 10^{-11}$
۲۴	۴۸	$1/67 \times 10^{-10}$	$5/77 \times 10^{-11}$



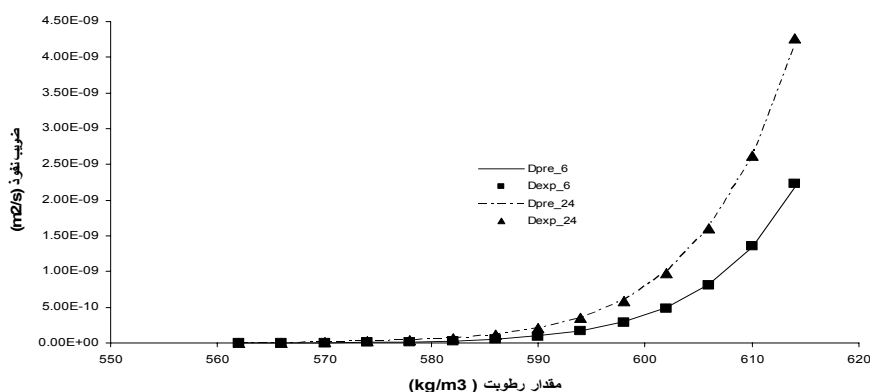
شکل ۴. منحنی تغییرات متغیر بولتزمن در مقابل مقدار رطوبت در 24°C (master curve)



شکل ۵. تغییرات ضریب نفوذ آب محاسبه شده به روش بولتزمن به عنوان تابعی از میزان آب در دماهای متفاوت



شکل ۶. منحنی تغییرات E_a و D_0 به عنوان تابعی از میزان رطوبت



شکل ۷. مقایسه مقادیر ضریب نفوذ پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده به عنوان تابعی از میزان رطوبت در دماهای متفاوت

نتایج منطبق با گزارش‌های پاژونک و همکاران (۱۳) و سبتي و

از رابطه زیر استفاده نمود:

$$E_a = -150/8478 C_i + 117329/6574$$

همکاران (۱۴) است.

$$D_0 = 6/5815 \times 10^{-10} C_i^3 - 1/1185 \times 10^{-6} C_i^2$$

$$+ 0/0006 C_i + 0/1199$$

اثر دما بر ضریب نفوذ

بدین ترتیب می‌توان برای پیش‌بینی ضریب نفوذ پنیر در هر دما و میزان رطوبت خواسته شده، ابتدا مقادیر E_a و D_0 را با استفاده از رابطه بالا در مقدار رطوبت (C_i) مورد نظر محاسبه نمود و سپس با استفاده از رابطه آرنیوس، مقدار ضریب نفوذ را در دمای خواسته شده پیش‌بینی نمود.

شکل ۷ مقایسه مقادیر ضریب نفوذ پیش‌بینی شده با استفاده از روابط مذکور با مقادیر تجربی (برآورد شده با روش بولتزمن)

برای توصیف وابستگی دمایی ضریب نفوذ رطوبت پنیر از رابطه آرنیوس استفاده گردید. شکل ۶ منحنی تغییرات ضرایب رابطه آرنیوس (E_a و D_0) را به عنوان تابعی از میزان رطوبت پنیر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار رطوبت، انرژی اکتیواسیون کاهش و مقدار D_0 افزایش می‌یابد. برای توصیف تغییرات ضرایب رابطه آرنیوس (E_a و D_0) به عنوان تابعی از میزان رطوبت پنیر (C_i)، می‌توان

و $^{\circ}\text{C}$ زمان های آب نمک گذاری ۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت، ضریب نفوذ جرمی ثابت آب در داخل پنیر با استفاده از روش غلظت-فاصله برآورد گردید. نتایج نشان داد که ضریب نفوذ نمک با افزایش دما و زمان آب نمک گذاری به طور معنی داری افزایش می یابد. مقادیر ضرایب نفوذ ثابت برآورد شده برای آب در محدوده $10^{-10} \times 0/3 \text{ m}^2/\text{s}$ تا $10^{-10} \times 1/67 \text{ m}^2/\text{s}$ بود.

در مرحله بعد ضریب نفوذ متغیر آب به عنوان تابعی از غلظت آب و دما با استفاده از روش بولتزمن برآورد گردید و سپس یک رابطه ریاضی ساده برای توصیف تغییرات ضریب نفوذ مؤثر آب به عنوان تابعی از دما و غلظت تعریف گردید. ضرایب نفوذ پیش بینی شده توسط این رابطه مطابقت خوبی با ضرایب تجربی به دست آمده از روش بولتزمن داشتند و به طور کلی با افزایش دما ضریب نفوذ آب افزایش پیدا می کند.

را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود انطباق و همبستگی خوبی مابین مقادیر ضریب نفوذ پیش بینی شده و اندازه گیری شده وجود دارد ($r > 0/99$). بنابراین می توان مقدار ضریب نفوذ آب (D) را برای هر مقدار رطوبت و در هر دمایی با استفاده از روابط توسعه داده شده پیش بینی نمود.

نتیجه گیری

مطالعه انتقال رطوبت در داخل پنیر طی آب نمک گذاری پنیر سفید ایرانی، که یکی از دو پنیر صنعتی عمده تولیدی در داخل کشور می باشد، می تواند ما را در تعیین پروفیل های غلظت آب طی فرایند آب نمک گذاری و پیش بینی فعالیت میکروبی و آنزیمی در پنیر کمک نماید. ضریب نفوذ، یکی از اصلی ترین پارامترهای انتقال جرم است.

در راستای این تحقیق پس از تعیین آزمایشگاهی پروفیل های غلظت-فاصله برای آب در دماهای ۶، ۱۴، ۱۹ و ۲۴

منابع مورد استفاده

1. A.O.A.C. 1996. Official methods of analysis of AOAC international. In: P. Cunniff (Ed.), AOAC International, Maryland.
2. Boudhrioua N., C. Bonazzi and J.D. Daudin. 2003. Estimation of moisture diffusivity in gelatin-starch gels using time-dependent concentration-distance curves at constant temperature. Food Chem. 82: 139-149.
3. Crank, J. 1975. The Mathematics of Diffusion. Oxford University Press., London.
4. Geurts, T. J., P. Walstra and H. Mulder. 1974. Transport of salt and water during salting of cheese. 1. Analysis of of the process involved. Netherlands Milk Dairy J. 28: 102-129.
5. Gonzales-Martinez, C., M. Chafer, P. Fito and A. Chiralt. 2002. Development of salt profiles on Manchego type cheese during bringing. influence of vacuum pressure. J. Food Eng. 53: 67-73.
6. Guinee, T. P. and P. F. Fox. 1983. Sodium chloride and moisture changes in Ramano-type cheese during salting. J. D. R. 50: 511-518.
7. Guinee, T. P. and P. F. Fox. 1987. Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology. Vol.1. PP. 251-297. Elsevier Appl. Sci. Pub., London.
8. Hamdami, N., J. Y. Monteau and A. Le Bail. 2004. Transport properties of a high porosity model food at above and sub-freezing temperature. Part 2, Evaluation of the effective moisture diffusivity from drying data. J. Food Eng. 62: 385-392.
9. Luna, J. A. and J.A. Bressan. 1987. Mass trasfer during ripening of Cuartitolo Argentino cheese. J. Food Sci. 52(2): 308-31.
10. Luna, J. A. and M. S. Chavez. 1992. Mathematical model for water diffusion during brining of hard and semi-hard cheese. J. Food Sci. 57(1): 55-58.
11. Messens, W., K. Dewettink and A. Huyghebaert. 1999. Transport of sodium chloride and water in Gouda cheese as affected by high pressure brining. Int. Dairy J. 9(8): 569-576.
12. Morris, H. A., T. P. Guinee and P.F. Fox. 1985. Salt diffusion in cheddar cheese. J. Dairy Sci. 68: 1851-1858.
13. Pajonk, A., R. Saurel and J. Andrieu. 2003. Experimental study and modeling of effective NaCl diffusion coefficient value during Emmental cheese brining. J. Food Eng. 60(3): 307-313.
14. Payne, M. R. and K.R. Morison. 1999. A multi-component approach to salt and water diffusion in cheese. Int. Dairy

- J. 9: 887-894.
15. Sanchez, E. S., S. Simal, A. Femenia, C. Rossello and J. Benedito. 1999. Influence of ultrasound on mass transfer during cheese brining. *Eur. Food Res. Technol.* 209: 215-219.
 16. Sebt, I., D. Blanc, A. Carnet-Ripoche, R. Saurel and V. Coma. 2004. Experimental study and modeling of nisin diffusion in agarose gels. *J. Food Eng.* 63(2): 185-190.
 17. Turhan, M. 1992. Modelling of salt transfer in White cheese during cheese brining. *J. Food Sci.* 57(5): 1082-1085.
 18. Turhan, M. 1996. Modelling of salt transfer in white cheese during short initial brining. *Netherlands Milk and Dairy J.* 50: 541-550.
 19. Zorrilla, S. E. and A.C. Robialo. 1994. Modeling NaCl and KCl movement in Fynbo cheese during salting. *J. Food Sci.* 59(5): 976-980.