

مطالعه و مدل‌سازی ریاضی فرآیند آبیگری اسمزی برش‌های کیوی با پیش‌تیمار امواج فراصوت

میناالسادات برگ‌گل^۱، مرتضی صادقی^{۲*}، سیداحمد میره‌ای^۳، میلاد فتحی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

^۲ دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

^۳ استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

^۴ استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

* مکاتبه کننده: sadeghimor@cc.iut.ac.ir

چکیده

یکی از روش‌های نگه‌داری میوه‌جات، فرآیند آبیگری اسمزی است که در آن علاوه بر کاهش رطوبت، جذب مواد جامد نیز صورت می‌پذیرد. به هر جهت، پایین بودن سرعت خروج رطوبت در فرآیند آبیگری اسمزی یکی از معایب آن است. بازدهی مطلوب هر فرآیند مستلزم کنترل بهتر آن می‌باشد که خود نیازمند مطالعه‌ی دقیق مکانیسم‌های درگیر طی فرآیند و نحوه‌ی عملکرد متغیرها است. در این زمینه، بکارگیری مدل‌سازی ریاضی می‌تواند مطالعه پدیده شناختی را تسهیل کند. هدف از انجام این تحقیق مطالعه و مدل‌سازی ریاضی فرآیند آبیگری اسمزی برش‌های میوه‌ی کیوی در محلول اسمزی با غلظت‌های ساکاروز ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه بریکس، زمان غوطه‌وری ۰، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه همراه با پیش‌تیمار اعمال امواج فراصوت به صورت غیر مستقیم به مدت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه می‌باشد. تیمار بهینه با استفاده از دو روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک تعیین شد. از طریق مدل‌سازی تحلیلی فرآیند آبیگری اسمزی به صورت دو بعدی در مختصات استوانه‌ای، مقادیر ضریب نفوذ جرمی رطوبت به دست آمدند. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت ساکاروز، مقدار ضریب نفوذ جرمی به دلیل افزایش فشار اسمزی بالا می‌رود. به علاوه مشخص شد که از پیش‌تیمار فراصوت می‌توان برای بهبود آبیگری اسمزی به منظور افزایش سرعت افت رطوبت محصول استفاده کرد. برای تیمار بهینه حاصل از روش سطح پاسخ، مقدار غلظت ۵۰ درصد، زمان پیش‌تیمار فراصوت ۳۰ دقیقه و مقدار زمان غوطه‌وری ۱۰ دقیقه به دست آمد. تحت این شرایط مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل برای افت رطوبت برابر با ۷/۹۷۱۷ درصد و برای جذب مواد جامد برابر با ۰/۹۶۲۰ درصد بود.

واژگان کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، پیش‌تیمار فراصوت، روش سطح پاسخ، مدل‌سازی تحلیلی



مقدمه

میوه کیوی با نام علمی *Actinidia Deliciosa* بومی کشور چین بوده و مرکز اصلی آن آکتینیدیا^۱ در سلسله جبال جنوب غربی چین است. میوه کیوی سرشار از ویتامین‌های مختلف می‌باشد. به دلیل فسادپذیری سریع و کوتاه بودن عمر آن از یک سو و بالاتر بردن ارزش افزوده آن از طریق کاربرد در صنایع غذایی از سوی دیگر، فرآوری آن از اهمیت خاصی برخوردار است.

آبگیری اسمزی شامل خارج کردن بخشی از رطوبت بافت سلول توسط یک محلول هایپرتونیک می‌باشد. طی این فرآیند، سه جریان انتقال جرم صورت می‌گیرد: جریان آب از ماده غذایی به محلول اسمزی، جریان مواد حل شده در محلول اسمزی به ماده غذایی و جریان مواد حل شده ماده غذایی به محلول مانند اسید، ویتامین، شکر و ... (Spiazzi and Mascheroni, 1997).

به طور کلی، آبگیری اسمزی یک پیش تیمار غیرحرارتی است که از مزایای آن عدم وارد شدن صدمات حرارتی به محصول، خروج رطوبت بدون تغییر فاز، کاهش قهوه‌ای شدن آنزیمی به علت محدودیت تماس با اکسیژن، کاهش حجم نمونه و در صورت دلخواه غنی‌سازی نمونه با موادی مانند ویتامین C و کلسیم را می‌توان برشمرد (Silva et al., 2014). با این وجود، مقدار از دست دادن رطوبت محصول به روش آبگیری اسمزی محدود است و برای رسیدن به سطح مطلوب ممکن است زمانی طولانی برای غوطه‌وری لازم باشد. در نتیجه، انجام فرآیند باعث ایجاد تأثیرات نامطلوبی بر بافت، رنگ و دیگر خصوصیات حسی محصول خواهد شد (Verma et al., 2014). از جمله روش‌های تسریع در انتقال جرم در خشک کردن به روش اسمزی، پیش تیمارهای خلاء نوسانی، فشار پالسی و امواج فراصوت می‌باشند (McClements, 1995; Nowacka et al., 2014). به منظور بهبود کیفیت، آبگیری اسمزی معمولاً همراه با پیش تیمار امواج فراصوت انجام می‌شود که انتشار امواج فراصوت پیش از آبگیری اسمزی سبب ایجاد پدیده حفره‌سازی^۲ صوتی در ماده به نام اثر اسفنجی^۳ می‌شود (Nowacka et al., 2014).

در فرآیندهای تولید مواد غذایی همچون خشک کردن، آبگیری اسمزی، سرخ کردن، جداسازی غشایی و ... پدیده‌ی انتقال جرم صورت می‌گیرد (Wolti-Chanes, 2002). این انتقال به دلیل تغییر در تعادل فیزیکی سیستم ناشی از اختلاف غلظت است که ممکن است انتقال در یک فاز یا از یک فاز به فاز دیگر باشد (فرحانی نژاد، ۱۳۹۳). مدل‌سازی ریاضی ابزاری است که به توسعه معادلاتی که به توصیف یک پدیده یا یک فرآیند کمک می‌کند، اطلاق می‌شود و به دو روش تجربی و تحلیلی انجام می‌شود.

طی تحقیقی مدل‌سازی سینتیک آبگیری اسمزی شاه‌بلوط در دماها و غلظت‌های مختلف تا مدت ۸ ساعت انجام شد و نتایج نشان داد که فرآیند به دما و غلظت محلول وابسته است (Chenlo et al., 2006). در مطالعه‌ای دیگر، اثر آبگیری اسمزی و پیش تیمار فراصوت در فشار اتمسفر برای قطعات خربزه مطالعه شد. بر اساس نتایج، برای زمان‌های آبگیری کمتر از ۳۰ دقیقه، به

^۱. Actinidia

^۱. Cavitation

^۲. Sponge effect



علت کاهش اختلاط قند، نفوذ آب افزایش یافت (Fernandes *et al.*, 2008). ینگ سین و همکاران (Xin *et al.*, 2013) اثر ترهالوز و اعمال امواج فراصوت را بر وضعیت آب موجود در کلم بروکلی با استفاده از روش DSC، تشدید مغناطیسی هسته‌ای میدان پایین^۱ و تصویربرداری تشدید مغناطیسی^۲ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که آبیگری اسمزی بر ساختار داخلی کلم بروکلی اثر می‌گذارد.

هدف از انجام این تحقیق مطالعه تأثیر اعمال امواج فراصوت به عنوان پیش‌تیمار بر سینتیک فرآیند آبیگری اسمزی ورقه‌های کیوی می‌باشد. به این منظور، متغیرهای زمان غوطه‌وری و غلظت محلول اسمزی مورد مطالعه قرار می‌گیرند. همچنین، مدل‌سازی تحلیلی فرآیند آبیگری اسمزی برش‌های میوه مطالعه شده و تیمار بهینه به دو روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک تعیین می‌گردد.

مواد و روش‌ها

آبیگری اسمزی

در ابتدا نمونه‌های کیوی با درجه رسیدگی و اندازه یکنواخت از بازار محلی تهیه و تا زمان انجام آزمایش‌ها در دمای ۳ درجه‌ی سلسیوس در یخچال نگهداری شد. پس از شست‌وشو و جداسازی پوست، برش‌هایی با ضخامت ۸ میلی‌متر از آن‌ها تهیه گردید. رطوبت اولیه کیوی بر اساس استاندارد AOAC (۱۹۹۷) تخمین زده شد (فرحانی نژاد، ۱۳۹۳). برای اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها نیز از یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم استفاده شد.

در این تحقیق محلول اسمزی ترکیبی از شکر خوراکی تصفیه شده و آب مقطر بود. به همین منظور نمونه‌ها در محلول ساکاروز با غلظت‌های (تیمارهای) ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه‌ی بریکس در بازه‌های زمانی ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه غوطه‌ور شدند. به منظور مطالعه اثر اعمال امواج فراصوت به عنوان پیش‌تیمار برای فرآیند آبیگری اسمزی، برش‌های کیوی پس از علامت‌گذاری برای شناسایی از یکدیگر و تثبیت وزن، به مدت‌های ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه در حمام فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و توان ۱۳۰ کیلووات با نسبت وزنی ۱۵ به ۱ (وزن آب مقطر به وزن نمونه) تحت اثر امواج قرار گرفتند. اعمال امواج فراصوت به شیوه غیر مستقیم و با استفاده از دستگاه مولد امواج فراصوت صورت گرفت. در طول انجام آزمایش، دما بیشتر از ۲ درجه سلسیوس تغییر نمی‌کرد. پس از اعمال پیش‌تیمار فراصوت، نمونه‌ها در محلول اسمزی تشریح شده با نسبت وزنی ۱۵ به ۱ (وزن محلول اسمزی به وزن نمونه) غوطه‌ور شدند. نسبت وزنی محلول به میوه برابر با ۱۵ به ۱ به منظور جلوگیری از تغییر غلظت محلول انتخاب شد (Nowacka *et al.*, 2014). تمام آزمایش‌ها حداقل در دو تکرار انجام گرفت. دمای محیط انجام آزمایش‌ها برابر با 18 ± 2 درجه‌ی سلسیوس بود.

³. LF-NMR (Low Field Nuclear Magnetic Resonance)

⁴. MRI (Magnetic Resonance Imaging)

مطالعه سینتیک فرآیند آبیگری اسمزی با به دست آوردن مقدار افت رطوبت و جذب مواد جامد امکان پذیر است. بدین جهت وزن نمونه های خارج شده از محلول اسمزی پس از آبیگری با آب مقطر و گرفتن رطوبت سطحی توسط کاغذ جاذب رطوبت، اندازه گیری شد. سپس نمونه ها در آون با دمای ۷۰ درجه ی سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت طبق استاندارد AOAC قرار داده شدند. مقدار درصد محتوای رطوبتی از معادله (۱) به دست آمد. همچنین مقدار افت رطوبت (WL) و جذب مواد جامد (SG) به ترتیب از رابطه های (۲) و (۳) محاسبه شدند (Xin et al., 2013).

$$M = \frac{(M_0 - m_0)}{M_0} \quad (1)$$

$$WL = \frac{(M_0 - m_0) - (M - m)}{m_0} \quad (2)$$

$$SG = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (3)$$

که، M_0 جرم کیوی تازه قبل از فرآیند آبیگری اسمزی (گرم)، M جرم کیوی پس از فرآیند آبیگری اسمزی، m_0 جرم کیوی تازه خشک شده (گرم) و m جرم کیوی خشک شده بعد از فرآیند آبیگری اسمزی (گرم) می باشند.

تعیین تیمار بهینه

تعیین تیمار بهینه به دو روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک انجام گرفت. در حقیقت روش سطح پاسخ یک روش آماری است که برای بهینه سازی فرآیندها استفاده می گردد. هدف از بهینه سازی در این مطالعه تعیین کمترین مقدار جذب شکر به ازای بیشترین مقدار افت رطوبت طی فرآیند آبیگری اسمزی برش های کیوی با اعمال پیش تیمار فراصوت می باشد. متغیرهای مستقل در پژوهش حاضر شامل: غلظت های ساکاروز در سه سطح ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه بریکس، مدت زمان پیش تیمار فراصوت در چهار سطح ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه و مدت زمان غوطه وری در محلول اسمزی در شش سطح ۰، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه می باشند. دو متغیر وابسته نیز عبارتند از مقدار آب از دست داده شده (WL) و مواد جامد به دست آمده (SG) که بهینه سازی فرآیند مذکور بر اساس آن ها انجام شد. در مجموع ۷۲ آزمایش مطابق طرح فاکتوریل^۱ مورد آزمون قرار گرفت. بهینه سازی با روش سطح پاسخ با استفاده از نرم افزار Design-Expert 7.0.0 انجام شد.

الگوریتم ژنتیک از اصول انتخاب طبیعی داروین جهت بدست آوردن بهینه به منظور پیش بینی یا تطبیق الگو استفاده می شود. الگوریتم ژنتیک روش خوبی برای پیش بینی بر مبنای رگرسیون است. این الگوریتم در ابتدا دارای ورودی هایی است که طی یک فرآیند الگوبرداری شده از تکامل ژنتیکی به راه حل تبدیل شده و سپس توسط تابع مورد ارزیابی قرار می گیرد که اگر خروجی مطابق

¹ General factorial

الگو باشد الگوریتم خاتمه می‌یابد. الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم مبنی بر تکرار می‌باشد که اغلب بخش‌هایش به صورت تصادفی انتخاب می‌شود (Sharma et al., 2014).

در این تحقیق از تابع برازندگی $f(x)$ (رابطه (۴)) با مقدار احتمال جهش $0/001$ و سرعت تلقیح 80% برای بهینه‌سازی فرآیند آبیگری اسمزی برش‌های کیوی با اعمال پیش‌تیمار فراصوت استفاده شد.

$$f(x) = 3 - (-(Solid\ Gain) + (Water\ Loss)) \quad (4)$$

در روش الگوریتم ژنتیک، توسط برنامه‌ای که در نرم‌افزار Matlab نوشته شد، مقدار بهینه به دست آمد. عدد ۳ اضافه شده در تابع برازندگی برای جلوگیری از منفی شدن این تابع استفاده شد (Mohebbi et al., 2011).

مدل‌سازی انتقال جرم

هدف اصلی عملیات در بسیاری از واحدهای صنعتی، تغییر غلظت اجزای موجود در محلول‌ها و مخلوط‌های مختلف و به دست آوردن فرآورده‌های جدید است. بدین منظور، گاهی از روش‌هایی استفاده می‌شود که در آن‌ها عامل اختلاف غلظت اجزاء، موجب انتقال جرم می‌گردد (Hojnik et al., 2008). منظور از انتقال جرم مهاجرت و انتقال جزء تشکیل دهنده یک سیال یا جزء مخلوط می‌باشد. این انتقال ممکن است در یک فاز یا انتقال از یک فاز به فاز دیگر صورت گیرد. فرآیند آبیگری اسمزی نیز از دو فاز جامد و مایع تشکیل می‌شود که گرادیان غلظت به عنوان نیروی محرکه یک جزء در یک محیط معین عمل می‌کند. در شکل (۱) طرحواره یک برش کیوی به همراه ابعاد آن نمایش داده شده است. مدل ریاضی (معادله دیفرانسیل حاکم) انتقال جرم (انتقال رطوبت) با استفاده از قانون دوم فیک در شرایط ناپایا در مختصات استوانه‌ای در رابطه (۵) آورده شده است. این معادله پروفایل انتقال جرم را به عنوان تابعی از زمان برای یک استوانه محدود به قطر $2R$ و ضخامت $2L$ توصیف می‌نماید (Crank, 1975; Mercali et al., 2011; Ochoa-Martinez et al., 2007; Panagiotou et al., 1998).

با توجه به شکل برش‌های کیوی، از این مدل برای محاسبه ضریب نفوذ انتقال جرم طی آبیگری اسمزی استفاده شد.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (5)$$

$$(t > 0; \quad 0 < r < R; \quad -L < x < +L)$$

در صورتی که ضریب نفوذ D ثابت باشد، خواهیم داشت:

$$\frac{\partial C(r, x, t)}{\partial t} = -D \left\{ \frac{\partial^2 C(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 C(r, x, t)}{\partial x^2} \right\} \quad (6)$$

شرط اولیه:

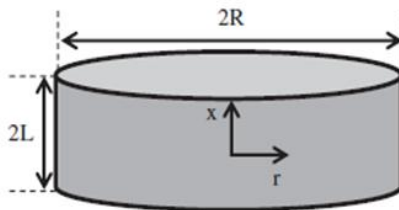
$$C(r, x, 0) = C_0$$

شرایط مرزی:

$$C(r, -L, t) = C_e$$

$$C(R, x, t) = C_e$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad \text{at} \quad R = 0, x = +L; t > 0;$$



شکل ۱- طرح کلی برش کیوی به همراه ابعاد آن

حل تحلیلی کرانک برای معادله دیفرانسیل حاکم در مختصات دکارتی (برای صفحه تخت) در معادله (۷) و برای معادله دیفرانسیل حاکم در مختصات استوانه‌ای (برای استوانه) در معادله (۸) ارائه شده است. رابطه‌ی حاکم برای شرایط این تحقیق از رابطه (۹) که از ضرب دو رابطه قبل به دست می‌آید، قابل استخراج می‌باشد (Crank, 1975).

$$\frac{m_w}{m_{w0}} = \frac{C_t - C_e}{C_0 - C_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{Dt}{4l^2}\right) \quad (7)$$

$$\frac{m_w}{m_{w0}} = \frac{C_t - C_e}{C_0 - C_e} = 4 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{Dt}{R^2}\right) \quad (8)$$

$$W_{W/S} = \frac{C_t - C_e}{C_0 - C_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} B_n B_m \exp\left[-(\mu_n^2 + \mu_m^2 K_l^2) \frac{D_{eff} t}{R^2}\right] \quad (9)$$

که، $\mu_{n,m}$ اولین ریشه تابع بسل $J_0(\lambda_n R) = 0$ می‌باشد.

$$K_l = \frac{R}{L}; \quad B_n = \frac{4}{\mu_n^2}; \quad B_m = \frac{2}{\mu_m^2} \quad \mu_{m,n} = (2m-1) \frac{\pi}{2};$$

برای حل معادله فوق، لازم به دانستن غلظت تعادلی محتوای رطوبتی می‌باشد. بدین منظور از معادله پلگ^۱ استفاده شد که نخستین بار برای توصیف رفتار جذبی مواد خشک پیشنهاد شد (Peleg, 1988). پائولو و همکاران مدل پلگ را برای مواد جامد

¹. Peleg's equation

محلول و محتوای رطوبتی، بازتعریف کردند (Palou *et al.*, 1994) و در نهایت توسط پارک و همکاران به صورت معادله (۱۰) درآمد (Park *et al.*, 2002):

$$C_t - C_0 = \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (10)$$

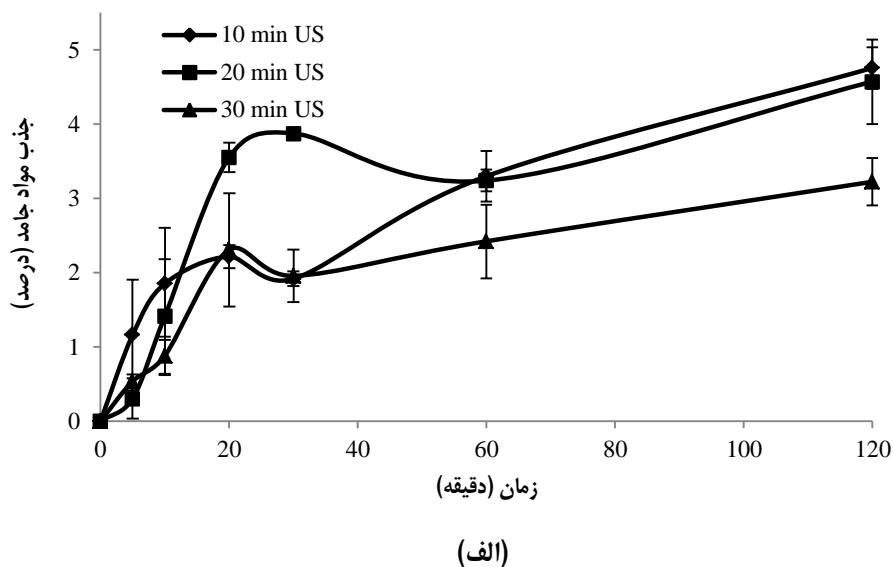
غلظت تعادلی برای حالتی که زمان به سمت بینهایت میل می‌کند، از معادله (۱۱) به دست می‌آید (Deng and Zhao, 2008):

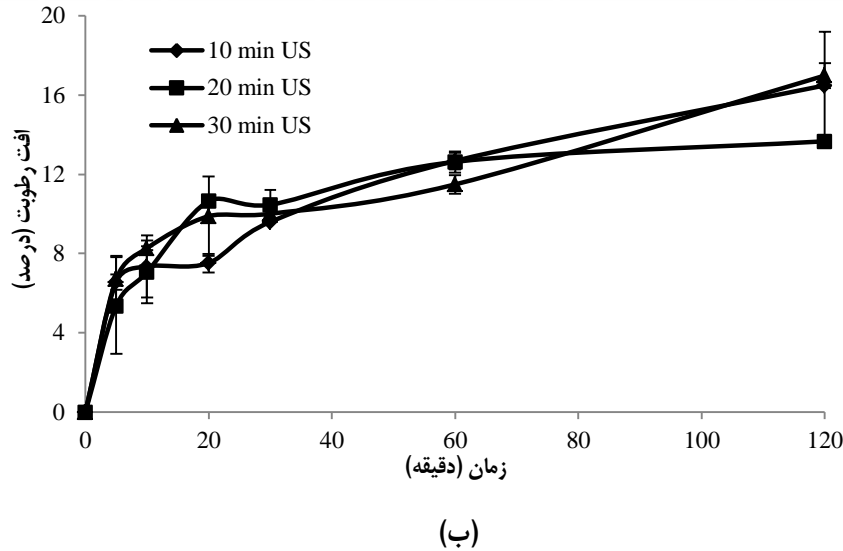
$$C|_{t \rightarrow \infty} = C_e = C_0 \pm \frac{1}{k_2} \quad (11)$$

نتایج و بحث

سینتیک فرآیند آبیگری اسمزی

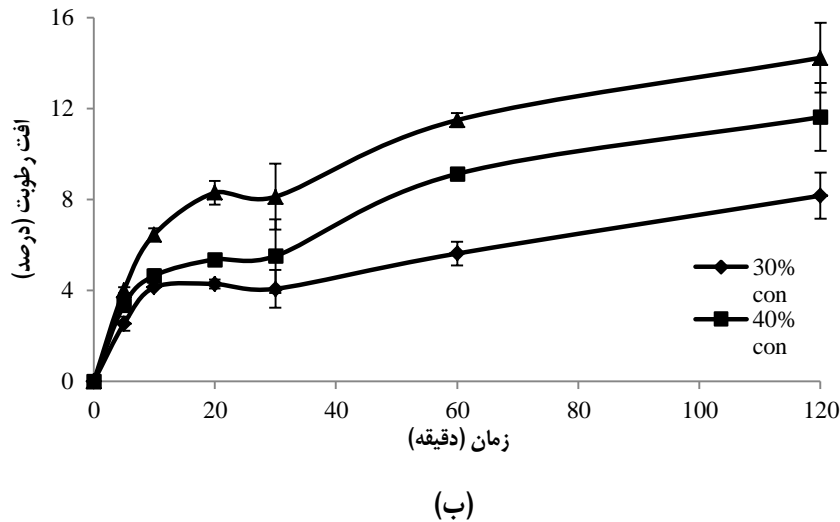
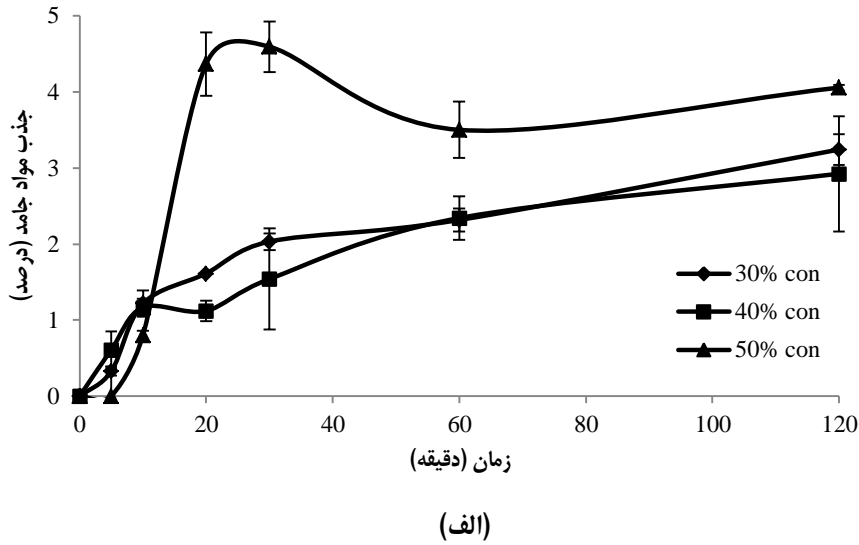
شکل (۲) نمونه‌ای از نتایج سینتیک فرآیند را برای غلظت‌های مختلف محلول اسمزی (۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه بریکس) و مدت‌های مختلف اعمال پیش تیمار فراصوت (۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه) نشان می‌دهد. در شکل میله‌های عمودی بیانگر انحراف معیار هستند.





شکل ۲- اثر مدت زمان پیش تیمار فراصوت (US) بر سینتیک آبگیری اسمزی برش‌های کیوی در محلول اسمزی ۵۰ درجه بریکس: الف) تغییرات جذب مواد جامد و ب) افت رطوبت با مدت غوطه‌وری (مقادیر بیانگر میانگین \pm یک انحراف معیار هستند). به طور کلی منحنی‌ها نشان می‌دهند که اعمال پیش تیمار فراصوت باعث کاهش جذب مواد جامد و افزایش افت رطوبت می‌شود. به بیان دیگر، با افزایش زمان اعمال پیش تیمار فراصوت در غلظت ثابت، جذب مواد جامد کاهش و افت رطوبت افزایش می‌یابد. به طور کلی، اعمال پیش تیمار فراصوت و مدت زمان غوطه‌وری بر افت رطوبت و جذب مواد جامد اثر معنی‌داری دارد. امواج فراصوت باعث ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در ساختار بافت کیوی می‌شوند، اما نه به گونه‌ای که عملکرد سلول‌ها تخریب گردد. به دلیل شکل‌گیری میکروکانال‌ها در اثر اعمال امواج فراصوت، بافت کیوی مقاومت کمتری به نفوذ آب و قند پیدا می‌کند که طبق پتانسیل اسمزی، منجر به افت رطوبت بیشتر و کاهش جذب مواد جامد می‌شود (Fernandes *et al.*, 2009). جریان اغتشاشی در پیش تیمار فراصوت پدیده حفرگی را سبب می‌شود که می‌تواند مقاومت خارجی را در برابر انتقال رطوبت به طور مؤثرتری کاهش دهد. این کاهش در واقع به دنبال کاهش ضخامت لایه مرزی نفوذ اتفاق می‌افتد (Cárcel *et al.*, 2007).

شکل (۳) نتایج سینتیک فرآیند آبگیری برش‌های کیوی (تغییرات جذب مواد جامد و افت رطوبت با مدت غوطه‌وری) را بدون اعمال پیش تیمار فراصوت برای غلظت‌های مختلف محلول اسمزی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت در یک زمان آبگیری اسمزی یکسان، مقدار افت رطوبت افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، غلظت محلول اسمزی اثر معنی‌داری بر مقدار افت رطوبت و جذب مواد جامد دارد. این نکته به افزایش فشار اسمزی در نتیجه افزایش غلظت محلول اسمزی نسبت داده می‌شود (Awad *et al.*, 2012; Fernandes *et al.*, 2009). نتایج مشابهی نیز توسط نوشاد و همکاران برای آبگیری اسمزی میوه به در ۴۰ و ۶۰ درصد ساکاروز ارائه شد (Verma *et al.*, 2014). رحیمی و همکاران نیز دریافتند که افزایش غلظت محلول قند به طور قابل توجهی موجب کاهش رطوبت برش‌های سیب می‌گردد (Jamshid Rahimi 2013).



شکل ۳- اثر غلظت محلول اسمزی بر تغییرات جذب مواد جامد و افت رطوبت با مدت زمان غوطه‌وری بدون اعمال بیش تیمار فراصوت الف) جذب مواد جامد ب) افت رطوبت (مقادیر بیانگر میانگین \pm یک انحراف معیار هستند).

مقادیر ضریب نفوذ

نتایج مدل‌سازی سینتیک افت رطوبت و ضرایب نفوذ جرمی رطوبت با استفاده از روابط (۷) تا (۱۳) در جدول (۱) گزارش شده است. ملاحظه می‌شود که مقادیر ضریب نفوذ مؤثر به دست آمده در دامنه‌ی 10^{-8} تا 10^{-7} قرار دارند. فرحانی‌نژاد نیز مقادیر ضریب نفوذ جرمی رطوبت موز را در محدوده 10^{-10} تا 10^{-8} به دست آورد (فرحانی‌نژاد، ۱۳۹۴). در جدول (۱)، علاوه بر ضرایب نفوذ پارامترهای معادله پلگ نیز آورده شده است که برای به دست آوردن غلظت تعادلی رطوبت، طی آگیری اسمزی لازم است. نتایج نشان می‌دهد که در هر تیمار با افزایش غلظت ساکاروز، مقدار ضریب نفوذ جرمی به دلیل افزایش فشار اسمزی بالا می‌رود و در نتیجه، افزایش خروج رطوبت را به دنبال دارد. در مورد پارامترهای معادله پلگ روند مشخصی با افزایش غلظت محلول اسمزی



مشاهده نشد. در این مورد نتایج مشابهی توسط پلگ و همکاران (Park et al., 2002) و خوئی و حصارى (Khoysi and Hesari, 2007) گزارش شده است.

جدول ۱- ثابت‌های معادله پلگ و مقادیر ضرایب نفوذ مؤثر برای آبیگری اسمزی ورقه‌های کیوی تحت شرایط مختلف.

شاخص آماری ضریب نفوذ R^2	ضریب نفوذ (m^2/s)	شاخص آماری معادله پلگ R^2	پارامترهای معادله پلگ		غلظت ساکاروز	زمان پیش تیمار فراصوت (min)
			k_2	k_1		
۰/۹۴۵	$5/112 \times 10^{-8}$	۰/۹۸۵	۰/۳۶۴	۱/۰۴۸	۳۰	۰
۰/۹۲۰	$6/296 \times 10^{-8}$	۰/۹۸۸	۱/۲۷۷	۷/۹۰۵	۴۰	
۰/۹۳۷	$8/960 \times 10^{-8}$	۰/۹۸۴	۱/۲۶۷	۰/۶۵۳	۵۰	
۰/۹۸۰	$8/233 \times 10^{-8}$	۰/۹۸۶	۱/۹۹۷	۱۳/۵۳۴	۳۰	۱۰
۰/۹۳۶	$8/960 \times 10^{-8}$	۰/۹۸۸	۱/۱۲۹	۵/۰۷۳	۴۰	
۰/۹۰۳	$9/929 \times 10^{-8}$	۰/۹۸۵	۱/۷۸۷	۱۱/۱۶۲	۵۰	
۰/۹۷۱	$9/444 \times 10^{-8}$	۰/۹۹۲	۱/۱۳۵	۵/۳۸۶	۳۰	۲۰
۰/۹۵۷	$9/929 \times 10^{-8}$	۰/۹۶۳	۱/۰۳۰	۳/۶۸۵	۴۰	
۰/۹۵۵	$1/574 \times 10^{-7}$	۰/۹۸۵	۱/۷۱۵	۷/۴۹۱	۵۰	
۰/۹۴۸	$9/202 \times 10^{-8}$	۰/۹۵۵	۰/۸۱۶	۵/۴۱۷	۳۰	۳۰
۰/۹۸۴	$1/429 \times 10^{-7}$	۰/۹۷۴	۱/۹۱۸	۱۷/۸۲۶	۴۰	
۰/۹۲۰	$1/719 \times 10^{-7}$	۰/۹۶۸	۱/۵۴۹	۱۱/۵۱۰	۵۰	

نتایج نشان می‌دهد که در یک غلظت محلول اسمزی ثابت، با افزایش مدت زمان پیش تیمار فراصوت، ضریب نفوذ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش غلظت در مدت زمان ثابت اعمال پیش تیمار فراصوت، ضریب نفوذ جرمی رطوبت روند افزایشی دارد. از طرفی در محیط‌های جامد، عبور امواج فراصوت سبب ایجاد انبساط و انقباض‌های تناوبی می‌شود که تشکیل ریزکانال‌هایی را در بافت باعث می‌شود. بنابراین، انتقال رطوبت از این طریق نیز تسهیل می‌یابد (Shamaei et al., 2012). نتایج مشابهی نیز توسط کارسل و همکاران در زمینه آبیگری اسمزی تسهیل شده با امواج فراصوت و چرخش مکانیکی برای مکعب‌های سیب گزارش شده است (Cárcel et al., 2007). با توجه به بحث‌های ذکر شده انتظار می‌رود که تیمارهای فراصوت دارای ضرایب نفوذ مؤثر بیشتری نسبت به چرخش مکانیکی باشند. علت این پدیده را می‌توان به تخریب بافت و نقش ریزکانال‌ها در تسهیل خروج رطوبت یا انتقال شکر نسبت داد.

نتایج تیمار بهینه

همان‌طور که تشریح شد، در این مطالعه شرایط بهینه فرآیند آبیگری اسمزی برش‌های کیوی با استفاده از دو روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک تعیین شد. در شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب مدل‌های برازش شده به داده‌ها به روش‌های سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک نشان داده شده و نتایج برای تیمار بهینه نیز در جدول (۲) ارائه شده است.

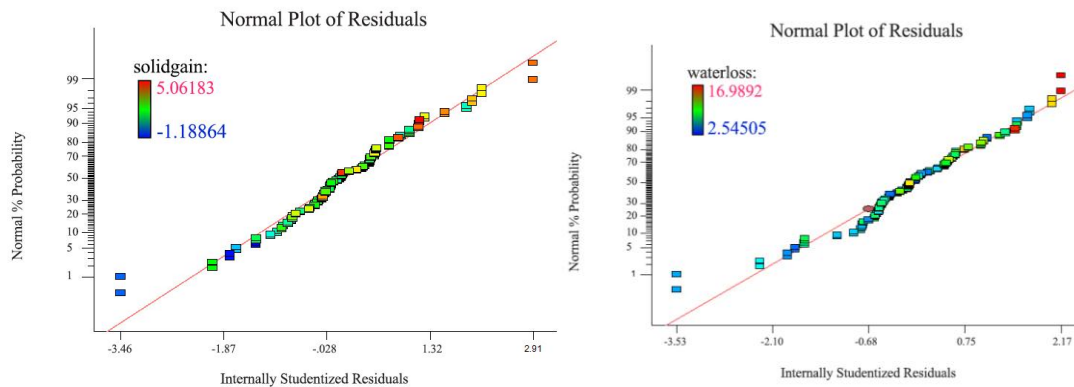


به منظور اعتبارسازی نتایج بهینه‌سازی، شرایط پیش‌بینی شده مورد آزمون قرار گرفت. بدین منظور، اختلاف پارامترهای اندازه‌گیری شده با داده‌های پیش‌بینی شده با استفاده از پارامترهای آماری ریشه میانگین مربعات خطای مطلق ($RMSE$) و مدول میانگین انحراف نسبی (P) مورد سنجش قرار گرفت که مقادیر این شاخص‌ها به ترتیب برای روش سطح پاسخ برابر با $1/737$ درصد (بر پایه تر) و $15/885$ درصد و برای روش الگوریتم ژنتیک برابر با $1/598$ (بر پایه تر) و $13/608$ درصد به دست آمدند که بیانگر خطای پایین بین داده‌های آزمایشی و داده‌های پیش‌بینی شده است. از مقایسه‌ی نتایج اعتبارسازی و مقدار افت رطوبت، تیمار بهینه حاصل از روش الگوریتم ژنتیک به عنوان تیمار بهینه انتخاب شد.

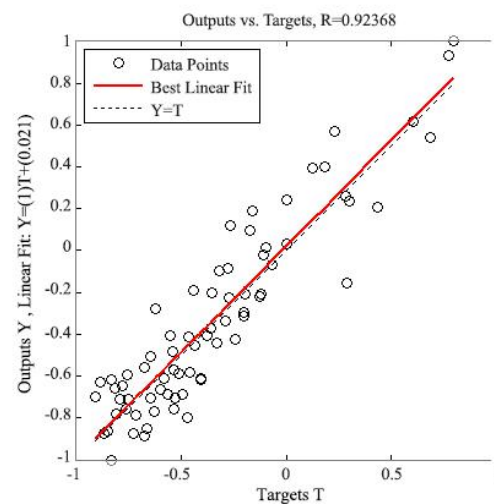
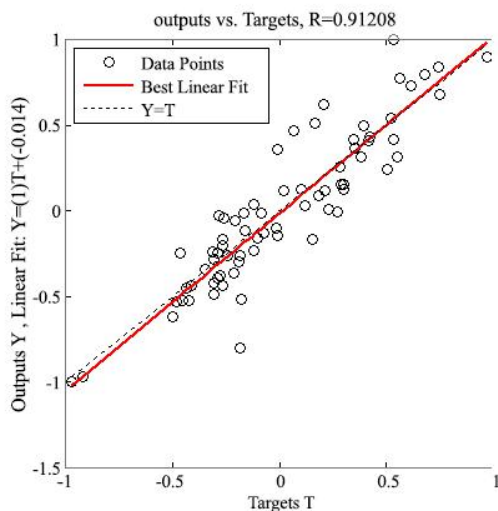
جدول ۲- تیمار بهینه به دو روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک

روش به دست آوردن تیمار بهینه	پیش‌تیمار فراصوت (min)	غلظت ساکاروز ($^{\circ}Brix$)	زمان غوطه‌وری (min)	WL (%)	SG (%)
روش سطح پاسخ	۳۰	۵۰	۱۰	۷/۹۷۱۷	۰/۹۶۲۰
الگوریتم ژنتیک	۲۵/۳۳۷۷	۴۹/۸۸۵۱	۹۹/۰۹۴۲	۱۵/۹۹۲۳	۲/۵۵۰۹

در نهایت برای تیمار بهینه از روش سطح پاسخ که در حقیقت روش تحلیل آماری است، مقدار غلظت ۵۰ درصد، زمان پیش‌تیمار فراصوت ۳۰ دقیقه و مقدار زمان غوطه‌وری ۱۰ دقیقه بدست آمد. تحت این شرایط مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل برای WL برابر با $7/9717$ درصد و برای SG برابر با $0/9620$ درصد است.



شکل (۴)- مدل برازش شده بر داده‌ها برای تعیین تیمار بهینه به روش سطح پاسخ



شکل ۵- مدل برازش شده بر داده‌ها برای تعیین تیمار بهینه به روش الگوریتم ژنتیک

نتیجه‌گیری کلی

بهینه‌سازی فرآیند آبیگری اسمزی همچون دیگر فرآیندهای خشک کردن از نظر کاهش مصرف انرژی و صدمات ناشی از آن به محصول، از چالش‌های واحدهای صنعتی می‌باشد. در این مطالعه، فرآیند آبیگری اسمزی برش‌های میوه کیوی با اعمال پیش‌تیمار فراصوت به مدت‌های مختلف و در غلظت‌های مختلف محلول اسمزی انجام شد. از پیش‌تیمار فراصوت می‌توان برای بهبود فرآیند آبیگری اسمزی به منظور افزایش سرعت افت رطوبت محصول استفاده کرد و همچنین می‌توان با مدت زمان غوطه‌وری و غلظت محلول اسمزی کارایی آبیگری اسمزی را بهبود بخشید. مدل‌سازی تحلیلی آبیگری اسمزی به صورت دو بعدی با مختصات استوانه‌ای انجام شد و مقدار ضرایب نفوذ جرمی رطوبت به دست آمد. تعیین شرایط بهینه در راستای بیشینه کردن افت رطوبت و کمینه کردن جذب مواد جامد صورت گرفت.

منابع

فرحانی‌نژاد، م.، ۱۳۹۳. مدل‌سازی انتقال جرم طی خشک کردن موز با استفاده از اتوماتای سلولی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

Awad T. S., H. A. Moharram, O. E. Shaltout, D. Asker and M. M. Youssef. 2012. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International* 48: 410-427.

Cárcel J. A., J. Benedito, C. Rosselló and A. Mulet. 2007. Influence of ultrasound intensity on mass transfer in apple immersed in a sucrose solution. *Journal of Food Engineering* 78: 472-479.

- Chenlo F., R. Moreira, C. Fernández-Herrero and G. Vázquez. 2006. Experimental results and modeling of the osmotic dehydration kinetics of chestnut with glucose solutions. *Journal of Food Engineering* 74: 324-334.
- Crank J. 1975. *The mathematics of diffusion*. London: Oxford Univ.
- Deng Y. and Y. Zhao. 2008. Effect of pulsed vacuum and ultrasound osmopretreatments on glass transition temperature, texture, microstructure and calcium penetration of dried apples (Fuji). *LWT - Food Science and Technology* 41: 1575-1585.
- Fernandes F. A. N., M. I. Gallão and S. Rodrigues. 2009. Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering* 90: 186-190.
- Hojnik M., M. Škerget and Ž. Knez. 2008. Extraction of iutein from Marigold flower petals – Experimental kinetics and modelling. *LWT - Food Science and Technology* 41: 2008.۲۰۱۶-
- Jamshid Rahimi A. S., Peter Olusola Adewale, Akinbode A. Adedeji, Michael O. Ngadi and Vijaya Raghavan 2013. Effect of Carboxymethyl cellulose coating and osmotic dehydration on freeze drying kinetics of Apple slices. *journal of foods*.
- Khoyi M .R. and J. Hesari. 2007. Osmotic dehydration kinetics of apricot using sucrose solution. *Journal of Food Engineering* 78: 1355-1360.
- McClements D. J. 1995. Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing. *Trends in Food Science & Technology* 6: 293-299.
- Mercali G. D., L. D. Ferreira Marczak, I. C. Tessaro and C. P. Zapata Noreña. 2011. Evaluation of water, sucrose and NaCl effective diffusivities during osmotic dehydration of banana (*Musa sapientum*, shum.). *LWT - Food Science and Technology* 44: 82-91.
- Mohebbi M., F. Shahidi, M. Fathi, A. Ehtiati and M. Noshad. 2011. Prediction of moisture content in pre-osmosed and ultrasounded dried banana using genetic algorithm and neural network. *Food and Bioproducts Processing* 89: 362-366.
- Nowacka M., U. Tylewicz, L. Laghi, M. Dalla Rosa and D. Witrowa-Rajchert. 2014. Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration. *Food Chemistry* 144: 18-25.

- Ochoa-Martinez C. I., H. S. Ramaswamy and A. A. Ayala-Aponte .۲۰۰۷ .A comparison of some mathematical models used for the prediction of mass transfer kinetics in osmotic dehydration of fruits. *Drying Technology* 25: 1613-1620.
- Palou E., A. López-Malo, A. Argaziz and J. Welti. 1994. The use of Peleg's equation to model osmotic concentration of Papaya. *Drying Technology* 12: 965-978.
- Panagiotou N. M., V. T. Karathanos and Z. B. Maroulis. 1998. Mass transfer modelling of the osmotic dehydration of some fruits. *International Journal of Food Science & Technology* 33: 267-28.۴
- Park K. J., A. Bin, F. P. Reis Brod and T. H. K. Brandini Park. 2002. Osmotic dehydration kinetics of pear D'anjou (*Pyrus communis* L.). *Journal of Food Engineering* 52: 293-298.
- Peleg M. 1988. An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science* 53: 1216-1217.
- Shamaei S., Z. Emam-Djomeh and S. Moini. 2012. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of cranberries: Effect of finish drying methods and ultrasonic frequency on textural properties. *Journal of Texture Studies* 43: 133-141.
- Sharma N., A. Singh, R. Sharma and Deepak. 2014. Modelling the WEDM process parameters for cryogenic treated D-2 tool steel by integrated RSM and GA. *Procedia Engineering* 97: 1609-1617.
- Silva K., M. Fernandes and M. Mauro. 2014. Osmotic dehydration of pineapple with impregnation of sucrose, Calcium, and Ascorbic Acid. *Food and Bioprocess Technology* 7: 385-397.
- Spiazzi E. and R. Mascheroni. 1997. Mass transfer model for osmotic dehydration of fruits and vegetables—I. Development of the simulation model. *Journal of Food Engineering* 34: 387-410.
- Verma D., N. Kaushik and P. S. Rao. 2014. Application of high hydrostatic pressure as a pretreatment for osmotic dehydration of Banana slices. Finish-dried by dehumidified air drying. *Food and Bioprocess Technology* 7: 1281-1297.
- Welti-Chanes J., and Velez-Ruiz, J. F. 2002. *Transport phenomena in food processing* CRC press.



Xin Y., M. Zhang and B. Adhikari. 2013. Effect of trehalose and ultrasound-assisted osmotic dehydration on the state of water and glass transition temperature of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis* L.). *Journal of Food Engineering* 119: 640-647.