

## مقاله پژوهشی

## بهینه‌یابی و مدل‌سازی سینتیک انتقال جرم طی فرآیند خشک کردن کف پوشی شیر خرمای

محمد نوشاد<sup>۱\*</sup>، محمد حجتی<sup>۲</sup>، پریسا قاسمی<sup>۲</sup>، احمد مستعان<sup>۴</sup>

۱. استادیار، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده علوم دامی و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی

خوزستان، ملاتانی، خوزستان ایران

۲. دانشیار، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده علوم دامی و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی

خوزستان، ملاتانی، خوزستان ایران

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده علوم دامی و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و

منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، خوزستان ایران

۴. استادیار، گروه فیزیولوژی و تکنولوژی پس از برداشت، مؤسسه تحقیقات علوم باغبانی، پژوهشکده خرما و میوه‌های گرمسیری،

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.

## چکیده

خشک کردن کف پوشی یکی از روش‌های جدید خشک کردن است که مواد مایع یا نیمه مایع به یک کف پایدار تبدیل شده و سپس در معرض خشک کردن توسط هوای داغ قرار می‌گیرند. در این پژوهش، تولید پودر شیر خرمای با استفاده از روش خشک کردن کف پوشی مورد مطالعه قرار گرفت و فرآیند تولید پودر شیر خرمای به روش سطح پاسخ، بهینه‌سازی شد. فاکتورهای مستقل شامل مالتودکسترین (۰، ۱۰، ۲۰ درصد وزنی - وزنی) و آلومین (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی - وزنی) و پاسخ‌ها شامل میزان پایداری و دانسیته کف، رطوبت، شاخص حلالیت آب، شاخص جذب آب، دانسیته فشرده، دانسیته غیرفشرده، pH و آبگیری مجدد بودند. به منظور بررسی رفتار خشک کردن کف شیر خرمای بهینه‌شده، فرآیند خشک کردن در سه دمای ۵۰°C، ۶۰ و ۷۰ و در دو ضخامت کف ۴ mm و ۶ mm بررسی شد و ۱۱ مدل خشک کردن جهت بررسی سینتیک خشک کردن مورد استفاده قرار گرفتند. بر اساس نتایج به دست آمده از این مطالعه، مدل پیچ قادر به توصیف رفتار خشک شدن کف شیر خرمای در تمام دماهای خشک کردن و ضخامت کف بود. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت نیز با استفاده از قانون دوم فیک محاسبه شد و در محدوده  $2/43 \times 10^{-8}$  تا  $3/08 \times 10^{-8}$   $m^2/s$  و  $4/67 \times 10^{-8}$  تا  $6/21 \times 10^{-8}$  با انرژی فعال‌سازی  $10/95$  و  $13/05$  به ترتیب برای ضخامت‌های ۴ mm و ۶ mm بود.

کلیدواژه‌ها: شیر خرمای، مالتودکسترین، خشک کردن کف پوشی، بهینه‌سازی.

## ۱. مقدمه

به عنوان آنتی‌پلاستیسیزر در انواع مواد غذایی و همچنین به عنوان ماده اصلی برای خشک کردن موادی که به سختی خشک می‌شوند؛ مانند آب‌میوه‌ها، طعم‌دهنده‌ها و شیرین کننده‌ها استفاده می‌شود [۱۱].

خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری مواد غذایی است که با کاهش فعالیت آبی مواد غذایی، سبب مهار میکروارگانیسم و واکنش‌های آنزیمی نامطلوب و جلوگیری از تغییرات فیزیکیوشیمیایی در طول ذخیره‌سازی می‌شود [۱۲-۱۳]. خشک کردن کف‌پوشی یکی از روش‌های خشک کردن نسبتاً جدید است که در آن پالپ یا آب میوه و سبزیجات با عامل ثبات‌دهنده یا کفزا، جهت ایجاد کف پایدار مخلوط می‌شود و سپس در محدوده دمایی ۵۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس، به‌منظور تولید محصولات فلس مانند یا پودری خشک می‌شود [۱۴-۱۵]. این روش خشک کردن برای محصولات حساس به حرارت، غذاهای با قند بالا و چسبناک یا دارای مواد تشکیل‌دهنده چسبنده مناسب است [۱۳]. در این روش، به‌دلیل افزایش سطح و کاهش انرژی، نرخ خشک شدن سریع‌تر از زمان خشک کردن معمولی با گردش هوای گرم است. خشک کردن کف‌پوشی دارای مزایایی از جمله روش اجرایی ساده و کم‌هزینه است و امکان ارائه محصولات با قیمت مناسب را برای مصرف‌کنندگان را فراهم می‌آورد [۱۶].

روش سطح پاسخ<sup>۲</sup> مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری است که برای مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل مسائلی که در آن پاسخ توسط چند متغیر تحت تأثیر قرار می‌گیرد، مفید است [۱۵]. یکی از معمول‌ترین روش‌های مورد استفاده جهت بهینه‌سازی عوامل مختلف، استفاده از طرح مرکب مرکزی است.

هدف از این پژوهش، بررسی و بهینه‌سازی شرایط تولید پودر شیره خرما به روش خشک کردن کف‌پوشی با متغیر درصد مالتودکسترین و آلومین بود. پس از بهینه‌یابی شرایط خشک کردن، مدل‌سازی سینتیک خشک کردن شیره خرما در روش کف‌پوشی با دو ضخامت ۴ mm و ۶ mm و در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ °C بررسی شد.

میوه خرما از درخت خرما<sup>۱</sup>، گیاهی تک‌لپه و دو پایه از خانواده نخل‌سانان، به‌دست می‌آید که بیش از ۴۰۰ رقم آن، در ایران مشاهده می‌شود؛ بدین ترتیب ایران از غنی‌ترین ژرمپلاسم خرما شناخته می‌شود [۱]. میوه خرما با ارزش تغذیه‌ای بالا، حاوی کربوهیدرات، فیبر غذایی، پروتئین، مواد معدنی (کلسیم، آهن، منیزیم، سلنیوم، مس، فسفر، پتاسیم، روی، گوگرد، کبالت، فلور، منگنز و بور) و ویتامین‌های A، C و انواع B (B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>6</sub> و B<sub>9</sub>) است [۲-۳].

شیره خرما از محصولات جانبی و با ارزش خرما است که عمدتاً از نوع درجه دوم و سوم تولید می‌شود و در آماده‌سازی مواد غذایی از قبیل مرباها، مارمالادها، نوشیدنی‌های تغلیظ شده، بستنی، شکلات، محصولات فنادی، شیرینی‌ها، میان وعده‌ها، محصولات نانویی و غیره استفاده می‌شود [۴-۵]. شیره خرما دارای قندهای طبیعی، نظیر فرکتوز و گلوکز و همچنین مقادیر اندکی ساکارز است؛ علاوه‌براین، مقادیر فراوانی مواد مغذی مانند پتاسیم، فسفر، آهن و کلسیم در آن مشاهده می‌شود و برای افراد دیابتی، کودکان در سنین رشد و برای سالمندان مفید است [۶].

شیره خرما همانند عسل و کنسانتره‌ها، منبع غنی از انواع قندها بوده و در عمل خشک کردن و تبدیل آن به پودر برخلاف سایر محصولات، بافت آن چسبنده می‌شود [۵]. یکی از مشکلات تولید پودر میوه‌ها چسبناک بودن آن‌ها در حین خشک کردن است که به محتوای بالای قندهای با وزن مولکولی پایین و هیگروسکوپیک مانند فروکتوز، گلوکز، ساکارز و همچنین اسیدهای آلی، مانند اسیدسیتریک و اسیدمالیک با دمای انتقال شیشه‌ای پایین نسبت داده می‌شود [۷-۸]؛ بنابراین نیاز است که از ترکیباتی با وزن مولکولی بالا، مانند صمغ عربی و مالتودکسترین استفاده شود که از طریق ممانعت از جذب رطوبت ذرات، ایجاد مانع فیزیکی بین آن‌ها و افزایش دمای انتقال شیشه‌ای سبب کاهش چسبندگی این مواد حین خشک کردن می‌شوند [۹-۱۰].

مالتودکسترین کربوهیدراتی با طعم شیرین ملایم است که

## ۲. مواد و روش‌ها

## ۱.۲. مواد

و مخلوط همگن شد. در ادامه، سفیده تخم‌مرغ در غلظت‌های مختلف (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی-وزنی) به آن اضافه شد (جدول ۱) و مخلوط در دمای محیط به مدت ۱۰ دقیقه توسط همزن خانگی (Moulinex، مدل BM6، ساخت اسپانیا) هم‌زده شد. کف تولیدشده به سینی‌هایی از جنس آلومینیوم با ارتفاع ۶ mm، طول ۴۸ cm و عرض ۴۰ cm منتقل و سپس در خشک‌کن (Heraeus، ساخت آلمان) با دمای ۶۰ °C خشک شد. پس از خروج از خشک‌کن، لایه خشک شده از سطح سینی‌ها جدا و با آسیاب خانگی آسیاب شد. پودر حاصله به منظور جلوگیری از جذب رطوبت در درون پلاستیک غیر قابل نفوذ نگهداری شد.

شیره خرما و مالتو دکسترین با DE=۱۸ به ترتیب از پژوهشکده خرما و میوه‌های گرمسیری اهواز و زر فرکتوز تهران خریداری شدند و تخم‌مرغ (برای تهیه سفیده تخم مرغ) از بازار محلی ملائانی خریداری شد.

## ۲.۲. آماده‌سازی کف شیر خرمای

جهت تهیه کف، ابتدا شیره خرما با آب مقطر، تا رسیدن به بریکس ۱۶ رقیق شد و سپس مقدار مشخصی از مالتودکسترین (۰، ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی-وزنی) به آن اضافه

جدول (۱) متغیرهای مستقل و مقادیر آن‌ها در طرح مرکب مرکزی

Table 1. Independent variables and their value in the central composite design

غلظت (درصد وزنی-وزنی) (Concentration, w/w%)			متغیرهای مستقل (Independent variables)
20	10	0	A: مالتودکسترین (Maltodextrin)
15	10	5	B: آلبومین (Albumin)

پوشیده شده بود، منتقل و بر روی استوانه مدرج قرار گرفت و میزان پایداری کف با استفاده از معادله (۲) محاسبه شد.

$$\text{پایداری کف} = \frac{V_{\text{foam}}}{V_{0\text{foam}}} \times 100 \quad (2)$$

در این معادله پایداری کف تفاوت بین حجم کف اولیه ( $V_{0\text{foam}}$ ) و حجم مایع منتقل شده ( $V_{\text{foam}}$ ) است.

## ۵.۲. رطوبت

محتوای رطوبتی پودر تولید شده، با استفاده از روش AOAC [۱۹] محاسبه شد؛ از این رو نمونه‌ها در دمای ۱۰۵ °C به مدت ۳ h در آون خشک شدند.

۶.۲. شاخص حلالیت<sup>۱</sup> و شاخص جذب آب<sup>۲</sup>

اغلب برای بیان میزان تغییرات ساختار مولکولی فرآورده‌های

## ۳.۲. دانسیته کف

دانسیته کف شیره خرما به صورت جرم واحد حجم ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) و مطابق معادله (۱) تعیین شد. بدین منظور از یک ظرف استوانه‌ای برای اندازه‌گیری حجم ( $V_{\text{foam}}$ ) و ترازو برای جرم ( $M_{\text{foam}}$ ) استفاده شد [۱۵]. انتقال کف به گونه‌ای صورت گرفت تا از تخریب آن جلوگیری شود.

$$\text{کف دانسیته} = \frac{M_{\text{foam}} (\text{g})}{V_{\text{foam}} (\text{cm}^3)} \quad (1)$$

## ۴.۲. پایداری کف

اندازه‌گیری زه‌کشی کف یکی از بهترین روش‌های تعیین پایداری کف است. اندازه‌گیری پایداری کف بر اساس روش صالحی و همکاران [۱۷] و دهقان‌نیا و همکاران [۱۸] با اندکی تغییرات انجام گرفت. بدین منظور، مقدار ۵۰ mL از کف را به درون قیف بوختر با قطر ۹۰ mm که با کاغذ صافی

1. Water Solubility Index  
2. Water Absorption index

در این معادله  $W_2$  وزن ماده بعد از باز جذب آب و  $W_1$  وزن ماده خشک شده است.

### ۹.۲. اندازه‌گیری pH

مقدار ۱۰ g از پودر شیر خرد با ۱۰۰ mL آب مقطر همگن شد و سپس pH آن با استفاده از متر (Metrohm، ساخت سوئیس) اندازه‌گیری شد [۲۲].

### ۱۰.۲. بررسی سینتیک خشک شدن نمونه کف بهینه

#### توسط خشک‌کن هوای داغ

نمونه کف بهینه به پلیت‌های آلومینیومی به صورت لایه نازک با ضخامت‌های ۴ و ۶ mm منتقل و در دماهای ۵۰ °C، ۶۰ و ۷۰ °C خشک شد. جهت ارزیابی سینتیک خشک شدن، نمونه‌های کف در فواصل زمانی مشخصی از خشک‌کن خارج و وزن آن‌ها تا رسیدن به مقدار ثابت توسط ترازوی دیجیتال ثبت شد.

### ۱۱.۲. تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

ضریب نفوذ مؤثر که فرآیند خشک کردن و سازوکارهای ممکن در انتقال رطوبت درون مواد غذایی را توصیف می‌کند، مطابق قانون دوم فیک معادله (۸) تعیین شد [۲۳]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 M}{\partial L^2} \quad (8)$$

در این رابطه،  $M$  مقدار رطوبت،  $t$  زمان خشک کردن،  $D_{eff}$  ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ( $m^2/s$ ) و  $L$  جهت انتقال رطوبت (مشخصه فضایی) هستند.

بعد از محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت با کمک قانون دوم فیک، نفوذ رطوبت برای تیغه نامحدود مطابق معادله (۹) محاسبه شد:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (9)$$

در این رابطه،  $MR$  نسبت رطوبت،  $n$  عدد صحیح (مثبت)،

تولید شده از شاخص‌های حلالیت و جذب آب استفاده می‌شود. شاخص حلالیت و شاخص جذب آب پودر شیر خرد طبق روش دهقان‌نیا و همکاران [۱۸] اندازه‌گیری شد؛ بدین منظور، ۳۰ mL آب مقطر به ۲/۵ g از پودر شیر خرد اضافه شد و به مدت ۳۰ min در دمای محیط مخلوط شد و سپس محلول به دست آمده به مدت ۱۰ min در ۱۰۰۰۰ rpm سانتریفیوژ شد و با استفاده از معادلات (۴۳) شاخص حلالیت و شاخص جذب آب پودرها به دست آمد.

$$\text{شاخص حلالیت} = \frac{\text{وزن ماده خشک نمونه بعد از سانتریفیوژ}}{\text{وزن ماده خشک اولیه نمونه}} \quad (3)$$

$$\text{شاخص جذب آب} = \frac{\text{وزن ماده جامد باقیمانده بعد از سانتریفیوژ}}{\text{وزن ماده خشک اولیه نمونه}} \quad (4)$$

### ۷.۲. دانسیته حجمی فشرده و غیره فشرده

دانسیته حجمی فشرده و غیره فشرده مطابق روش ازوکیندین و همکاران [۲۰] و با استفاده از معادله‌های (۵) و (۶) اندازه‌گیری شد.

$$\text{دانسیته فشرده} = \frac{M_p}{V_f} \quad (5)$$

$$\text{دانسیته غیر فشرده} = \frac{M_p}{V} \quad (6)$$

در این فرمول،  $M_p$  وزن پودر (g)،  $V_f$  حجم نهایی پودر بعد از فشرده شدن ( $cm^3$ ) و  $V$  حجم پودر ( $cm^3$ ) هستند.

### ۸.۲. آبگیری مجدد پودر<sup>۱</sup>

مقدار ۵ g پودر نمونه در ۵۰ mL آب مقطر به مدت ۶۰ min غوطه‌ور شد. پس از فیلتر کردن و خشک کردن نمونه، میزان آبگیری مجدد نمونه‌ها مطابق معادله (۷) محاسبه شد [۲۱].

$$\text{آبگیری مجدد پودر} = \frac{w_2}{w_1} \times 100 \quad (7)$$

رطوبت، مطابق معادله آرنیوس (معادله ۱۳) بیان می‌شود [۱۷]:

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (13)$$

در این رابطه،  $D_0$  ضریب یا فاکتور آرنیوس ( $m^2/s$ )،  $E_a$  انرژی فعال‌سازی برای نفوذ رطوبت ( $kJ/mol$ )،  $R$  ثابت جهانی گازهای ایده‌آل ( $kJ/k.mol$ ) و  $T$  دمای مطلق ( $K$ ) است. انرژی فعال‌سازی با رسم منحنی  $\ln D_{\text{eff}}$  در برابر عکس دما ( $1/T$ ) محاسبه می‌شود.

### ۱۳.۲. آنالیز آماری

به منظور یافتن بهترین شرایط (بهینه‌سازی) تولید پودر شیره خرما به روش خشک‌کردن کف‌پوشی، از روش سطح پاسخ و نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه 10.0.4 استفاده شد. در این پژوهش از طرح مرکب مرکزی و با دو متغیر مستقل در سه سطح و ۵ نقطه مرکزی طرح (با ۱۳ آزمون) استفاده شد. متغیرهای مستقل، شامل مالتودکسترین (۰، ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی-وزنی) و آلومین (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی-وزنی) بودند. پس از بهینه‌یابی، مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک‌شدن نمونه بهینه در سه دما ( $50^\circ C$ ،  $60^\circ C$  و  $70^\circ C$ ) با دو ضخامت (۴ و ۶ mm) بررسی شد. لازم به ذکر است که هر آزمون ۳ بار تکرار انجام شد و میانگین داده‌ها جهت ارزیابی استفاده شد.

### ۱۴.۲. مدل مناسب برای سینتیک خشک‌شدن کف

#### شیره خرما

در این مطالعه، ۱۱ مدل استاندارد خشک‌کردن (جدول ۲) با نسبت رطوبت‌های حاصل از نرم‌افزار Matlab برازش داده شدند و فاکتورهای ضریب همبستگی ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات (RMSE) و مجموع مربعات خطا (SSE) جهت انتخاب بهترین مدل جهت خشک‌کردن کف شیره خرما مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این حالت، بهترین مدل بایستی دارای حداکثر میزان  $R^2$  و حداقل میزان RMSE و SSE باشد [۲۴].

$D_{\text{eff}}$  ضریب نفوذ مؤثر ( $m^2/s$ )،  $t$  زمان خشک‌کردن برحسب (s) و  $L$  ضخامت کف بر حسب  $m$  است. در این رابطه، بایستی فرض شود که رطوبت در ابتدا به صورت یکنواخت درون نمونه توزیع شده است، تنها مکانیسم مؤثر در انتقال جرم مکانیسم نفوذ است، ضریب نفوذ را می‌توان ثابت فرض نمود و افت آن قابل صرف نظر کردن است و در نهایت محتوای رطوبت در سطح نمونه بطور آبی با محیط اطراف به تعادل دمایی می‌رسد. با داشتن محتوای رطوبت اولیه ( $M_i$ )، رطوبت در هر لحظه ( $M_t$ ) و رطوبت تعادلی ( $M_e$ ) می‌توان مقدار پارامتر  $MR$  را مطابق معادله (۱۰) محاسبه کرد:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (10)$$

چنانچه فرض شود که خشک‌شدن در زمان‌های طولانی صورت پذیرفته است، مقدار محتوای رطوبتی تعادلی را صفر در نظر گرفته و جملات در سری نامحدود در معادله (۱۰) سریعاً همگرا شده و با اولین جمله سری تقریب زده شده و به صورت لگاریتمی مطابق معادله (۱۱) تبدیل می‌شود:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (11)$$

که در این حالت با رسم منحنی در برابر زمان، می‌توان شیب خط مستقیم را که معادل  $K$  است، برای تعیین ضریب نفوذ مؤثر استفاده کرد:

$$K = \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2} \quad (12)$$

### ۱۲.۲. محاسبه انرژی فعال‌سازی

انرژی فعال‌سازی به صورت میزان انرژی مورد نیاز جهت عبور مولکول‌های آب در مرحله انتقال در محصول طی خشک‌کردن تعریف می‌شود. دما به عنوان مهم‌ترین عامل خارجی مؤثر بر ضریب نفوذ رطوبت طی فرآیند خشک‌کردن شناخته می‌شود که وابستگی بین دما و قابلیت نفوذ مؤثر

## جدول (۲) مدل‌های ریاضی جهت بررسی سینتیک خشک‌شدن کف شیر خرم

Table 2. Mathematical models to investigate the drying kinetics of foam-mat drying of date syrup

شماره (Number)	نام مدل (Model name)	مدل (Model)
۱	انتشار (Diffusion)	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$
۲	هندرسون و پابیس (Henderson and Pabis)	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$
۳	لگاریتمی (Logarithmic)	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$
۴	هندرسون و پابیس اصلاح شده (Modified Henderson and Pabis)	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-g \cdot t) + c \cdot \exp(-h \cdot t)$
۵	پیچ اصلاح‌شده (Modified page)	$MR = \exp(-k \cdot (t/L^2)^n)$
۶	نیوتن (Newton)	$MR = \exp(-k \cdot t)$
۷	پیچ (Page)	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$
۸	معادله ساده‌شده انتشار فیک (A simple approximation of diffusion)	$MR = a \cdot \exp(-c \cdot (t/L^2))$
۹	دو جمله‌ای (Two term)	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-c \cdot t)$
۱۰	دو جمله‌ای نمایی (Two term exponential)	$MR = A \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot a \cdot t)$
۱۱	وانگ و سینگ (Wang and Sing)	$MR = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$

## ۳. نتایج و بحث

## ۱.۳. پایداری کف

باعث افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته یا افزایش ضخامت و استحکام فصل مشترک هوا و آب می‌شود (شکل ۱-ا). همچنین کف‌ها در ویسکوزیته بالا پایدارتر هستند، زیرا افزایش ویسکوزیته فاز آبی باعث ایجاد ساختار شبکه‌ای به صورت توده‌ای می‌شود که این حالت سبب می‌شود که دیواره سطحی به راحتی از بین نرود و باعث بهبود پایداری کف شود [۲۵]. نتایج مشابهی توسط فرانکو و همکاران [۲۶] گزارش شده است. با این حال، افزایش غلظت مالتودکسترین سبب کاهش پایداری کف شد (شکل ۱-ا) که این حالت می‌تواند ناشی از ماهیت آب‌دوستی و بنابراین عدم تمایل این مولکول به قرارگرفتن در فصل مشترک هوا-آب و پایدار کردن کف حاصله باشد. گزارش شده است که ماهیت آبگریزی عامل پایدارکننده سبب استحکام بیشتر دیواره حباب‌ها و در نتیجه پایدار کردن ساختار کف نسبت به فروپاشی می‌شود [۲۷].

دستیابی به کف پایدار به‌عنوان مهم‌ترین هدف در خشک‌کردن کف پوشی شناخته می‌شود و اطمینان از این پایداری سبب دستیابی به بالاترین نرخ خشک‌کردن و جدا شدن آسان‌تر مواد خشک‌شده از سینی می‌شود. اگر کف پایدار نباشد یا آب‌اندازی آن بیش از حد باشد، زمان خشک شدن افزایش و در نهایت کیفیت محصول کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، کف‌های بیش از حد پایدار، بسیاری از اجزای گاز را در حال خشک‌شدن در خود نگه داشته و پس از احیای این مواد باعث ایجاد لکه‌ها و کدورت می‌شوند و به شدت رنگ ظاهری را کاهش می‌دهند [۲۵-۲۶]. نتایج آنالیز واریانس نشان داد (جدول ۳) که افزایش غلظت آلومین و مالتودکسترین و اثر متقابل آن‌ها تأثیر معناداری ( $p < 0.05$ ) بر میزان پایداری کف داشت. افزایش عامل کف‌زا (آلومین)

## ۲.۳. دانسیته کف

ممکن است ناشی از ماهیت آب دوستی آن و کاهش تمایل به جذب در سطح مشترک هوا- مایع کف باشد. گزارش شده است که ویسکوزیته بالای محلول، سبب جلوگیری از به دام انداختن هوا طی فرآیند تشکیل کف یا همزنی مکانیکی خواهد شد [۲۹]؛ بنابراین افزایش غلظت مالتودکسترین ممکن است از طریق افزایش ویسکوزیته سامانه (احتمالاً بالاتر از حد ویسکوزیته‌ای که حداکثر حجم هوا می‌تواند وارد ساختار کف شود)، سبب جلوگیری از افزایش حجم کف شود. نتایج مشابهی توسط بیگ و همکاران [۳۰] در مورد پودر میوه بیل<sup>۱</sup> گزارش شده است.

دانسیته کف تأثیر زیادی در پایداری و راندمان فرآیند آبگیری مجدد آن دارد. کف‌های با دانسیته کمتر، دارای پایداری بیشتر و در دمای پایین خشک کردن بهتر صورت می‌گیرد و همچنین پودر حاصل دارای رطوبت کمتری است [۲۸]. نتایج آنالیز واریانس (جدول ۳) و شکل (b-۱) نشان داد که افزایش غلظت آلبومین تأثیر معنی‌داری ( $p < 0.05$ ) بر دانسیته کف داشت و افزایش آن باعث کاهش دانسیته کف شد؛ اگرچه افزایش مقدار مالتودکسترین سبب افزایش دانسیته کف شد (شکل b-۱) که

جدول (۳) نتایج تجزیه و تحلیل برای پاسخ‌های پایداری و دانسیته کف

Table 3. ANOVA for stability and density of the date syrup foam

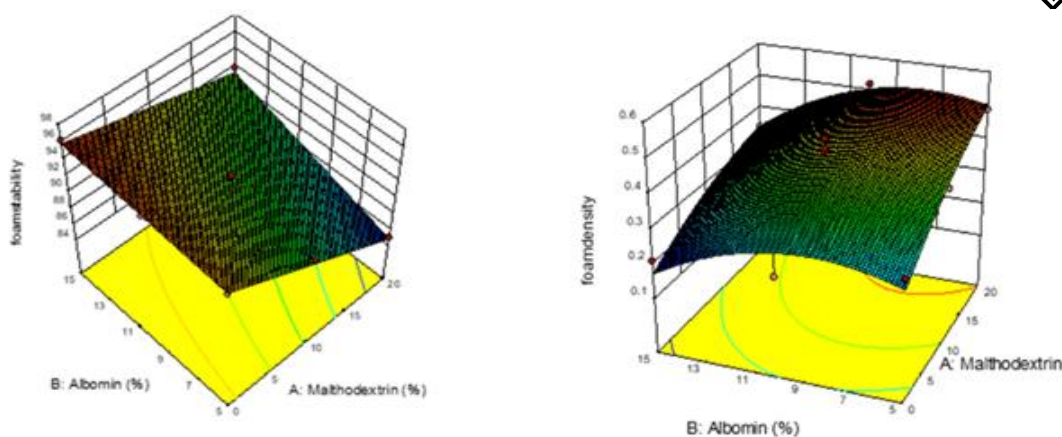
منبع	درجه آزادی	پایداری کف	دانسیته کف
(Source)	(DF)	(Foam physical stability)	(Foam density)
مقدار ثابت معادله (Intercept)	3	103.78 **	0.12 **
مالتودکسترین (Maltodextrin)	1	74.20 **	0.064 **
آلبومین (Albumin)	1	22.81 **	0.023 **
آلبومین* مالتودکسترین (Albumin* Maltodextrin)	1	6.76 **	1.225E - 003 <sup>ns</sup>
خطا (Error)		2.87	3.000E-003
ضریب تبیین (R-Squared)		0.9629	0.9040
ضریب تبیین اصلاح شده (Adj R-Squared)		0.9363	0.8354

\* Significant at 5% level

\*\* Significant at 1% level

df, degrees of freedom

ns, lack-of-fit, is not significant at  $P > 0.05$



شکل (۱) اثر مالتودکسترین و آلبومین بر میزان پایداری (a) و دانسیته (b) کف شیر خرم. **Fig 1.** Effect of maltodextrin and albumin on the stability (a) and density (b) of the date syrup foam

از خاصیت آب‌دوستی و جاذب رطوبت بودن مالتودکسترین و همچنین وجود قندهای با وزن مولکولی کم در ساختار آن است. دامنه مطلوب میزان رطوبت برای نمونه‌های پودری کمتر از ۵ درصد است [۳۱]. در صورت بالا بودن رطوبت، تغییرات نامطلوب فیزیکیوشیمیایی و دانسیته افزایش یافته و جریان‌پذیری و حلالیت پودرهای تولیدی کاهش می‌یابند. آن جی و سولومن [۳۲] و شاری و همکاران [۲۱] به ترتیب برای پودر لبو و آناناس نتایج مشابهی را ارائه کردند.

### ۳.۳. رطوبت پودر

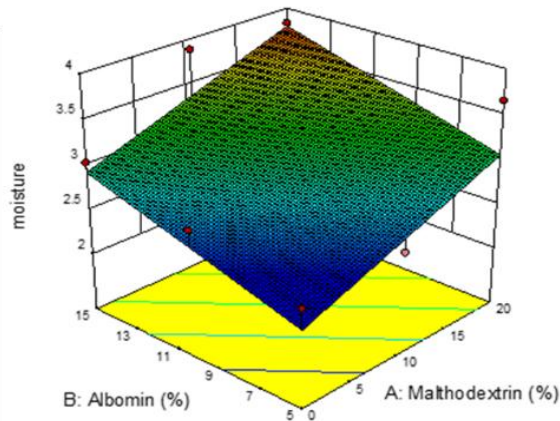
پایداری فیزیکیوشیمیایی پودرهای تولیدشده در زمان ماندگاری تابع میزان رطوبت آن‌ها است. نتایج به دست آمده نشان داد (جدول ۴) که افزایش غلظت مالتودکسترین و آلبومین تأثیر معنی‌داری ( $p < 0.05$ ) بر میزان رطوبت داشتند. با توجه به شکل (۲)، ابتدا با کاهش مقدار مالتودکسترین میزان رطوبت کاهش یافت و سپس با افزایش مقدار آن، افزایش میزان رطوبت مشاهده شد که عمدتاً ناشی

جدول (۴) نتایج تجزیه و تحلیل برای پاسخ محتوی رطوبت پودر

**Table 4.** ANOVA for moisture content of powder

رطوبت (moisture)	شاخص حلالیت (WSI) آب	شاخص جذب (WAI) آب	دانسیته غیره فشرده (Bulk density)	دانسیته فشرده (Tap density)	pH	آبگیری مجدد (Rehydration)	درجه آزادی (DF)	منبع (Source)
1.992*	83.77**	0.29**	0.055*	0.072 <sup>ns</sup>	1.42**	4.66**	3	مقدار ثابت معادله (Intercept)
1.12*	76.68**	0.11**	6.939E-018 <sup>ns</sup>	8.167E-004 <sup>ns</sup>	8.817 E-003 <sup>ns</sup>	0.012 <sup>ns</sup>	1	مالتودکسترین (Maltodextrin)
0.80*	7.09 <sup>ns</sup>	0.12**	6.017E-003 <sup>ns</sup>	1.667E-003 <sup>ns</sup>	1.11**	2.34**	1	آلبومین (Albumin)
0.048 <sup>ns</sup>	4.88 <sup>ns</sup>	0.055*	0.011 <sup>ns</sup>	0.014 <sup>ns</sup>	2.025E-003 <sup>ns</sup>	0.032 <sup>ns</sup>	1	آلبومین* (Albumin*) مالتودکسترین (Maltodextrin)
0.17	6.55	0.016	4.080E-003	5.480E-003	6.920E-003	0.050		خطا (Error)
0.5920	0.7944	0.7822	0.7176	0.7902	0.9857	0.9699		ضریب تبیین (R-Squared)
0.5104	0.7533	0.7096	0.5159	0.6403	0.9756	0.9484		ضریب تبیین اصلاح‌شده (Adj R-Squared)



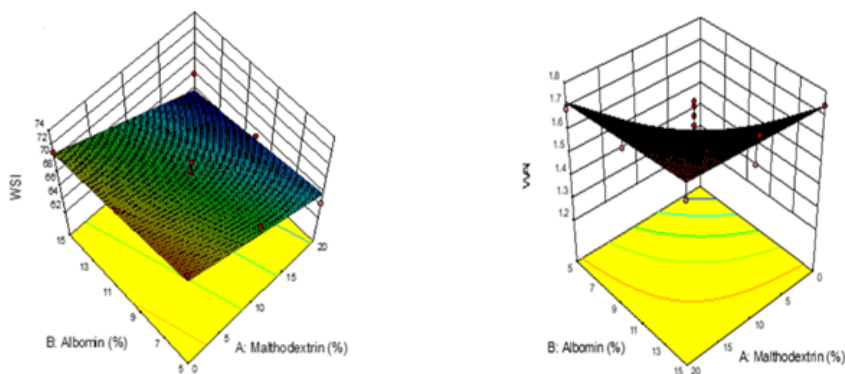


شکل (۲) اثر مالتودکسترین و آلبومین بر میزان رطوبت پودر شیر خرمای  
 Fig 2. Effect of maltodextrin and albumin on moisture content of the powder

#### ۴.۳. شاخص حلالیت و جذب آب

کاهش حلالیت پودر انبه را به افزایش غلظت مالتودکسترین نسبت دادند. افزایش غلظت آلبومین و مالتودکسترین و همچنین اثر متقابل آنها تأثیر معناداری ( $p < 0.05$ ) بر میزان جذب آب در نمونه‌های تولیدی نشان داد (جدول ۴). ظرفیت جذب آب در کمترین مقدار آلبومین افزایش یافت. پروتئین‌ها یکی از مهم‌ترین عوامل جذب آب در مواد غذایی هستند؛ علاوه بر این، افزایش میزان مالتودکسترین به افزایش ظرفیت جذب آب منجر شد (شکل ۳-b) که به حضور گروه‌های آب‌دوست در کربوهیدرات‌ها نسبت داده می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش، با یافته‌های عبادتی و همکاران [۳۴] نیز مطابقت دارد.

حلالیت پودر یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های عملکردی پودرها است که تأثیر قابل توجهی بر رفتار پودر طی بازسازی در آب نشان می‌دهد. مطابق نتایج آنالیز واریانس (جدول ۴)، افزایش غلظت مالتودکسترین و آلبومین تأثیر معناداری ( $p < 0.05$ ) بر میزان حلالیت پودرهای تولیدی داشته است، در حالی که اثر متقابل آنها بر این پاسخ معنی‌دار نبود ( $p > 0.05$ ). لازم به ذکر است که غلظت‌های پایین آلبومین به‌طور معنی‌داری سبب افزایش حلالیت پودر شد (شکل ۳-a). با این حال، افزایش مالتودکسترین به کاهش حلالیت پودر منجر شد که در راستای نتایج کانو و همکاران [۳۳] است؛ این محققین



شکل (۳) اثر مالتودکسترین و آلبومین بر میزان شاخص حلالیت آب (a) و جذب آب (b) پودر شیر خرمای  
 Fig 3. Effect of maltodextrin and albumin on water solubility index (a) and water absorption of powder (b)

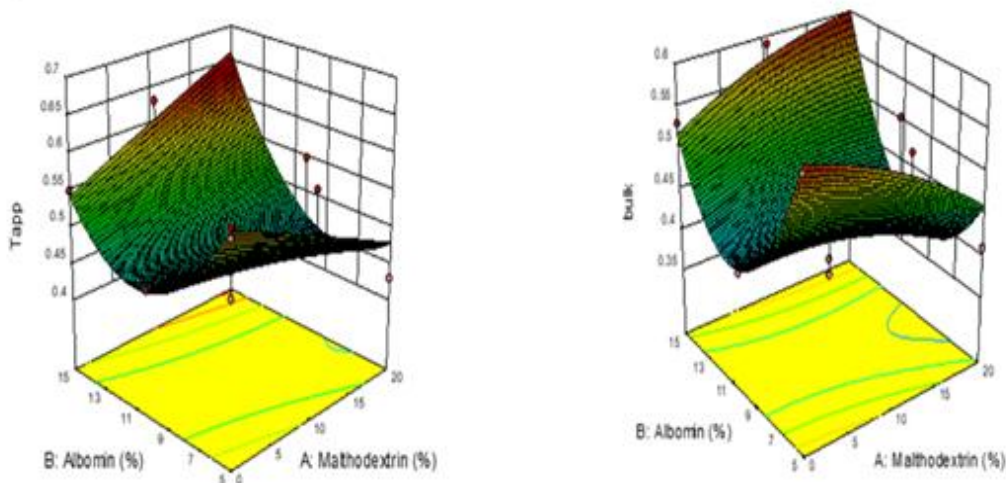
## ۵.۳. اندازه‌گیری pH

اقتصادی و عملگرایی در محصولات خشک‌شده دارد، دانسیته غیرفشرده است [۲۰-۶] نتایج به‌دست آمده نشان داد (جدول ۴) که غلظت‌های آلبومین و مالتودکسترین تأثیر معناداری بر میزان دانسیته فشرده نداشته است؛ اگرچه، افزایش غلظت مالتودکسترین سبب افزایش دانسیته فشرده شد (شکل ۴-a). همچنین، دانسیته غیرفشرده نیز با افزایش غلظت مالتودکسترین افزایش نشان داد (شکل ۴-b) که به افزودن حامل‌های سنگین، مانند مالتودکسترین نسبت داده می‌شود که سبب تولید پودرهای متراکم و سنگین می‌شوند [۳۶]. لازم به ذکر است که افزایش غلظت آلبومین از ۵ تا ۱۰ درصد، سبب کاهش دانسیته و غلظت‌های بالاتر آن منجر به افزایش دانسیته پودر شیره خرما شد که این حالت می‌تواند ناشی از وزن مولکولی بالای پروتئین‌ها باشد [۳۷]. عبادتی و همکاران [۳۴] و شاری و همکاران [۲۱] به نتایج مشابهی دست یافتند.

نتایج نشان داد که غلظت مالتودکسترین اثر معنی‌داری بر میزان pH پودر نداشت ( $p > 0.05$ )، اما اثر افزودن آلبومین بر این پارامتر معنی‌دار بود ( $p < 0.05$ ) (جدول ۴). pH آلبومین در محدوده ۹/۳-۷/۶ گزارش شده است [۳۵]؛ بنابراین می‌توان بیان داشت که افزودن آلبومین با خاصیت قلیایی به سیستم سبب افزایش معنی‌دار میزان pH آن شده است که با نتایج آن جی و سولومن [۳۲] که اثر نوع عامل کفزا و غلظت آن‌ها بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی پودر لبو را بررسی کردند، مطابقت دارد.

## ۶.۳. دانسیته فشرده و غیرفشرده

دانسیته فشرده یک شاخص بسیار مهم در زمینه بسته‌بندی و حمل‌ونقل محصولات خشک‌شده است. علاوه‌براین، یکی دیگر از پارامترهای فیزیکی مهم که اهمیت زیادی از لحاظ



شکل (۴) اثر مالتودکسترین و آلبومین بر میزان دانسیته فشرده (a) و غیره فشرده (b) پودر شیره خرما  
Fig 4. Effect of maltodextrin and albumin on bulk density (a) and Tap density (b) of date syrup powder

در جدول (۴) آورده شده است، افزایش غلظت آلبومین تأثیر معنی‌داری ( $p < 0.05$ ) بر روی میزان آبگیری مجدد داشت، در حالی افزودن غلظت‌های مختلف مالتودکسترین تأثیر

## ۷.۳. آبگیری مجدد

هرچه نسبت آبگیری مجدد پودر تولیدشده بیشتر باشد، توانایی آبگیری مجدد آن در آب بیشتر است؛ همان‌طور که

داشته باشند [۳۲] که تأییدکننده نتایج بخش دانسیته فشرده و غیرفشرده است.

### ۸.۳. تعیین شرایط بهینه‌سازی تولید پودر شیر خرمای

جهت تعیین نقطه بهینه از روش بهینه عددی نرم‌افزار دیزاین اکسپرت استفاده شد. بهترین شرایط بهینه‌سازی برای کف و پودر بعد از آزمایشات انجام شده به شرح جدول (۵) است و ضریب مطلوبیت در این شرایط برای کف و پودر شیر خرمای ۰/۶۵۱ بود. گزارش شده است که دانسیته کف مناسب جهت خشک‌کردن کف‌پوشی در محدوده  $0.16 - 0.2 \text{ g/cm}^3$  است [۲۳].

جدول (۵) بهینه‌یابی شرایط تولید پودر شیر خرمای

Table 5. Optimization of date syrup production conditions

آبگیری مجدد	pH	دانسیته غیره فشرده	دانسیته فشرده	شاخص جذب آب	شاخص حلالیت آب	رطوبت	دانسیته کف	پایداری کف	آلبومین	مالتودکسترین
Rehydration		Bulk density	Tap density	WAI	WSI	Moisture content	Foam density	Foam stability	Albumin	Maltodextrin
2.498	5.035	0.569	0.567	1.350	71.118	2.430	0.346	91.950	5	5.305

سرعت خشک‌شدن است. دوره سرعت نزولی خشک‌شدن پس از رسیدن به مقدار رطوبت بحرانی آغاز می‌شود. در مرحله دوم خشک‌شدن، حذف رطوبت توسط مقاومت در برابر انتقال جرم درونی کنترل می‌شود و ساختار خلل و فرج و همچنین برهمکنش‌های بین ساختار کف و رطوبت بر نفوذ رطوبت تأثیرگذار هستند؛ به طوری که مکانیسم اصلی کنترل کننده حذف (تبخیر) رطوبت، نفوذ آب پیوندی شناخته شده است [۱۷].

جهت مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن کف شیر خرمای به روش کف‌پوشی، مدل‌های مختلف از نظر  $R^2$ ، RMSE و SSE با هم مقایسه شدند و در نهایت مدلی که دارای بیشترین  $R^2$  و کمترین RMSE و SSE بود، به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد؛ بنابراین، در تمامی دماهای خشک‌شدن کف بهینه با ضخامت ۴ mm و ۶ mm، مدل پیچ دارای بهترین برازش با داده‌های آزمایشی بود که نتایج آماری این مدل در جدول (۶) آورده شده است.

معنی‌داری بر این پارامتر نشان نداد ( $p > 0.05$ ). میزان آبگیری مجدد در غلظت ۱۰-۵ درصد آلبومین افزایش یافت و سپس روند کاهشی با افزایش بیشتر غلظت آلبومین مشاهده شد. تأثیر معنی‌دار آلبومین بر میزان آبگیری مجدد می‌تواند ناشی از گروه‌های هیدروکسیل آزاد آن باشد که قادر به اتصال با مولکول‌های آب محیط اطراف هستند [۳۸]. علاوه بر این، قابلیت جذب آب پودر به ترکیبات شیمیایی، خواص سطحی، شکل و اندازه ذرات، تخلخل و ساختار مولکولی درونی آن بستگی دارد [۳۹]. پودرهای با ساختار متراکم (دانسیته بالا) ممکن است قابلیت جذب آب مجدد پایینی

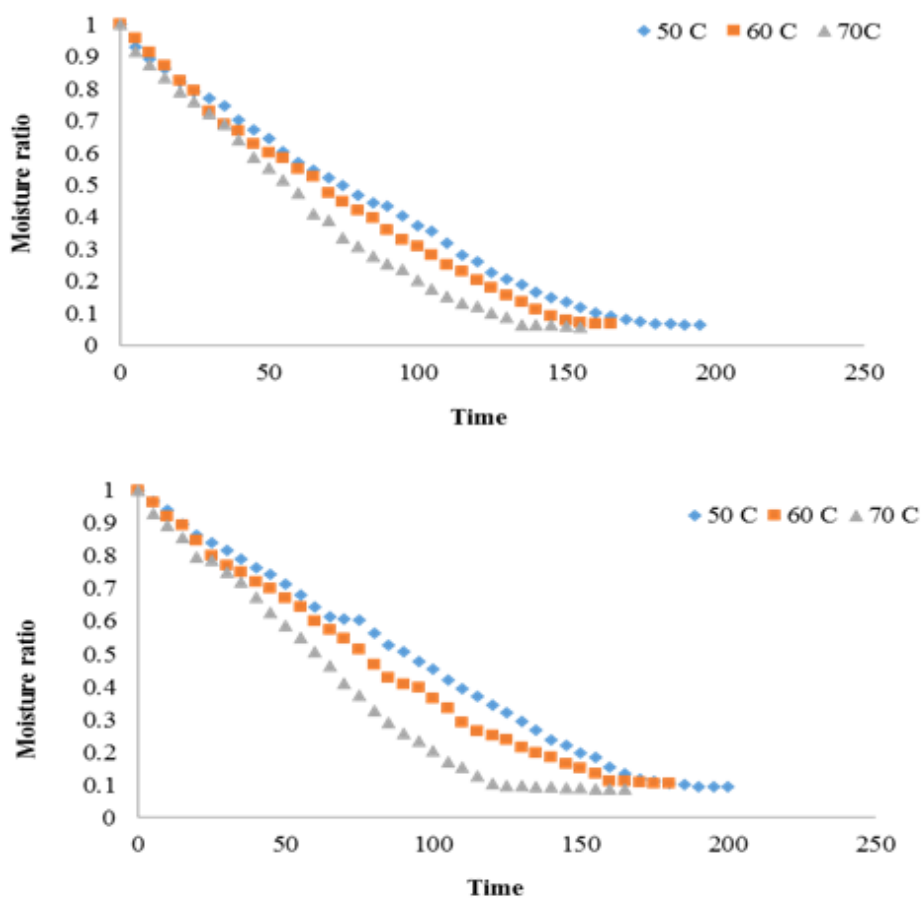
### ۹.۳. مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن

منحنی خشک‌شدن کف شیر خرمای در دو ضخامت ۴ mm و ۶ و در دماهای  $50^\circ\text{C}$ ، ۶۰ و ۷۰ در شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق نتایج، زمان خشک‌کردن نمونه‌های کف شیر خرمای با افزایش دمای خشک‌کردن کاهش نشان داد که عمدتاً ناشی از افزایش سرعت انتقال جرم و حرارت از کف با افزایش دمای خشک‌کردن است. فرآیند خشک‌شدن عمدتاً در دوره سرعت نزولی اتفاق افتاده است که بیانگر مکانیسم انتشار به‌عنوان متحمل‌ترین مکانیسم فیزیکی، جهت انتقال رطوبت از ساختار محصول است [۲۸]. به‌طور کلی، خشک کردن کف‌ها شامل دو مرحله است؛ به طوری که در مرحله اول بالاترین سرعت خشک‌کردن در ابتدای خشک‌شدن اتفاق می‌افتد که به بالابودن میزان رطوبت در سطح کف نسبت داده می‌شود. سرعت خشک‌شدن در این مرحله ثابت بوده و تمام آب آزاد موجود در کف، در پایان مرحله اول خشک‌شدن تبخیر می‌شود که همراه با کاهش ناگهانی

جدول (۶) نتایج آماری حاصل از برازش داده‌های آزمایش با مدل پیچ در شرایط مختلف خشک کردن

Table 6. Statistical results of page model for foam-mat drying of date syrup

SSE	RMSE	R <sup>2</sup>	N	k	ضخامت (mm)	دما (C°)
					Thickness (mm)	Temperature (C°)
0.0326	0.0293	0.9901	0.73	0.046	4	50
0.0222	0.0264	0.9920	0.69	0.034	4	60
0.0150	0.0224	0.9946	0.78	0.021	4	70
0.0310	0.0282	0.9908	0.82	0.018	6	50
0.0135	0.0197	0.9954	0.88	0.015	6	60
0.0236	0.0272	0.9923	0.58	0.091	6	70



شکل (۵) تغییرات نسبت رطوبت با زمان برای خشک کردن کف شیر خرمای با ضخامت ۴ میلی‌متر (a) و ۶ میلی‌متر (b).  
 Fig 5. Changing moisture ratio with drying time for foam-mat drying of date syrup at 4 mm(a) and 6mm(b) thickness

دماهای خشک کردن بالا نسبت داده می‌شود [۴۰]؛ علاوه بر این، ضخامت کف رابطه مستقیمی با ضریب نفوذ مؤثر رطوبت دارد و افزایش ضخامت سبب افزایش ضریب نفوذ خواهد شد. بدین صورت که افزایش ضخامت سبب مهاجرت رطوبت درونی در فواصل طولانی‌تری نسبت به ضخامت‌های کمتر می‌شود که منجر به افزایش ضریب نفوذ مؤثر می‌شود [۲۱]. در راستای نتایج این تحقیق، کادم و بالاسی برمینین [۴۱] و هیوپن چاینن و همکاران [۴۲] گزارش کردند که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت با افزایش دمای خشک کردن افزایش می‌یابد.

مقادیر ضریب نفوذ مؤثر طی خشک کردن و انرژی فعال سازی کف بهینه در جدول (۷) گزارش شده است. با افزایش دما و ضخامت کف، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش قابل توجهی نشان داد و مقدار آن در محدوده دمایی  $50^{\circ}\text{C}$  تا  $70^{\circ}\text{C}$  برای کف با ضخامت  $4\text{ mm}$ ،  $2/43 \times 10^{-8}\text{ m}^2/\text{s}$  تا  $3/08 \times 10^{-8}\text{ m}^2/\text{s}$  بود. برای کف با ضخامت  $6\text{ mm}$ ، این محدوده ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از  $4/67 \times 10^{-8}\text{ m}^2/\text{s}$  تا  $6/21 \times 10^{-8}\text{ m}^2/\text{s}$  علت افزایش ضریب نفوذ مؤثر با افزایش دما عمدتاً به اثر دما در ایجاد جنبش مولکولی و مکش سطحی بیشتر و همچنین افزایش فشار بخار درون کف در

جدول (۷) مقادیر ضریب نفوذ مؤثر و انرژی فعال سازی کف شیر خرم طی خشک کردن.  
Table 7. Effective diffusivity and activation energy for foam-mat drying of date syrup

$D_0$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$E_a$ (kJ/mole)	ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) Effective moisture diffusivity	ضخامت (mm) Thickness (mm)	دما ( $^{\circ}\text{C}$ ) Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
$1.54 \times 10^{-7}$	10.95	$2.43 \times 10^{-8}$	4	50
		$2.71 \times 10^{-8}$	4	60
		$3.08 \times 10^{-8}$	4	70
$6.01 \times 10^{-6}$	13.05	$4.67 \times 10^{-8}$	6	50
		$4.96 \times 10^{-8}$	6	60
		$6.21 \times 10^{-8}$	6	70

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی کف حاصله توسط روش سطح پاسخ بهینه‌سازی شد. رفتار خشک کردن کف شیر خرم نشان داد که فرآیند خشک کردن عمدتاً در مرحله سرعت نزولی رخ داده است؛ علاوه بر این، با رسم منحنی نسبت رطوبت در برابر زمان و برازش مدل‌های مختلف خشک کردن، مدل پیچ بهترین مدل جهت توصیف رفتار خشک کردن کف شیر خرم شناخته شد. لازم به ذکر است که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت با افزایش دمای خشک کردن و ضخامت کف افزایش یافت؛ بنابراین، پودر شیر خرم را می‌توان از طریق روش خشک کردن جایگزین، یعنی خشک کردن کف پوشی تولید کرد و شیر خرم می‌تواند به‌طور موفقیت‌آمیزی با کمک آلومین و مالتودکسترین تشکیل کف دهد و در ادامه توسط هوای داغ، خشک و به پودر تبدیل شود. پودر حاصل را می‌توان به‌عنوان افزودنی مؤثر به محصولات غذایی مختلف از قبیل قنادی و نانوائی اضافه کرد.

اطلاع از انرژی فعال سازی به‌عنوان ابزاری جهت طراحی و مدل سازی انتقال جرم در فرآیندهای غذایی مانند خشک کردن ضروری است. انرژی فعال سازی بیانگر حساسیت به دما و قابلیت انتشار است و نمونه‌های شبه کف دارای انرژی فعال سازی کمتری نسبت به نمونه‌های غیرکف هستند [۱۸]. مطابق نتایج (جدول ۷)، انرژی فعال سازی برای کف شیر خرم با ضخامت  $4\text{ mm}$  و  $6\text{ mm}$ ، به ترتیب  $10/95\text{ kJ/mol}$  و  $13/05\text{ kJ/mol}$  مشاهده شد. انرژی فعال سازی  $31/714\text{ kJ/mol}$  و  $33/043$  نیز توسط صالحی و همکاران [۱۷] و در مورد خشک کردن کف پوشی پالپ طالبی با ضخامت کف، به ترتیب،  $3\text{ mm}$  و  $5\text{ mm}$  نیز گزارش شده است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، از درصدهای مختلف مالتودکسترین و آلومین جهت تولید کف شیر خرم استفاده شد و



حمایت‌های مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان تشکر و قدردانی نمایند.

قدردانی

در پایان، نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از

## منابع

- [1] Siyahsar, M., Khezri, M., & Tavassolian, I. (2018). Effect of different pollinizer genotypes on some quantitative and qualitative characteristics and yield of the tissue cultured "Zahedi" date palm. *Pomology Research*, 2(2), 33-53. [In Persian].
- [2] Al-Alawi, R. A., Al-Mashiqri, J. H., Al-Nadabi, J. S., Al-Shihi, B. I., & Baqi, Y. (2017). Date palm tree (*Phoenix dactylifera* L.): natural products and therapeutic options. *Front Plant Sci.*, 8, 845.
- [3] Biglari, F., AlKarkhi, A. F., & Easa, A.M. (2008). Antioxidant activity and phenolic content of various date palm (*Phoenix dactylifera*) fruits from Iran. *Food Chem.*, 107(4), 1636-1641.
- [4] Bhandari, B. R., Bansal, N., Zhang, M., & Schuck, P. (Eds.). (2013). *Handbook of Food Powders: Processes and Properties*. Elsevier.
- [5] Sarabandi, Kh., & Sadeghi-Mahoonak, A., (2017). The effect of inlet air temperature and the amounts of maltodextrin on physicochemical properties of spray dried date palm syrup. *J. Innov Food. Technol*, 4(2), 1-15. [In Persian].
- [6] Jahroomi, M., Niakowsari, M., Sharifi, A., & Kalantari, M. (2016). Investigation of physical and chemical properties of grape syrup, date syrup and fig syrup dried in drum dryer. *J. Innov Food Sci. Technol.*, 7(3), 85-95. [In Persian].
- [7] Noshad, M., Ghasemi, P., & Dehghani, S. (2019). Effect of Chia seed gum on physicochemical properties of powder production using foam-mat drying method. *Food Sci. Technol*, 16(90), 343-351. [In Persian].
- [8] Zhang, L., Zeng, X., Fu, N., Tang, X., Sun, Y., & Lin, L. (2018). Maltodextrin: A consummate carrier for spray-drying of xylooligosaccharides. *Food Res. Int.*, 106, 383-393.
- [9] Santhalakshmy, S., Bosco, S. J. D., Francis, S., & Sabeena, M. (2015). Effect of inlet temperature on physicochemical properties of spray-dried jamun fruit juice powder. *Powder Technol.*, 274, 37-43.
- [10] Mansoori- Tehrani, N., Farahnaki, A., Majzoobi, & M., Badei, F. (2013). Production of date palm powder using gum Arabic and evaluation of its physicochemical properties. *Scientific Conference and Festival of Iranian Dates*, 575-576. [In Persian].
- [11] Gabas, A. L., Telis, V. R. N., Sobral, P. J. D. A., & Telis-Romero, J. (2007). Effect of maltodextrin and arabic gum in water vapor sorption thermodynamic properties of vacuum dried pineapple pulp powder. *J Food Eng.*, 82(2), 246-252
- [12] Kumar, C., Millar, G. J., & Karim, M. A. (2015). Effective diffusivity and evaporative cooling in convective drying of food material. *Drying Technology.*, 33(2), 227-237.
- [13] Mounir, S. (2017). Foam Mat Drying. In: *Drying Technologies for Foods-Fundamentals and Applications*. pp. 169-191.
- [14] de Carvalho Tavares, I. M., de Castilhos, M. B. M., Mauro, M. A., Ramos, A. M., de Souza, R. T., Gómez-Alonso, S., ... & Lago-Vanzela, E. S. (2019). BRS Violeta (BRS Rúbea x IAC 1398-21) grape juice powder produced by foam mat drying. Part I: Effect of drying temperature on phenolic compounds and antioxidant activity. *Food Chem.*, 298, 124971.
- [15] Isa, J., & Olalusi, A. P. (2019). Optimization of Foam-Mat Drying Process of Watermelon Pulp Using Response Surface Methodology. *J. Energy Research . Reviews.*, 1-11.
- [16] Guazi, J. S., Lago-Vanzela, E. S., & Conti-Silva, A. C. (2019). Development of smoothies from dehydrated products of strawberry and banana pulps obtained through foam-mat drying. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 54(1), 54-61.
- [17] Salahi, M. R., Mohebbi, M., & Taghizadeh, M. (2015). Foam-Mat Drying of Cantaloupe (*Cucumis melo*): Optimization of Foaming Parameters and Investigating Drying Characteristics. *J. Food Process. Preserv.*, 39(6), 1798-1808.
- [18] Dehghannya, J., Pourahmad, M., Ghanbarzadeh, B., & Ghaffari, H. (2019). Heat and mass transfer enhancement during foam-mat drying process of lime juice: Impact of convective hot air temperature. *Int. J. Therm. Sci.*, 135, 30-43.
- [19] AOAC. (1995). Official methods of analysis (16<sup>th</sup> ed.); Association of Official Analytical Chemists: AOAC Arlington, VA, Washington DC. USA.
- [20] Asokapandian, S., Venkatachalam, S., Swamy, G. J., & Kuppasamy, K. (2016). Optimization of foaming properties and foam mat drying of muskmelon using soy protein. *J. Food Process Eng.*, 39(6), 692-701.
- [21] Sharri, N. A., Sulaiman, R., Rahman, R. A., & Bakar, J (2017). Production of pineapple fruit (*Ananas comosus*) powder using foam mat drying: Effect of whipping time and egg albumen

- concentration. *J. Food Process. Preserv.*, 42(2), e13467.
- [22] Qadri, O. S., & Srivastava, A. K. (2017). Microwave-Assisted Foam Mat Drying of Guava Pulp: Drying Kinetics and Effect on Quality Attributes. *J. Food Process Eng.*, 40(1), e12295.
- [23] Pourmahdi, A., Mohebbi, M., Gohari-Ardabili, A., Varidi, M., & Salaha, M.R. (2018). Optimization of potato puree powder production using foam mat drying method. *Iran. J. Food Sci. Technol Res*, 14(4), 585-600. [In Persian]
- [24] Ertekin, C., & Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *J. Food Eng.*, 63(3), 349-359.
- [25] Karim, A. A., & Wai, C. C. (1999). Foam-mat drying of starfruit (*Averrhoa carambola* L.) puree. Stability and air drying characteristics. *Food Chem.*, 64(3), 337-343.
- [26] Franco, T. S., Ellendersen, L. N., Fattori, D., Granato, D., & Masson, M. L. (2015a). Influence of the addition of Ovalbumin and emulsifier on the physical properties and stability of Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) juice foams prepared for foam mat drying process. *Food Bioproc Tech.*, 8(10), 2012-2026.
- [27] Papalamprou, E. M., Makri, E. A., Kiosseoglou, V. D., & Doxastakis, G. I. (2005). Effect of medium molecular weight xanthan gum in rheology and stability of oil-in-water emulsion stabilized with legume proteins. *J. Sci. Food Agric.*, 85(12), 1967-1973.
- [28] Franco, T. S., Perussello, C. A., Ellendersen, L. D. S. N., & Masson, M. L. (2015b). Foam mat drying of yacon juice: Experimental analysis and computer simulation. *J Food Eng.*, 158, 48-57.
- [29] Bikerman, J. J. (2013). *Foams* (Vol. 10). Springer Science & Business Media.
- [30] Bag, S. K., Srivastav, P. P., & Mishra, H. N. (2011). Optimization of process parameters for foaming of bael (*Aegle marmelos* L.) fruit pulp. *Food Bioproc Tech*, 4(8), 1450-1458.
- [31] Koc, B., Yilmazer, M. S., Balkır, P., & Ertekin, F. K. (2010). Spray drying of yogurt: Optimization of process conditions for improving viability and other quality attributes. *Drying Technology*, 28(4), 495-507.
- [32] Ng, M. L., & Sulaiman, R. (2018). Development of beetroot (*Beta vulgaris*) powder using foam mat drying. *LWT*, 88, 80-86.
- [33] Cano-Chauca, M., Stringheta, P. C., Ramos, A. M., & Cal-Vidal, J. (2005). Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. *Innov Food Sci Emerg Technol.*, 6(4), 420-428.
- [34] Ebadati, H.R., Sharafi, A., & Niakowsari, M. (2017). Optimization of dough powder production process by foam mat drying method. *Innov. Food Sci. Technol.*, 8(4), 15-26. [In Persian].
- [35] Lund, B., Baird-Parker, A. C., Baird-Parker, T. C., Gould, G. W., & Gould, G. W. (Eds.). (2000). *Microbiological safety and quality of food* (Vol. 1). Springer Science & Business Media.
- [36] Seerangurayar, T., Manickavasagan, A., Al-Ismaïli, A. M., & Al-Mulla, Y. A. (2017). Effect of carrier agents on flowability and microstructural properties of foam-mat freeze dried date powder. *J. Food Eng.*, 215, 33-43.
- [37] Nelson, D. L., Lehninger, A. L., & Cox, M. M. (2008). *Lehninger principles of biochemistry*. Macmillan.
- [38] Harmayani, E., Winarti, S., & Nurismanto, R. (2011). Preparation of inulin powder from *Dioscorea Esculenta* Tuber with foam mat drying method. In *The 12<sup>th</sup> Asian food conference*; 16-18 June, 2011, BITEC Bangna, Bangkok, Thailand (pp. P30-P36).
- [39] Bhandari, B. R., Bansal, N., Zhang, M., & Schuck, P. (Eds.). (2013). *Handbook of food powders: Processes and properties*. Elsevier.
- [40] Sangamithra, A., Venkatachalam, S., John, S. G., & Kuppaswamy, K. (2015). Foam mat drying of food materials: A review. *J Food Process Preserv*, 6(39), 3165-3174.
- [41] Kadam, D. M., & Balasubramanian, S. (2011). Foam mat drying of tomato juice. *J. Food Process. Preserv.*, 35(4), 488-495.
- [42] Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S., & Soponronnarit, S. (2008). Drying characteristics and quality of banana foam mat. *J. Food. Eng.*, 86, 573-583.

*Research Article***Optimization and modeling of mass transfer kinetics during foam-mat drying of date syrup****Mohammad Noshad<sup>1\*</sup>, Mohammad Hojjati<sup>2</sup>, Parisa Ghasemi<sup>3</sup>, Ahmad Mostaan<sup>4</sup>**

**1. Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Animal Science and Food Technology, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Khuzestan Iran.**

**2. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Animal Science and Food Technology, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Khuzestan Iran.**

**3. MSc student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Animal Science and Food Technology, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Khuzestan Iran**

**4. Assistant Professor, Department of Physiology and Postharvest Technology, Horticultural Science Research Institute, Date Palm and Tropical Fruits Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran**

**Abstract**

Foam-mat drying is one of the newest drying techniques, in which liquids or semi-liquids are transformed to stable foams and they were then exposed to hot air drying. In this study, the foam-mat drying technique was applied to produce date syrup powder, and the production process of the date syrup powder was optimized using response surface methodology. Independent factors were maltodextrin (0, 10, and 20% w/v) and albumin (5, 10, and 15% w/v), and the responses included foam stability, density, moisture content, water solubility index, water absorption index, bulk density, tapped density, pH, and rehydration ratio. The drying process was performed at three temperatures of 50, 60, and 70 °C on 4- and 6-mm foam thickness to evaluate the drying behavior of the optimized date syrup foam, and 11 drying models were used to investigate the drying kinetics. According to the results of the present study, Page model was able to describe the drying behavior of date syrup foam at all drying temperatures and foam thicknesses. The effective moisture diffusivity was also calculated using Fick's second law and it was in the range of  $2.43 \times 10^{-8}$  to  $3.08 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s and  $4.67 \times 10^{-8}$  to  $6.21 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s with activation energy values of 10.95 and 13.05 kJ/mole, respectively, for 4- and 6mm foam thicknesses.

**Keywords: Date syrup; Maltodextrin; Foam-mat drying; Optimization.**

---

\* Corresponding author: Noshad@asnrukh.ac.ir