تعیین ضریب نفوذ رطوبت در پنیر سفید ایرانی طی مرحله آب نمک‌گذاری

لیلا ایزدی نجف آبادی[۱*]، ناصر همدمی[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 اصلی‌ترین پارامترهای انتقال جرم، ضریب نفوذ (D) می‌باشد. در این مطالعه به‌منظور پیش‌بینی تغییرات مقدار رطوبت در لایه‌های پنیر طی آب نمک‌گذاری پنیر سفید ایرانی، ضریب نفوذ ثابت و متغیر آب با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی غلظت- فاصله در نمونه‌های 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 زمان‌های آب نمک‌گذاری ۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت براورد گردید. نتایج نشان داد که با افزایش دما و مقدار رطوبت، ضریب نفوذ آب افزایش می‌یابد. 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 به‌عنوان تابعی از دما و غلظت ارائه شد. مقایسه مقادیر ضرایب نفوذ پیش‌بینی شده توسط رابطه مذکور با ضرایب نفوذ آزمایشگاهی نشان داد که هم‌بستگی بالایی مابین آنها وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: پنیر، آب نمک‌گذاری، انتقال جرم، ضریب نفوذ آب

مقدمه

انتقال جرم در مواد غذایی از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از مثال‌های مهم انتقال جرم در فرایند مواد غذایی، خروج رطوبت از پنیر در طی غوطه‌وری پنیرهای قالب‌گیری شده در محلول آب نمک است(جذب نمک از محلول آب نمک توسط پنیر و خروج هم‌زمان 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 پیش‌بینی پروفیل‌های غلظت نمک و آب در داخل پنیر در طی مرحله آب نمک‌گذاری دارای اهمیت فراوانی است زیرا غلظت‌های محلی (Local) تعیین کننده فعالیت میکروبی و آنزیمی در نقاط متفاوت در داخل پنیر و به تبع آن کیفیت محصول نهایی می‌باشند.

در محاسبات مهندسی معمول، استفاده از یک ضریب نفوذ میانگین برای محاسبه انتقال رطوبت در کل ماده کافی می‌باشد. اما برای محاسبات دقیق‌تر در فرایندهایی مانند خشک کردن اسمزی و آب نمک‌گذاری، 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 می‌باشد. اندازه‌گیری 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

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.47.2.0]

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} m^2/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 برطرف شده است (۲).

هیچ روش استانداردی 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 به‌دست 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 (۱۷و۱۸)، پنیر چدار (۱۲) ، و برای پنیرEmmental (۱۰و۱۳). بررسی روش‌های جدید آب نمک‌گذاری پنیر همانند آب نمک‌گذاری تحت خلاء (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 براورد 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.47.2.0]

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 به‌عنوان تابعی از دما و غلظت

مواد و روش‌ها

تهیه نمونه

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

آماده‌سازی نمونه و به‌دست آوردن داده‌های غلظت – فاصله

بعد از نمونه‌برداری، نمونه‌های پنیر به سرعت به قطعات مکعب مستطیل با ابعاد ۴ × ۷ × ۱۰ سانتی‌متر بریده شده و سپس سریعاً توسط پارافین جامد ذوب شده پوشش داده شدند. پوشش پارافینی مانع خروج رطوبت از پنیر و سفت شدن نمونه‌ها می‌شود و امکان انتقال جرم (نمک و رطوبت) یک بعدی را فراهم می‌نماید. نمونه‌های آماده شده همراه با محلول آب نمک تهیه شده به‌مدت 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 به‌منظور ثابت نگه‌داشتن غلظت نمک در محلول آب نمک در طول مدت آزمایش (به‌طور تقریبی g/l ۳۴۰) تهیه شده و به میزان mg/l ۳۰۰ کلرید کلسیم به آن اضافه شد. pH این محلول با استفاده از اسید لاکتیک روی pH=5 تنظیم گردید. مقدار آب نمک تهیه شده تقریباً ۵ برابر حجم نمونه‌های پنیر بود (۱۳).

برای به‌دست آوردن داده‌های غلظت – فاصله، آزمایش آب نمک‌گذاری در چهار دمای متفاوت ($^{\circ}C$ ۲۴ و ۱۹ ، ۱۴ ، ۶) و در سه سطح زمان آب نمک‌گذاری (۶ ، ۲۴ و ۴۸ ساعت) در سه تکرار در داخل انکوباتور انجام گرفت. همان‌طور که در شکل۱ مشاهده می‌شود، نمونه‌های 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 به‌صورت یک بعدی صورت گیرد. محلول آب نمک طی آزمایش آب نمک‌گذاری به‌منظور حفظ شرایط مرزی یک‌نواخت به‌طور آرام همزده شد. در پایان زمان آب نمک‌گذاری (۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت)، نمونه‌های 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 به‌صورت ورقه‌هایی با ضخامت تقریباً ۲ میلی‌متر برش داده شد. هر ورقه پنیر جهت جلوگیری از خروج رطوبت سریعاً داخل کیسه پلی اتیلنی که قبلاً شماره‌گذاری شده بود تا زمان اندازه‌گیری رطوبت و نمک آن قرار گرفت (۸ و ۱۳).

مقدار رطوبت ورقه‌های پنیر پس از خشک شدن در آون $^{\circ}C$۱۰۵ به‌مدت ۲۴ ساعت و ثابت شدن وزن با استفاده از ترازویی با دقت ۰,۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد (۱). میزان نمک نمونه‌ها با روش موهر تعیین گردید (۱).

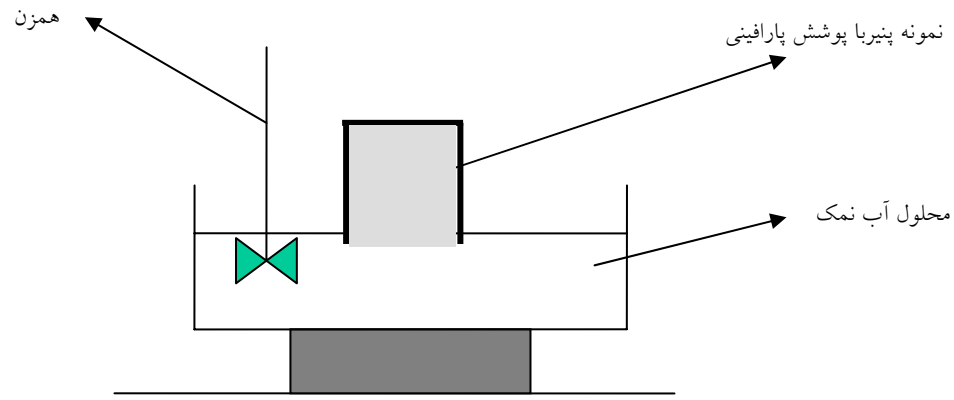
در پایان منحنی‌های غلظت رطوبت و نمک نمونه‌های پنیر به ترتیب بر حسب کیلوگرم رطوبت در هر متر مکعب پنیر و کیلوگرم نمک در هر متر مکعب پنیر به‌عنوان تابعی از فاصله ورقه برش داده شده تا سطح تماس با محلول آب نمک اشباع رسم گردیدند(۱۳).

تعیین ضریب نفوذ ثابت

ضریب نفوذ (diffusivity) با استفاده از داده‌های منحنی غلظت – فاصله براورد شد. به‌طور کلی نفوذ در حالت ناپایای یک ترکیب را می‌توان با استفاده از قانون دوم فیک توصیف

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.47.2.0]



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

نمود (۳):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial C}{\partial x}\right) \qquad [۱]$$

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

هنگامی‌که پنیر به‌عنوان 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:

$t = ۰\ ,\ x \geq ۰\ \ C = C_۰$

$t > ۰\ ,\ x = ۰\ \ C = C_s\ ,\ x \to \infty\ \ C = C_۰$

منتج به رابطه زیر می‌گردد (۳):

$$\frac{C_s - C}{C_s - C_۰} = \mathrm{erf}\left(\frac{x}{۲\sqrt{D.t}}\right) \qquad [۲]$$

که در آن C غلظت آب در پنیر در زمان t و فواصل مختلف از سطح پنیر (x) می‌باشد. $C_۰$ مقدار اولیه رطوبت در نمونه پنیر است و C_s غلظت ثابت آب در محلول آب نمک است. نمونه پنیر زمانی به‌عنوان یک ماده نیمه محدود در نظر گرفته می‌شود که عدد فوریر کمتر از ۰/۰۵ باشد ($Fo = \frac{Dt}{l^۲} < ۰/۰۵$) 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 نمک‌گذاری با استفاده از داده‌های آزمایشی غلظت – فاصله و معادله ۲ توسط روش اپتیموم‌سازی در نرم افزار MATLAB تعیین شد. در این روش با داشتن مقادیر تجربی مقادیر رطوبت و رابطه موجود مناسب‌ترین مقدار D تعیین گردید.

تعیین ضریب نفوذ متغیر

در قانون دوم فیک، مقدار D تنها تابعی از غلظت می‌باشد. با در نظر گرفتن نمونه به‌صورت ایزوترمال و نیمه محدود و با تغییر متغیر می‌توان پروفیل‌های غلظت را به‌عنوان تابعی از متغیر جدید ($\xi = \frac{x}{۲\sqrt{t}}$:Boltzman variable) توصیف نمود (۳):

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{۱}{۲t^{۱/۲}}\frac{dC}{d\xi} \qquad [۳]$$

و

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{x}{۴t^{۳/۲}}\frac{dC}{d\xi} \qquad [۴]$$

و سپس

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial C}{\partial x}\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{D}{۲t^{۱/۲}}\frac{\partial C}{\partial \xi}\right) = \frac{۱}{۴t}\frac{d}{d\xi}\left(D\frac{dC}{d\xi}\right) \qquad [۵]$$

و سرانجام

$$-۲\xi\frac{dC}{d\xi} = \frac{d}{d\xi}\left(D\frac{dC}{d\xi}\right), \qquad [۶]$$

با در نظر گرفتن شرایط اولیه و مرزی زیر:

$C = C_۰\ ,\ x > ۰\ ,\ t = ۰$

$C = C_s\ ,\ x = ۰\ ,\ t > ۰$

می‌توان مقدار D را چنین محاسبه نمود:

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.47.2.0]

$$D_i = -2(\frac{\partial \xi}{\partial x}) \int_{C_\circ}^{C_i} \xi \partial C \qquad [7]$$

زمانی‌که منحنی متغیر بولتزمن به‌عنوان 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 $C_\circ$ تا C_i برابر با قسمت دوم معادله یعنی $\int_{C_\circ}^{C_i} \xi \partial C$ می‌شود. با به‌کار بردن این روش برای مقادیر متفاوت C_i امکان محاسبه D به‌عنوان تابعی از غلظت $D = f(C)$ وجود دارد. با برنامه‌نویسی در MATLAB، شیب و سطح زیر منحنی در مقادیر متفاوت رطوبت جهت محاسبه D در دماهای متفاوت براورد 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 به‌عنوان فاکتور مؤثر بر ضریب نفوذ نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

تغییرات ضریب نفوذ با دما به‌طور کلاسیک با استفاده از رابطه آرنیوس (Arrhenius relationship) نشان داده می‌شود:

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

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

مقادیر انرژی اکتیواسیون و D_o را می‌توان از رسم منحنی ln (D) به‌عنوان تابعی از 1/T به‌دست آورد. شیب این منحنی خطی برابر با $-E_a/R$ و عرض از مبدأ آن معادل با $\ln(D_o)$ است. بدین ترتیب می‌توان رابطه E_a و D_o را به‌عنوان تابعی از غلظت به‌دست آورد و ضریب نفوذ آب را به‌عنوان تابعی از دو فاکتور دما و غلظت با استفاده از رابطه آرنیوس بیان نمود (۸).

نتایج و بحث

شکل ۲ میانگین توزیع غلظت‌های آب و نمک را در نمونه‌های پنیر در دمای ۱۹°C برای زمان‌های آب نمک‌گذاری مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان آب نمک‌گذاری، غلظت نمک افزایش یافته و مقدار رطوبت کاهش می‌یابد.

شکل ۳ منحنی غلظت – فاصله را در دماهای مختلف پس از ۲۴ ساعت آب نمک‌گذاری نشان می‌دهد. با افزایش دما، نفوذ غیر هم‌جهت آب و نمک افزایش می‌یابد. 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 می‌دهد (۷).

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

تعیین ضریب نفوذ ثابت

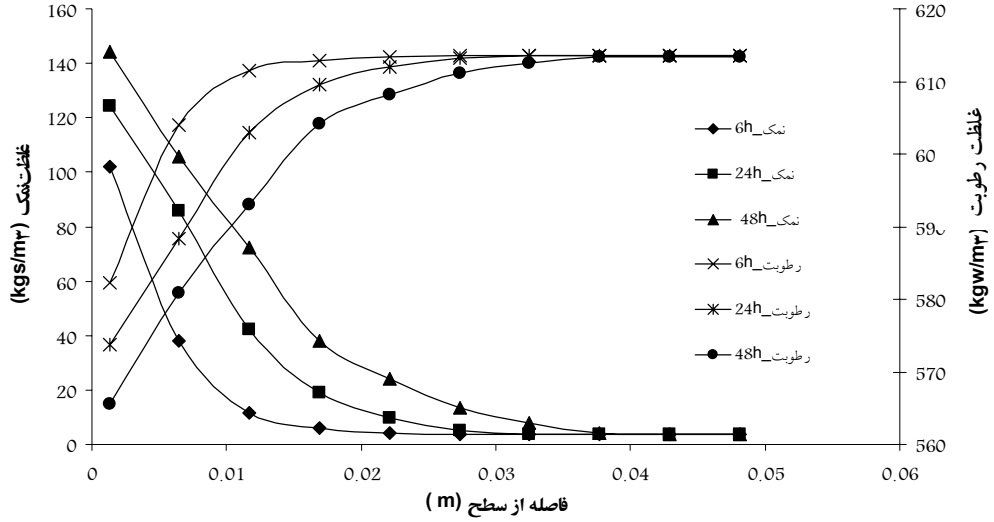
مقادیر ضرایب نفوذ ثابت آب براورد شده با استفاده از داده‌های غلظت – فاصله در جدول ۱ نشان داده شده است. دامنه تغییر ضریب نفوذ ثابت آب در دماها و زمان‌های آب نمک‌گذاری متفاوت در محدوده $0/3 \times 10^{-10}$ تا $1/67 \times 10^{-10}$ m^2/s می‌باشد. مقایسه داده‌های موجود در این جداول نشان می‌دهد که با افزایش دما و زمان آب نمک‌گذاری مقدار ضریب نفوذ ثابت آب تغییر می‌کند. بنابراین نیاز به تعیین ضریب نفوذ متغیری به‌عنوان تابعی از غلظت و دما کاملاً محسوس است.

تعیین ضریب نفوذ متغیر آب

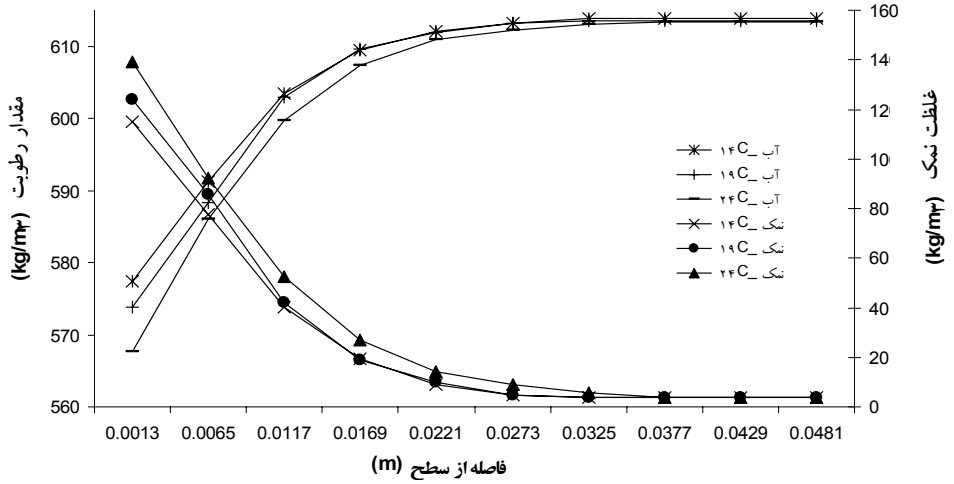
برای تعیین ضریب نفوذ متغیر آب، منحنی‌های متغیر بولتزمن در مقابل مقدار رطوبت در دماهای مختلف رسم گردیدند

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.47.2.0]



شکل۲. 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 ۱۹°C



شکل۳. 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

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

$$\xi_w = a \exp^{b.Ci,w} \quad [۹]$$

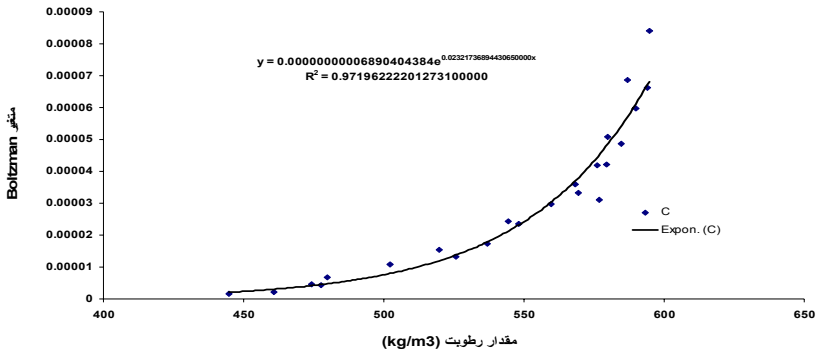
شکل ۵ تغییرات ضرایب نفوذ متغیر براورد شده با استفاده از معادله ۷ بر مبنای سطح زیر منحنی ($\int_{C_\circ}^{C_i} \xi \partial C$) و شیب ($\frac{\partial \xi}{\partial x}$) منحنی متغیر بولتزمن–مقدار رطوبت در دماهای متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دما و میزان رطوبت، ضریب نفوذ افزایش می‌یابد. این

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

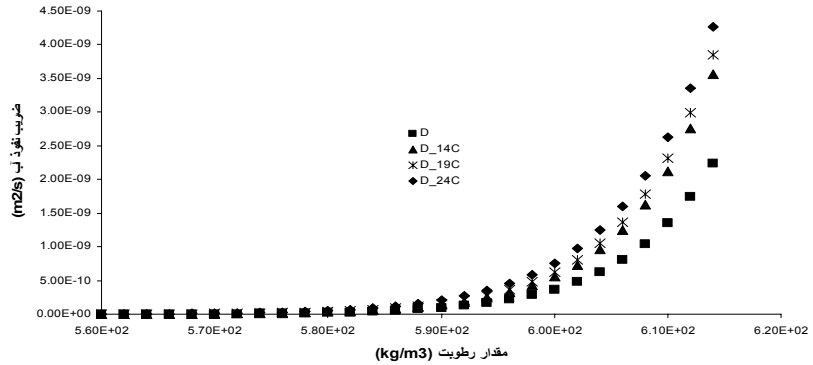
[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.47.2.0]

جدول۱. میانگین مقادیر ضرایب نفوذ ثابت براورد شده برای آب در دماها (°C ۲۴ و ۱۹ و ۱۴ و ۶) و زمان‌های آب نمک‌گذاری مختلف (۶ ، ۲۴ و ۴۸ ساعت)

دما (°C)	زمان(h)	ضریب نفوذ آب (m^2/s)	انحراف معیار(m^2/s)
۶	۶	$۳/۰۰ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۴/۳۴ \times ۱۰^{-۱۹}$
۶	۲۴	$۴/۳۳ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۳/۲۱ \times ۱۰^{-۱۱}$
۶	۴۸	$۷/۳۳ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۲/۸۹ \times ۱۰^{-۱۱}$
۱۴	۶	$۴/۰۰ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۱/۰۰ \times ۱۰^{-۱۹}$
۱۴	۲۴	$۴/۰۰ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۵/۲۰ \times ۱۰^{-۱۱}$
۱۴	۴۸	$۱/۵۳ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۱/۲۷ \times ۱۰^{-۱۰}$
۱۹	۶	$۵/۰۰ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۱/۰۰ \times ۱۰^{-۱۱}$
۱۹	۲۴	$۷/۶۷ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۲/۰۸ \times ۱۰^{-۱۱}$
۱۹	۴۸	$۹/۶۷ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۵/۷۷ \times ۱۰^{-۱۲}$
۲۴	۶	$۵/۳۳ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۵/۷۷ \times ۱۰^{-۱۲}$
۲۴	۲۴	$۱/۳۳ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۵/۷۷ \times ۱۰^{-۱۱}$
۲۴	۴۸	$۱/۶۷ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۵/۷۷ \times ۱۰^{-۱۱}$



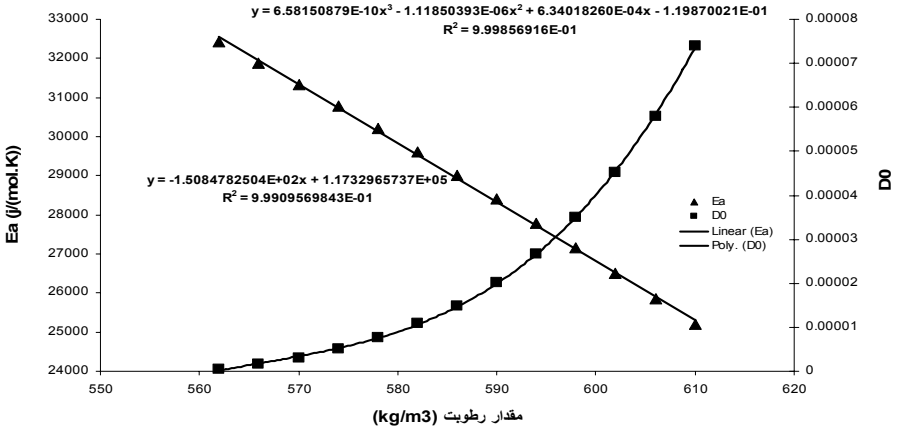
شکل۴. منحنی تغییرات متغیر بولتزمن در مقابل مقدار رطوبت در ۲۴°C (master curve)



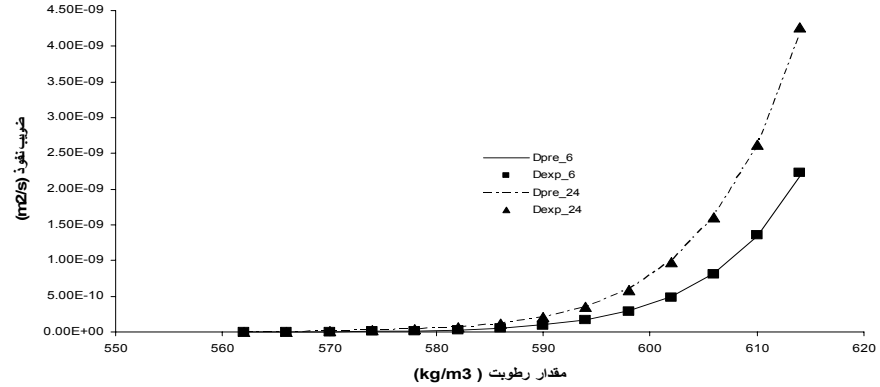
شکل۵. تغییرات ضریب نفوذ آب محاسبه شده به روش بولتزمن به‌عنوان تابعی از میزان آب در دماهای متفاوت

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.47.2.0]



شکل۶. منحنی تغییرات Ea و D_o به‌عنوان تابعی از میزان رطوبت



شکل۷. مقایسه مقادیر ضریب نفوذ پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده به‌عنوان تابعی از میزان رطوبت در دماهای متفاوت

نتایج منطبق با گزارش‌های پاژونک و همکاران (۱۳) و سبتی و همکاران (۱۴) است.

اثر دما بر ضریب نفوذ

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

$$E_a = -۱۵۰/۸۴۷۸\ C_i + ۱۱۷۳۲۹/۶۵۷۴$$

$$D_0 = ۶/۵۸۱۵ \times ۱۰^{-۱۰} C_i^{۳} - ۱/۱۱۸۵ \times ۱۰^{-6}\ C_i^{۲} + ۰/۰۰۰۶C_i + ۰/۱۱۹۹$$

بدین ترتیب می‌توان برای پیش‌بینی ضریب نفوذ پنیر در هر دما و میزان رطوبت خواسته شده، ابتدا مقادیر E_a و D_o را با استفاده از رابطه بالا در مقدار رطوبت (C_i) مورد نظر محاسبه نموده 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 (براورد شده با روش بولتزمن)

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.47.2.0]

را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود انطباق و هم‌بستگی خوبی مابین مقادیر ضریب نفوذ پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده وجود دارد ($r > ۰/۹۹$). بنابراین می‌توان مقدار ضریب نفوذ آب (D) را برای هر مقدار رطوبت و در هر دمایی با استفاده از روابط توسعه داده شده پیش‌بینی نمود.

نتیجه‌گیری

مطالعه انتقال رطوبت در داخل پنیر طی آب نمک‌گذاری پنیر سفید ایرانی، که یکی از دو پنیر صنعتی عمده تولیدی در داخل کشور می‌باشد، می‌تواند ما را در تعیین پروفیل‌های غلظت آب طی فرایند آب نمک‌گذاری و پیش‌بینی فعالیت میکروبی و آنزیمی در پنیر کمک نماید. ضریب نفوذ، یکی از اصلی‌ترین پارامترهای انتقال جرم است.

در راستای این تحقیق پس از تعیین آزمایشگاهی پروفیل‌های غلظت- فاصله برای آب در دماهای ۶، ۱۴، ۱۹ و۲۴ °C و زمان‌های آب نمک‌گذاری ۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت، ضریب نفوذ جرمی ثابت آب در داخل پنیر با استفاده از روش غلظت- فاصله براورد گردید. نتایج نشان داد که ضریب نفوذ نمک با افزایش دما و زمان آب نمک‌گذاری به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. مقادیر ضرایب نفوذ ثابت براورد شده برای آب در محدوده $۰/۳\times۱۰^{-۱۰}$ تا $۱/۶۷\times۱۰^{-۱۰}\ m^۲/s$ بود.

در مرحله بعد ضریب نفوذ متغیر آب به‌عنوان تابعی از غلظت آب و دما با استفاده از روش بولتزمن براورد گردید و سپس یک رابطه ریاضی ساده برای توصیف تغییرات ضریب نفوذ مؤثر آب به‌عنوان تابعی از دما و غلظت تعریف گردید. ضرایب نفوذ پیش‌بینی شده توسط این رابطه مطابقت خوبی با ضرایب تجربی به‌دست آمده از روش بولتزمن داشتند و به‌طور کلی با افزایش دما ضریب نفوذ آب افزایش پیدا می‌کند.

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 Cuartiolo 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.47.2.0]

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. Sebti, 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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.47.2.0]