

مدل سازی ریاضی کاهش رطوبت رب گوجه فرنگی تحت گرمایش اهمیک

Mathematical modeling of tomato paste growth under ohmic heating

مهدي ترکیان بلداجی^۱

دریافت: ۱۴۰۰/۹/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۱۷

چکیده:

گرمایش اهمی یک روش جدید در فرآوری محصولات کشاورزی می باشد که با عبور جریان متناوب از میان ماده غذایی تولید گرما در داخل آن نموده و باعث گرم شدن آن می شود. در این مقاله به مدل سازی ریاضی گرمایش اهمیک رب گوجه فرنگی تحت چهار گرادیان ولتاژ ۵، ۷، ۹ و ۱۱ V/cm پرداخته شده است. الکتروود به کار رفته در این تحقیق از نوع استیل زنگ نزن می باشد. نتایج نشان داد که در همه گرادیان های ولتاژی با توجه به مدلسازی انجام شده و بررسی نتایج مدل هندرسون و پیچ بهترین مدل های ارزیابی شده برای سنتیک کاهش رطوبت رب گوجه فرنگی تحت سیستم گرمایش اهمی می باشند. و با توجه به ضریب R^2 مدل پیچ میتوان از این مدل جهت مدل سازی سنتیک خشک کردن رب گوجه فرنگی تحت فرایند گرمایش اهمیک استفاده کرد.

کلمات کلیدی: رب گوجه فرنگی، گرمایش اهمیک، مدل سازی ریاضی

مقدمه:

پیش بینی صحیح از دست دادن محتوای رطوبتی ماده در حال خشک شدن می تواند در مدل سازی بهتر فرایند خشک شدن و همچنین بهینه سازی مصرف انرژی کمک شایانی کند. مدل سازی محتوی رطوبتی، روابط بین متغیرهای گوناگون از جمله محتوی رطوبتی و زمان را ارائه میدهد و میتواند اطلاعاتی در ارتباط با میزان محتوی رطوبتی در زمانهای مختلف یا آهنگ خروج رطوبت از ماده غذایی طی خشک کردن و همچنین، شناخت پارامترهای مهم و موثر در فرایند، مانند ضریب انتشار موثر رطوبت را فراهم کند (Muhammad *et al.*, 2019).

^۱ استادیار گروه مکانیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ورامین-پیشوا و قرچک، ورامین، ایران
*نویسنده مسئول مکاتبه کننده: mhdortkian@yahoo.com

ضریب انتشار موثر رطوبت یک خصوصیت انتقالی کلی است که همه مکانیسم های ممکن حرکت رطوبت در ماده غذایی (مانند انتشار مایع، انتشار بخار و جریان موئینگی) را توصیف میکند (Zina et al., 2021). فرآیندهای حرارتی مرسوم اساساً شامل مکانیزم انتقال حرارت بصورت همرفت، هدایتی و یا تابشی می باشند. مقاومت داخلی ماده در برابر هدایت حرارتی باعث از دست رفتن کیفیت محصول می شود. برای غلبه بر این مشکل فن آوری های جایگزین مورد تحقیق قرار گرفته اند که یکی از این فن استفاده از انرژی الکتریکی به طور مستقیم در فرآوری مواد غذایی می باشد (Kurnia & Aurina, 2021).

گرمایش اهمی یک فرآیند حرارتی است که با عبور جریان متناوب از میان ماده غذایی، منجر به تولید گرما می گردد. این سیستم گرمایشی از لحاظ تولید گرما و انتقال حرارت و همچنین از لحاظ توزیع دما که در طول گرمایش اتفاق می افتد، با روش های مرسوم گرمایش متفاوت است (Dornoush Jafarpour, 2022).

مرادی و همکاران (۱۳۹۵) اقدام به تعیین ضرایب انتشار رطوبتی دانه زیره طی فرایند خشک شدن کردند. آنها هم به صورت تحلیلی و به کمک داده های آزمایشگاهی و هم به کمک روش عددی تفاضل محدود ضرایب انتشار رطوبتی را بدست آوردند. آنها نشان دادند که شبیه سازی عددی همبستگی بالایی بین تغییرات محتوای رطوبتی دانه زیره طی فرایند خشک شدن به روش آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل سازی وجود دارد و این ضرایب دارای اعتبار می باشند.

اشتواد و همکاران (۱۳۹۵) در یک کار تحقیق اقدام به تعیین ضریب نفوذ موثر و ضریب انتشار رطوبتی شلتوک برنج کردند. آنها بیان داشتند که سرعت جذب و دفع رطوبت سطحی تاثیر مستقیمی بر شکستگی دانه برنج دارد. نقوی و همکاران (۱۳۹۳) در مدلسازی سینتیک از دست دادن رطوبت سیب زمینی به این نتیجه رسیدند که با افزایش دما میزان ضریب انتشار رطوبتی افزایش می یابد. همچنین انصاری فر و همکاران (۱۳۹۵) در فرایند خشک کردن خرمای مضافتی به این نتیجه رسیدن که با افزایش دما ضریب انتشار افزایش می یابد.

اکبری و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی اثر روش گرمایش اهمی بر روی خواص آب انار پرداختند. آنها بیان داشتند که روش گرمایش اهمیک نسبت به روش های حرارت دهی مرسوم باعث حفظ بیشتر کیفیت آب انار تغلیظ شده میگردد و از لحاظ مصرف انرژی نیز بهینه تر می باشد.

همچنین مارا و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که مدل سازی آماری دما در طی گرمایش اهمی به منظور تخمین درجه حرارت و کمک به کنترل بهتر فرآیند بسیار مفید است.

روش کار

۲-۱- آماده سازی پوره گوجه فرنگی: به منظور تولید رب از گوجه فرنگی، واریته کال جی ان ۳ استفاده گردید. ابتدا عمل پوست کنی گوجه فرنگی به روش تیمار گرمایش و سرمایش انجام شد سپس به منظور تهیه مخلوط همگن از یک همزن مکانیکی (made in Germany; IKA Eurostar power control-visc 6000) استفاده شد و با دور ۵۰۰rpm پالپ گوجه فرنگی بهم زده شد تا یک محلول یکنواخت به نام پوره بدست آید. به منظور جدا سازی دانه، پوره از صافی با مش ۱mm عبور داده شد. در مرحله بعد به پوره تولید شده نمک خوارکی (کلرید سدیم) به میزان ۱ درصد وزنی اضافه شد.

۲-۲- سیستم گرمایش اهمی

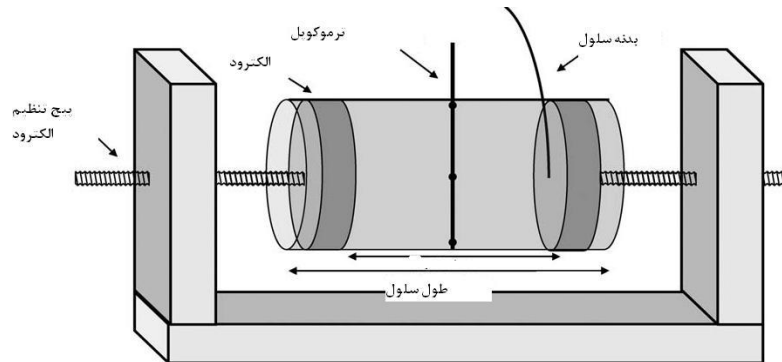
بدنه سلول گرمایش اهمی از جنس تفلون و به شکل یک استوانه توخالی ساخته شد. قطر داخلی استوانه ۵۰mm و طول آن ۱۰۰mm در نظر گرفته شد. الکتروود به کار رفته در این سیستم از جنس استیل زنگ نزن به شکل استوانه با قطر ۵۰ mm و به ضخامت ۳ mm در نظر گرفته شد. نمونه ای از الکتروود استیل زنگ نزن در شکل (۱) مشاهده می شود.



شکل ۱: نمونه الکتروودهای استفاده شده در این تحقیق

برای اندازه گیری دما در داخل سلول گرمایش اهمی از ترموکوپل و ترمومتر مدل Dual inpur RTD 804U (ساخت کشور تایلند) استفاده شد. همچنین به منظور تبدیل ولتاژ ۲۲۰ولت (ولتاژ رایج در شبکه برقی ایران) به ولتاژهای مورد نیاز از دستگاه رگولاتور ولتاژ (واریاک) ساخت شرکت امرسان ایران استفاده گردید. از یک ترازوی دیجیتالی

مدل GF-6000 با دقت ۰/۰۱ گرم برای ثبت تغییرات وزن در حین انجام پروسه گرمایشی استفاده شد. شماتیک سیستم گرمایش اهمی به کار برده شده در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: شماتیک سیستم گرمایش اهمی

۳-۲- مدل سازی ریاضی

مدل های ریاضی زیادی در طول چندین سال توسط محققان مختلف ارائه شده است. که اولین و معروفترین مدل پیشنهاد شده، مدل نیوتن (لوئیس) می باشد. در سال ۱۹۲۱ لوئیس دریافت که انتقال رطوبت از غذاها و محصولات کشاورزی قابل مقایسه با جریان حرارت از یک سیستم غوطه‌ور در مایع سرد است. در این مدل فرض بر این است که هیچ مقاومتی در مقابل حرکت رطوبت از داخل ماده به سطح آن وجود ندارد. با مقایسه این پدیده با قانون سرد شدن نیوتن می توان گفت که سرعت خشک شدن متناسب است با اختلاف میزان رطوبت بین ماده در حال خشک شدن و میزان رطوبت تعادلی در هوای خشک کن (اشرف، ۱۳۸۷):

$$MR = \exp(-kt) \quad \text{فرمول (۱)}$$

که در این رابطه MR نسبت رطوبت، t زمان و k ثابت معادله است.

در ابتدا این مدل به علت ساده بودن آن مورد استفاده قرار گرفت. تنها اشکال این مدل آن است که این مدل مراحل اولیه نمودار خشک کردن را بالاتر و مراحل آخر را پایین تر پیش بینی می کند. از این مدل برای توضیح خصوصیات خشک کردن لایه نازک محصولات کشاورزی استفاده شده است (Kashaninejad et al., 2007; Panchariya et al., 2002; Ayensu, 1997). برای اصلاح مشکل فوق از مدل نیمه تجربی با دو ثابت استفاده گردید.

این مدل برای بسیاری از مواد غذایی و محصولات کشاورزی استفاده شده است (Doymaz, 2004). مدل آن با معادله (۲) نشان داده می‌شود:

$$MR = \exp(-kt^n) \quad \text{فرمول (۲)}$$

در این معادله k و n ثابت‌های معادله هستند.

این مدل به مدل پیچ معروف است. جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی خصوصیات خشک‌کردن محصولات نظیر زردآلو، انگور، سیر، سیب زمینی شیرین و برگ نعناع استفاده شده است.

در سال ۱۹۶۹ هندرسون و پابیس برای مدل‌سازی خصوصیات خشک‌کردن لایه نازک محصولات کشاورزی از رابطه (۳) استفاده کردند:

$$MR = a \exp(-kt) \quad \text{فرمول (۳)}$$

این مدل توسط یاگچی‌اوغلو و همکاران در سال ۱۹۹۹ به شکل زیر اصلاح شد و به مدل لگاریتمی معروف است و در مدل‌سازی محصولات مختلف استفاده شد.

$$MR = a \exp(-kt) + c \quad \text{فرمول (۴)}$$

در سال ۱۹۷۸ وانگ و سینگ برای خشک‌کردن برنج معادله (۳-۳۳) را پیشنهاد کردند و آن را به نام خود نامگذاری کردند. در این معادله a و b ثابت‌های مدل هستند (Chen & Wu, 2001).

$$MR = 1 + at + bt^2 \quad \text{فرمول (۵)}$$

مدل دیگری جهت خشک‌کردن لایه نازک توسط میدیلی و همکاران پیشنهاد شد که به نام آن‌ها به ثبت رسید. در این مدل که با رابطه (۶) نشان داده می‌شود a, b, k, n ثابت‌های معادله هستند.

$$MR = a \exp(-kt^n) + bt \quad \text{فرمول (۶)}$$

به این مدل‌ها که از آن در مدل‌سازی خشک‌کردن با انواع روش‌ها مانند خشک‌کردن آفتابی، خشک‌کردن با هوای گرم، خشک‌کردن با مایکروویو، خشک‌کردن با مادون قرمز، خشک‌کردن با خشک‌کن بستر سیال، خشک‌کردن تحت خلاء استفاده شده است مدل‌های استاندارد نیز گفته می‌شود.

مدل دیگری طبق رابطه (۷) وجود دارد که مدل خزایی نامیده می‌شود. این مدل جزو مدل‌های معمول گفته شده نمی‌باشد (Khazaei and Daneshmandi, 2007; Khazaei and Mohammadi, 2009).

$$MC = M_0 + M_{rel} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{rel}}}\right) + K_{rel} \quad (7) \text{ فرمول}$$

در این رابطه: MC محتوای رطوبت در هر زمان، M_0 رطوبت اولیه (%)، M_{rel} مقدار رطوبت خارج شده از محصول در فاز اول خشک شدن (%)، T_{rel} زمان آسایش (دقیقه) و K_{rel} نرخ خشک شدن در فاز ریلکسیشن (دقیقه/۱) می‌باشند. این مدل از تحقیق خزایی و همکاران در سال ۲۰۰۸ حاصل شد که بعنوان یک روش جدید برای خشک کردن استفاده شد.

۲- مدل‌های خشک کردن

یکی از جنبه‌های مهم فناوری تبخیر، به ویژه برای فرایندهای صنعتی، مدل‌سازی ریاضی فرایند و طراحی وسایل مورد نیاز فرایند می‌باشد. متداول‌ترین روش مدل‌سازی ریاضی فرایند کاهش رطوبت استفاده از مدل‌های ریاضی تجربی و نیمه تجربی می‌باشد. پر کاربردترین این مدل‌های در جدول (۱-۲) ارائه شده‌اند.

جدول (۱): مدل‌های ریاضی خشک کردن ارائه شده توسط محققین

شماره	نام مدل	معادله
۱	نیوتن	$CR = \exp(-kt)$
۲	پیچ	$CR = \exp(-kt^n)$
۳	پیچ اصلاح شده	$CR = \exp(-kt^n)$
۴	هندرسون و پابیس	$CR = a \exp(-kt)$
۵	لگاریتمی	$CR = a \exp(-kt) + c$
۶	وانگ و سینگ	$CR = 1 + at + bt^2$
۷	هندرسون و پابیس اصلاح شده	$CR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$
۸	میدیلی و همکاران	$CR = a \exp(-kt^n) + bt$

* که در آن، k ثابت نرخ خشک شدن، n، b، a ضرایب ثابت روابط می‌باشد.

۵-۲- پردازش مدل‌های فرآیند کاهش رطوبت

جهت تعیین بهترین مدل از معیارهای ضریب تعیین (R^2)، مربع کای (χ^2) ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده می‌گردد که در روابط (۸) تا (۱۰) ذکر گردیده‌اند (Doymaz, 2007; Akpinar *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2007).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (CR_{exp\ i} - CR_{exp})(CR_{pre\ i} - CR_{pre})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (CR_{exp\ i} - CR_{exp})^2 \sum_{i=1}^N (CR_{pre\ i} - CR_{pre})^2}} \quad (8)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [(CR_{exp})_i - (CR_{pre})_i]^2}{N - z} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(CR_{exp})_i - (CR_{pre})_i]^2} \quad (10)$$

که در این رابطه‌ها :

$CR_{exp\ i}$: i امین نسبت کاهش رطوبت آزمایش، $MR_{pre\ i}$: i امین نسبت کاهش رطوبت پیش بینی شده توسط مدل، Z: تعداد ثابت‌های مدل کاهش رطوبت، N: تعداد مشاهدات آزمایش می‌باشد.

معیار انتخاب بهترین مدل، مقدار بیشتر R^2 و مقادیر کمتر χ^2 و RMSE است. مدلی که R^2 بیشتر و χ^2 و RMSE کمتری دارد، بهتر می‌تواند تغییرات نسبت کاهش رطوبت را در طی فرآیند انتقال جرم پیش‌بینی کند.

بحث و نتیجه گیری

سنتیک کاهش رطوبت

پس از بدست آوردن مقادیر نسبت رطوبت در گرادیان ولتاژهای مختلف خشک کردن، از بین مدل‌های موجود در جدول (۲)، با توجه به مقالات و منابع ۶ مدل انتخاب و بر منحنی‌های خشک شدن حاصل از داده‌های آزمایشی برازش شدند. سپس مدل‌هایی خشک شدن لایه نازک مختلف با توجه به مقادیر R^2 ، χ^2 و RMSE ارزیابی شده و بهترین مدل بر اساس مقادیر بیشتر R^2 و مقادیر کمتر SSE و RMSE انتخاب شدند.

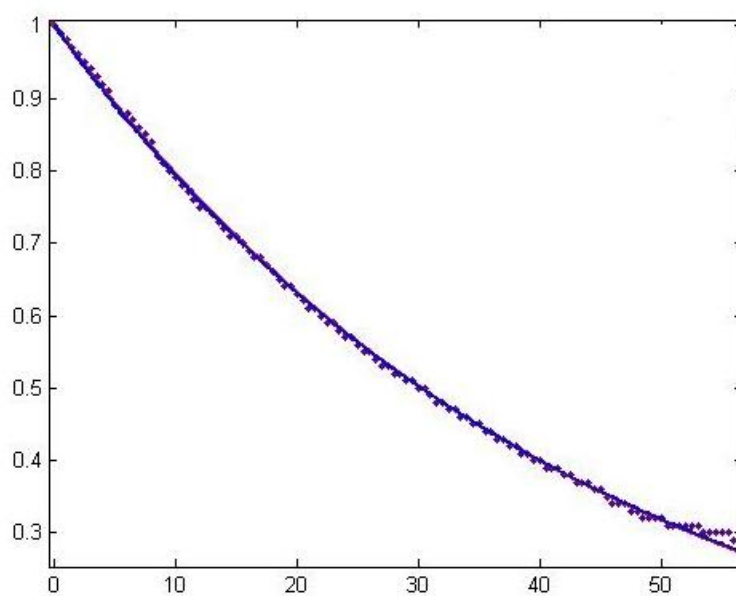
در جدول (2) مدل‌های خشک شدن برای الکتروود فولادی در گرادیان‌های ولتاژی متفاوت و در الکترولیت ۰٪ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در تمامی مدل‌ها برازش خوبی صورت می‌گیرد ولی اگر بخواهیم

یک مدل را به تمامی موارد عمومیت دهیم مدل پیچ و هندرسون تقریبا بهترین برازش را برای تمامی نمونه انجام میدهند.

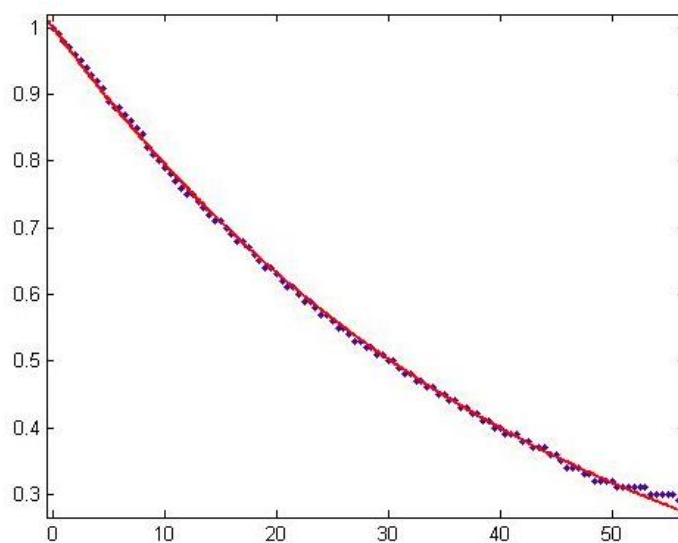
جدول (2): مدل سازی ریاضی خشک شدن گرمایش اهمی پوره گوجه فرنگی

مدل	تیمار	ضریب	R ²	SSE	RMSE
newton	St-50-0	k=0.02296	0.9993	0.003623	0.005687
CR = exp (-kt)	St-70-0	k=0.02215	0.9875	0.0602	0.02372
	St-90-0	k=0.04157	0.9057	: 0.238	0.05749
	St-110-0	k=0.04678	0.9487	0.1669	0.05721
Henderson and Pabis	St-50-0	k=0.044, a=1.116	0.932	0.0052	0.0712
CR = a exp (-kt)	St-70-0	k=0.082, a=1.145	0.951	0.002	0.0444
	St-90-0	k=0.148, a=1.142	0.950	0.0036	0.0593
	St-110-0	k=0.219, a=1.121	0.985	0.0028	0.0523
Wang and Singh	St-50-0	b=-0.026, a=0.0	0.929	0.0044	0.066
CR = 1+ at + bt²	St-70-0	b=-0.030, a=-0.002	0.978	0.0015	0.0388
	St-90-0	b=-0.064, a=-0.003	0.979	0.0016	0.0398
	St-110-0	b=-0.103, a=-0.006	0.987	0.001	0.0303
Logarithmic	St-50-0	k=0.012, b=-2, a=3.126	0.971	0.0019	0.0427
CR = a exp (-kt) + b	St-70-0	k=0.034, b=-1, a=2.116	0.977	0.0008	0.0277

	St-90-0	k=0.037, b=-2, a=3.097	0.985	0.0011	0.0328
	St-110-0	k=0.089, b=-1, a=2.089	0.986	0.001	0.0304
Page	St-50-0	k=0.02381, n=0.9896	0.993	0.0004	0.02
CR = exp (-ktⁿ)	St-70-0	k=0.011, n=1.825	0.995	0.0004	0.0199
	St-90-0	k=0.031, n=1.790	0.997	0.0002	0.0104
	st-110-0	k=0.075, n=1.691	0.999	0.0001	0.0086
Midilli et al.	St-50-0	k=0.002, n=2.092, b=0.007, a=1.006	0.998	0.0014	0.0372
CR = a exp (-ktⁿ) + bt	St-70-0	k=0.013, n=1.888, b=0.011, a=1.009	0.998	0.0001	0.0087
	St-90-0	k=0.035, n=1.849, b=0.011, a=1.010	0.999	0.0001	0.008
	St-110-0	k=0.083, n=1.714, b=0.01, a=1.006	0.999	0.0004	0.0063



شکل (۳): مقایسه بین رطوبت پیش بینی شده توسط مدل پیچ و رطوبت تجربی در خشک کردن اهمی پوره گوجه فرنگی (st-50-0)



شکل (۴): مقایسه بین رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل هندرسون و رطوبت تجربی در خشک کردن اهمیک پوره گوجه فرنگی (st-50-0)

در نمودارهای شکل ۳ و ۴ نیز نمودار خشک شدن تجربی رب گوجه فرنگی و مدل های هندرسون و پیچ با هم مقایسه گردیده است و همانطور که مشاهده می شود بین این دو مدل با نمونه های تجربی انطباق خوبی وجود دارد و می توان به این نتیجه رسید که از این دو مدل می توان برای پیش بینی محتوای رطوبتی رب گوجه فرنگی در سیستم گرمایش اهمیک استفاده کرد. با توجه به اینکه مدل پیچ مدل ساده ای می باشد و از طرفی تقریباً برای تمامی تیمارها دارای ضریب تبیین R^2 بالا، SSE و RMSE پایین می باشد لذا مدل پیچ به عنوان مدل مناسب برای ارزیابی حجم رطوبت انتخاب گردید. درویشی و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی مدل های سنتیک خشک کردن به این نتیجه رسیدند که مدل پیچ بهترین مدل جهت پیش بینی محتوای رطوبتی در سیستم گرمایش اهمیک می باشد.

ضرایب مدل پیچ بر حسب گرادیان ولتاژ و درصد نمک طعام بوسیله روابط رگرسیونی چند متغیره به فرم زیر حاصل گردید:

$$K = (0.115 - 0.0087C) \times \ln(V) + 0.043C - 0.48$$

$$N = (-0.00047 C^2 - 0.007C + 0.0011)V^2 - (0.0189C^2 - 0.12C + 0.201)V - 0.42C + 1.73$$

برای سایر الکترودها و در غلظت های مختلف نمک نیز مدل هندرسون و پیچ بهترین مدل ارزیابی گردیدند

نتیجه گیری و پیشنهادات

مدل سازی ریاضی سنتیک خشک کردن به منظور طراحی بهینه سیستم گرمایش اهمیک کاربرد زیادی دارد. در این تحقیق چهار گرادیان ولتاژی در یک نوع غلظت نمک طعام مورد بررسی قرار گرفت و مدل های هندرسون و پیچ به عنوان مدل های کارآمد معرفی گردیدند اما به منظور نتیجه گیری دقیق پیشنهاد میگردد طیف وسیعتری از گرادیان های ولتاژی در غلظت های مختلف نمک طعام مورد بررسی قرار بگیرند.

منابع

اکبری، ف.، فدوی، ع.، قنبریان، د. و میرسعیدقاضی، س. ۱۳۹۱، بررسی اثر روش گرمایش اهمی بر روی خواص فیزیکی و شیمیایی آب انار، پایان نامه، دانشگاه شهرکرد، دانشکده کشاورزی، ورامین، ایران.

انصاری فر، م. ح.، آق خانی، م. ح.، گلزاریان، م. ر. و طبسی زاده، م. ۱۳۹۵. بررسی سینتیک خشک شدن و ضریب انتشار رطوبت موثر خرما رقم مضافتی در خشک کن خورشیدی کابینتی، فصلنامه علوم و صنایع غذایی (۱۳)۵۶.

اشتواد، ر.، کلانتری، د.، هاشمی، س. ج. و پیردشتی، ه. ۱۳۹۵. بررسی تاثیر نرخ خشک شدن و طول دوره استراحت دهی در خشک کردن شلتوک به روش لایه نازک. نشریه پژوهش و نوآوری در علوم و صنایع غذایی (۱)۵: ۸۷-۱۰۴.

مرادی، م. و زمردیان، ع. ۱۳۹۵. تعیین و اعتبار سنجی ضریب انتشار رطوبتی دانه گیاه زیره سبز طی فرایند خشک شدن به روش لایه نازک. سال نهم نشریه نوآوری در علوم و فناوری غذایی. (۱): ۵۰-۴۱.

نرگسی، ف.، فدوی، ع. و درویشی، ح. ۱۳۹۰. تعیین و بررسی انرژی مصرف شده طی فرایند گرمایش اهمی و هدایت اجباری برای تولید رب گوجه فرنگی، پایان نامه دکتری. دانشگاه ایلام. دانشکده کشاورزی. ورامین. ایران.

نقوی، ع.، دهقان نیا، ج. و قنبرزاده، ب. ۱۳۹۳. مدل سلزی سینتیک از دست دادن رطوبت طی فرایند سرخ کردن عمیق قطعات سیب زمینی پیش تیماره شده با مافوق صوت و خشک کردن. سال اول فصلنامه علوم و فناوری های نوین غذایی. (۳): ۶۷-۴۹.

Muhammad, A., Shitu1, I. & Tadda, M. A. 2019. OHMIC HEATING AS ALTERNATIVE PRESERVATION TECHNIQUE-AREVIEW. ARID ZONE JOURNAL OF ENGINEERING, TECHNOLOGY & ENVIRONMENT 18:3.

Bravo, J., Sanjuan, N., Ruales, J. & Mulet, A. 2009. Modeling the dehydration of apple slices by deep fat frying. Drying Technol 27:782-786.

Doymaz, I. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. Journal of Food Engineering. 61:359-364.

Darvishi, H., Hosainpour, A., Nargesi, F., Khoshtaghza, M.H. & Torang, H. 2016. Ohmic processing: temperature dependent electrical conductivities of lemon juice. Modern Applied Science 5(1): 210-216.

Dornoush Jafarpour, D. & MohammadBagherHashemi, S. 2022. Ohmic heating application in food processing: Recent achievements and perspectives. Foods and Raw Materials. 216-222

Aurina, J. & Sari, A. 2021. Ohmic Heating: A Review and Application in Food Industry. Advances in Biological Sciences Research 19: 107-113.

Troncoso, E. & Pedreschi, F. 2009. Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. *LWT-Food Sci Technol* 42: 1164-1173.

Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X. & Hu, X. 2007. Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. *Journal of Food Engineering* 80: 536-544.

Zina T., Alkanan, A., Altemimi, B., Al-Hilphy, R. S., Watson, G. & Pratap-Singh, A. 2021. Ohmic Heating in the Food Industry: Developments in Concepts and Applications during 2013-2020. *journal of applied science* 11: 2507.

Mathematical modeling of tomato paste growth under ohmic heating

Mehdi Turkian Beldaji¹

Received: 2021/12/06

Accepted: 2022/06/07

ABSTRACT

Ohmic heating is an advanced thermal processing method in which heat is internally generated within foods by passing an alternating electric current through them. In this research, mathematical modeling of ohmic heating of tomato paste in 4 levels of voltage gradient (5, 7, 9 and 11 v/cm) has been studied. The results showed that in all the voltage gradients, the Henderson and Pich model results are the best evaluated models for the moisture reduction of tomato paste under the ohmic heating system. And according to the R^2 coefficient, the pich model can be used to model the drying process of the ohmic heating process.

Keywords: tomato paste, ohmic heating, mathematical mode

¹ Assistant Professor, Department of Mechanics, Faculty of Basic Sciences, Islamic Azad University, Varamin-Pishva and Qarchak branch, Varamin, Iran

*Corresponding author: mhdtorkian@yahoo.com

