

Using foam mat drying in the production of sugarcane molasses powder: optimization and kinetics of mass transfer

Mohammad Noshad^{1*}, Mohammad Hojjati¹, Parisa Ghasemi²

¹Associate Professor and Professor respectively, Department of Food Science and Technology, Faculty of Animal Science and Food Technology, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan

²PhD Student Department of Food Science and Technology, Faculty of Animal Science and Food Technology, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan

✉ Corresponding author: Noshad@asnrukh.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article history:

Received: August 14, 2023

Accepted: December 31, 2023

Published: Jan 4, 2025

Keywords:

Foam mat drying, Whipping time, Drying kinetics, Xanthan gum, Sugar cane molasses

ABSTRACT

Background: In the production of food powders, foam mat drying is a suitable and cost-effective alternative to traditional drying methods.

Aims: The aim of this research was to select the optimal conditions for producing sugarcane molasses powder using the foam mat drying method.

Methods: In the initial stage, different concentrations of albumin (5 to 15%), xanthan gum (0.1 to 0.15%), and whipping time (2 to 6 minutes) were used to produce foam. The properties of the produced powders (density, solubility, bulk and tapped density, moisture content, pH, and rehydration) were examined at two foam thicknesses (4 and 6 mm) and temperatures of 50, 60, and 70 °C. Six drying models were used to investigate the drying kinetics of the samples.

Results: The results showed that the sample produced with 12.417% albumin, 0.12% xanthan gum, and 6 minutes of whipping had the best performance in terms of foam stability and density. Furthermore, the Wang and Singh model was selected as the best model for investigating the drying kinetics of the samples at all drying temperatures and foam thicknesses. Using Fick's second law, the effective moisture diffusivity was calculated and was in the range of 2.07×10^{-8} to 5.18×10^{-8} m²/s with activation energies of 16.35 and 20.15 kJ/mol for thicknesses of 4 and 6 mm, respectively.

Conclusion: Based on the obtained results, most of the sugarcane molasses foam drying process occurred in the falling rate period. Considering the fitting of different drying models, the Wang and Singh model was the best model for describing the drying behavior of sugarcane molasses foam. Additionally, increasing the temperature and foam thickness increased the effective moisture diffusivity. Therefore, sugarcane molasses powder can be produced as a sweetener and additive in the formulation of various food products using the foam mat drying method.



Extended Abstract

Introduction: Sugarcane molasses is an underappreciated by-product of the sugar mill industry. It is classified as generally recognized as safe (GRAS) and has been utilized as an alternative sweetener in the food industry (Deseo et al., 2020). Molasses is the final effluent obtained during the preparation of sucrose through a repeated process of evaporation, centrifugation, and crystallization from sugarcane juices (Jamir et al., 2021). It possesses special properties such as antioxidant, antimicrobial, weight loss, and treatment of anemia, and is used in cooking as a fermentation feed (Deseo et al., 2020; Jamir et al., 2021). Foam mat drying is a process used to convert liquid or semi-liquid foods into stable dried products. This is achieved by incorporating a large volume of gas in the presence of an edible foaming agent and/or stabilizer, followed by drying. Foam mat drying is suitable for drying viscous, sticky, heat-sensitive, and high-sugar food products that are difficult to dry using other tray drying techniques (Afifah et al., 2022). To ensure efficient foam mat drying, the foaming agent is used as a surfactant to reduce the surface tension between solid-liquid interfaces. Proteins are considered good and form a viscoelastic film around the bubbles, improving the powder's rheology (Brar et al., 2020). Xanthan gum, a natural polysaccharide, is one of the most important industrial biopolymers. It is widely used in various food materials for its emulsion stabilization, temperature stability, compatibility with food ingredients, and pseudo-plastic rheology properties. Xanthan gum is also utilized in pharmaceutical formulations, cosmetics, and agricultural products as a dispersing agent and stabilizer for emulsion or suspension due to its stability to thicken aqueous solutions (Song et al., 2006). The stability of the foam is influenced by foam stabilizers such as gelatin, xanthan, and string time. It is crucial to optimize the process by using an appropriate concentration of foaming agent and foaming time (Mihe et al., 2023). Therefore, in the production of food powders, foam mat drying

is a suitable and cost-effective alternative compared to traditional drying. This research was conducted to determine the optimal conditions for the production of sugarcane molasses powder using foam mat drying.

Material and methods: Molasses from Ahvaz Sugarcane Development and Auxiliary Industries Company, as well as Sigma Alderich xanthan gum were used in this research. Egg white was also used as foaming agent which was obtained by purchasing whole eggs and separating the white. The eggs were purchased from the Mollasani local market. To prepare the foam, the molasses was brought to a brix level of 25. Then, xanthan gum was added at three different levels (0.1%, 0.125%, and 0.15%) and mixed thoroughly to create a homogeneous mixture. Following this, the egg white was added at specific concentrations (5%, 10%, and 15% w/w) and mixed using a household mixer (Moulinex, model BM6, Spain) for three different time periods (2, 4, and 6 min) (see table 1 for details). The resulting foam was placed in aluminum trays (6 mm in height, 48 cm in length, and 40 cm in width) and dried in a dryer (Heraeus, Germany) at a temperature of 50 °C. After leaving the dryer, it was powdered using a home grinder and stored in impermeable plastics until the tests were conducted.

Results: Based on the obtained results, Wang and Singh's model was chosen as the best model to examine the drying kinetics of the samples at all drying temperatures and foam thicknesses. Using Fick's second law, the effective diffusion coefficient of humidity was calculated to be in the range of 2.07×10^{-8} to 18.5×10^{-8} (m^2/s), with activation energy of 16.35 and 20.15 kJ/mol for thicknesses of 4 mm and 6 mm, respectively.

Conclusion: The maximum drying process of sugarcane molasses foam was found to be in the descending speed stage. Wang and Singh's model was the best fit to describe the drying behavior of sugarcane foam. Additionally, increasing the temperature and foam thickness resulted in an increase in the effective moisture diffusivity. Therefore, sugarcane molasses powder can be utilized as a sweetener and

additive in the formulation of various food products using the foam mat drying method.

استفاده از روش کف پوشانی در تولید پودر ملاس نیشکر: بهینه‌یابی و سینتیک انتقال جرم

محمد نوشاد^۱✉، محمد حجتی^۱، پریسا قاسمی^۲

^۱ به‌ترتیب دانشیار و استاد گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده علوم دامی و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

^۲ دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده علوم دامی و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

✉ مسئول مکاتبه: Noshad@asnrukh.ac.ir

چکیده

مشخصات مقاله

زمینه مطالعاتی: در تولید پودرهای مواد غذایی، خشک کردن کف‌پوشی یک جایگزین مناسب و مقرون به صرفه در مقایسه با خشک کردن سنتی است.

هدف: هدف از این پژوهش انتخاب شرایط بهینه برای تولید پودر ملاس نیشکر با استفاده از روش کف‌پوشی بوده است.

روش کار: در مرحله نخست از غلظت‌های متفاوت آلبومین (۵ تا ۱۵ درصد)، صمغ گزانتان (۰/۱ تا ۰/۱۵ درصد) و زمان همزدن (۲ تا ۶ دقیقه) جهت تولید کف استفاده شد. ویژگی‌های پودرهای تولید شده (دانسیته، میزان حلالیت، دانسیته فشرده و غیرفشرده، رطوبت، pH و آبگیری مجدد) با دو ضخامت کف (۴ و ۶ میلی‌متر) در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت. از ۶ مدل خشک کردن جهت بررسی سینتیک خشک کردن نمونه‌ها استفاده شد.

نتایج: براساس نتایج مشخص گردید که نمونه حاصل از ۱۲/۴۱۷ درصد آلبومین، ۰/۱۲ درصد صمغ گزانتان و ۶ دقیقه همزدن بهترین عملکرد را از نظر پایداری و دانسیته کف داشت. علاوه‌براین، مدل وانگ و سینگ به عنوان بهترین مدل جهت بررسی سینتیک خشک شدن نمونه‌ها در تمام دماهای خشک کردن و ضخامت کف‌ها انتخاب شد. با استفاده از قانون دوم فیک، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت محاسبه شد و در محدوده (m²/s) ۲/۰۷×۱۰^{-۸} تا ۵/۱۸×۱۰^{-۸} با انرژی فعال‌سازی ۱۶/۳۵ و ۲۰/۱۵ کیلوژول بر مول به ترتیب برای ضخامت‌های ۴ و ۶ میلی‌متر بود.

نتیجه‌گیری: براساس نتایج به دست آمده، بیشترین فرایند خشک شدن کف ملاس نیشکر، در مرحله سرعت نزولی بود و با توجه به برازش مدل‌های مختلف خشک کردن، بهترین مدل جهت توصیف رفتار خشک شدن کف کلاس نیشکر، مدل وانگ و سینگ بود. همچنین افزایش دما و ضخامت کف باعث افزایش میزان ضریب نفوذ مؤثر رطوبت شد. بنابراین می‌توان با استفاده از روش خشک کردن کف پوشی، پودر ملاس نیشکر به عنوان شیرین‌کننده و افزودنی در فرمولاسیون محصولات مختلف غذایی تولید کرد.

نوع مقاله:

علمی پژوهشی

تاریخچه مقاله:

دریافت:

۱۴۰۲/۰۵/۲۳

پذیرش:

۱۴۰۲/۱۰/۱۰

انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

کلیدواژه:

خشک کردن کف‌پوشی، زمان همزدن، سینتیک خشک کردن، صمغ گزانتان، ملاس نیشکر

مقدمه

ملاس نیشکر یکی از محصولات جانبی در صنعت قند است که ایمن (GRAS) شناخته شده و در صنایع غذایی به عنوان یک شیرین کننده و جایگزین شکر استفاده می شود (دسیو و همکاران ۲۰۲۰). در واقع ملاس به عنوان پساب نهایی در تهیه ساکارز با روش های تبخیر، سانتریفیوژ و کریستالیزاسیون از آب نیشکر به دست می آید. از هر یک تن نیشکر، به طور متوسط ۳۵ تا ۴۵ کیلوگرم ملاس تولید می شود (جمیر و همکاران ۲۰۲۱). اجزای اصلی ملاس به طور کلی شامل ساکارز (۳۵-۳۰٪)، فروکتوز و گلوکز (۲۵-۱۰٪)، ترکیبات غیر قندی (۳-۲٪)، محتوای مواد معدنی و رطوبت است که حدود ۵۵-۴۵٪ از کل قندهای آن قابل تخمیر است (دوتانیا و همکاران ۲۰۱۶). ملاس دارای خواص ویژه ای از جمله ویژگی آنتی اکسیدانی، ضد میکروبی و سرشار از مواد معدنی مانند آهن، کلسیم و پتاسیم است و هم چنین از آن به عنوان کاهش دهنده وزن، درمان کم خونی و در پخت به عنوان خوراک تخمیر استفاده می شود (جمیر و همکاران ۲۰۲۱؛ دسیو و همکاران ۲۰۲۰؛ جین و همکاران ۲۰۱۷؛ رید و همکاران ۲۰۰۷).

امروزه روش خشک کردن کف پوشی به دلیل ساده و ارزان بودن، استفاده از دماهای پایین تر و کیفیت مطلوب محصول نهایی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. هم چنین می توان از این روش برای خشک کردن محصولات دارای قند و ویسکوزیته بالا و حساس به حرارت استفاده کرد (مین و همکاران ۲۰۲۳). در این روش با استفاده از همزدن، حجم زیادی از هوا را در حضور یک عامل کفزا و تثبیت کننده کف خوراکی، درون ماده غذایی مایع و نیمه جامد وارد می کنند و سپس کف تولید شده به صورت یک لایه نازک بوسیله روش های مختلف خشک کردن، خشک می شود (عفیفه و همکاران ۲۰۲۲؛ عبدالسلام و همکاران ۲۰۲۱).

برای خشک کردن کف پوشی، عامل کفزا همانند یک ماده سورفاکتانت عمل می کند که باعث کاهش کشش سطحی بین فازهای جامد و مایع می شود. پروتئین ها با ایجاد لایه ویسکوالاستیک در اطراف حباب ها سبب کاهش کشش

سطحی بین فازها شده و از این طریق باعث پایداری سیستم کف می شوند (برار و همکاران ۲۰۲۰). عوامل کفزا با ایجاد سطح وسیع برای انتشار رطوبت، کاهش کشش سطحی بین فاز گازی و مایع و افزایش تخلخل کف، باعث سریع تر شدن فرآیند خشک شدن می شوند. علاوه بر کاهش زمان خشک شدن، عوامل کفزا می توانند به طور قابل توجهی بر خواص فیزیکوشیمیایی پودر از نظر انبساط، تخلخل، پایداری، حلالیت و رنگ اثرگذار باشند (روهیلا و همکاران ۲۰۲۲). تاکنون از ایزوله پروتئین سویا برای تهیه پودر توت فرنگی (فرید و همکاران ۲۰۲۳)، آلبومین تخم مرغ برای به دست آوردن پودر موز سبز (کمالی و همکاران ۲۰۲۰) و پروتئین آب پنیر برای خشک کردن کف پوشی عصاره زردچوبه استفاده شده است (گومز و همکاران ۲۰۲۱).

صمغ ها، هیدروکلوئیدهایی هستند که با جذب آب موجب افزایش ویسکوزیته و پایداری سوسپانسیون های غذایی می شوند (صالحی و ساترابی ۱۴۰۱). صمغ گزانتان یک پلی ساکارید طبیعی و ی از مهم ترین بیوپلیمرهای صنعتی است. صمغ گزانتان به دلایل مهمی از جمله تثبیت امولسیون، پایداری دما، سازگاری با مواد غذایی در طیف گسترده ای از مواد غذایی مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این به عنوان عامل تثبیت کننده امولسیون ها و یا سوسپانسیون ها به دلیل توانایی آن در افزایش ویسکوزیته محلول های آبی استفاده می شود (سونگ و همکاران ۲۰۰۶). از عوامل مؤثر بر پایداری کف می توان به غلظت تثبیت کننده های کف و مدت زمان عمل همزدن اشاره کرد. بنابراین بهینه یابی این پارامترها به منظور دستیابی به پودر با ویژگی های مطلوب بسیار حائز اهمیت می باشد (مین و همکاران ۲۰۲۳).

بنابراین، هدف از این پژوهش، استفاده از روش سطح-پاسخ به منظور بهینه یابی فرآیند تولید پودر ملاس نیشکر با استفاده از روش خشک کردن کف پوشی بود. برای این منظور، از آلبومین تخم مرغ به عنوان عامل کفزا، صمغ گزانتان به عنوان تثبیت کننده برای حفظ پایداری کف و مدت زمان همزدن به عنوان متغیرهای مستقل فرآیند استفاده شد. علاوه بر این، تاثیر دو پارامتر کلیدی فرآیند خشک کردن شامل دمای خشک کردن و

کاهش حجم به عنوان شاخصی برای پایداری کف است که با استفاده از معادله (۱) زیر محاسبه شد.

$$(۱) \quad \text{پایداری کف} = \frac{V_{\text{foam}}}{V_{0\text{foam}}} \times 100$$

در این معادله V_{foam} تفاوت بین حجم کف اولیه و حجم مایع منتقل شده و $V_{0\text{foam}}$ حجم کف اولیه است (وادیا و همکاران ۲۰۲۰).

دانسیته کف

دانسیته کف ملاس از نسبت وزن کف تولید شده به حجم کف محاسبه شد. بدین منظور از یک ظرف استوانه‌ای برای اندازه‌گیری حجم (V_{foam}) و ترازو برای جرم (M_{foam}) استفاده گردید (برار و همکاران ۲۰۲۰). با استفاده از معادله (۲) زیر بر حسب g/cm^3 بیان شد.

$$(۲) \quad \text{دانسیته کف} = \frac{M_{\text{foam}} (\text{g})}{V_{\text{foam}} (\text{cm}^3)}$$

محتوای رطوبتی

محتوای رطوبتی پودر ملاس تولید شده، با استفاده روش AOAC محاسبه شد، بدین منظور نمونه‌ها به مدت ۳ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. محتوای رطوبتی با تفاوت بین وزن پودر قبل و بعد از خشک شدن محاسبه شد (AOAC, 1995).

شاخص حلالیت و شاخص جذب آب

شاخص حلالیت و شاخص جذب آب پودر ملاس طبق روش دهقان‌نیا و همکاران (۲۰۱۹) اندازه‌گیری شد. بدین منظور، ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر به ۲/۵ گرم از پودر ملاس اضافه شد و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای محیط مخلوط گردید و سپس محلول حاصل به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. در ادامه، با استفاده از معادلات (۳) و (۴) شاخص حلالیت و شاخص جذب آب پودر محاسبه شد.

$$(۳) \quad \text{شاخص حلالیت در آب} = \frac{m_2 - m_1}{m_3}$$

در این معادله m_1 وزن خالی پلیت، m_2 وزن نمونه و پلیت پس از خارج کردن آن از آون و m_3 وزن بخش شفاف بعد از سانتریفیوژ است.

ضخامت لایه کف نیز بر سینتیک خشک شدن کف پوشی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

ملاس از شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی اهواز و صمغ گزانتان با برند سیگما جهت انجام این پژوهش تهیه شدند. سفیده تخم مرغ به عنوان عامل کف‌زا (تخم مرغ کامل تهیه شد و سفیده آن جهت تولید کف مورد استفاده قرار گرفت) از بازار محلی ملاثانی خریداری شد. جهت تهیه کف، ابتدا ملاس را به بریکس ۲۵ رسانده و سپس، صمغ گزانتان (۰/۱-۰/۱۵ درصد) به آن اضافه شد و مخلوط فوق به خوبی همزده شد تا یک ترکیب همگن حاصل گردید. در ادامه، سفیده تخم مرغ در غلظت مشخص (۵-۱۵ درصد وزنی-وزنی) به آن اضافه شد و با استفاده از همزن خانگی (Moulinex، مدل BM6، ساخت اسپانیا) در بازه زمانی (۶-۲ دقیقه) همزده شد (جدول ۱). کف تولید شده به سینی‌های از جنس آلومینیوم (ارتفاع ۶ mm، طول ۴۸ cm و عرض ۴۰ cm) ریخته شد و در خشک‌کن (Heraeus، ساخت آلمان) با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد. بلافاصله پس از خروج از خشک‌کن با استفاده از یک آسیاب خانگی پودر شد و تا زمان انجام آزمون‌ها در پلاستیک‌های غیر قابل نفوذ در یخچال نگهداری شد.

Table1- Independent variables and their value in the central composite design

Independent variables	Concentration, w/w%
A: albumin	5-15
B: xanthan gum	0.1-0.15
C: Whipping Time	2-6

پایداری کف

پایداری کف با قرار دادن ۵۰ میلی‌لیتر از کف به درون قیف بوخنر با قطر ۱۰۰ میلی‌متر (سطح آن با کاغذ صافی پوشیده شده بود) که بر روی استوانه مدرج به مدت دو ساعت در دمای محیط نگهداری شده بود، تعیین شد. زهکشی، از نظر

نمونه کف بهینه به پلیت‌های آلومینیومی بصورت لایه نازک با ضخامت‌های ۴ و ۶ میلی‌متر ریخته و در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. 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 گردید. شش مدل نیمه‌تجربی برای سینتیک خشک کردن به نام‌های پیچ، انتشار، هندرسون و پاییس، نیوتن، لگاریتمی و ولنگ و سینگ به کار گرفته شد. بیان ریاضی مدل‌ها در جدول (۲) آورده شده است. حسن برازش با مقدار R^2 بالا (ضریب تعیین) و RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا) و SSE (مجموع مربعات خطا) پایین در نظر گرفته شد (نوشاد و قاسمی ۲۰۲۰). جهت برازش داده از نرم افزار Matlab (نسخه 2014a) استفاده شد.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (۸)$$

در معادله (۸)، MR نسبت رطوبت، محتوای رطوبت اولیه (Mi)، رطوبت در هر لحظه (Mt) و رطوبت تعادلی (Me) است.

از آنجایی که Me (میزان رطوبت تعادلی) در مقایسه با Mt (میزان رطوبت در هر لحظه) و Mi (محتوای رطوبت اولیه) بسیار کم است، می‌توان Me را در رابطه فوق نادیده گرفت و به معادله (۹) زیر ساده کرد:

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (۹)$$

تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت بر اساس قانون دوم فیک که برای یک تیغه نامحدود اعمال می‌شود (معادله ۱۰) محاسبه شد. قانون دوم فیک به طور گسترده برای مواد غذایی اعمال می‌شود و به تعیین دوره نرخ سقوط در فرایند خشک کردن کمک می‌کند (روهیلا و همکاران ۲۰۲۲).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} - \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (۱۰)$$

که در این معادله، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (m^2/s)، و L ضخامت کف بر حسب متر می‌باشد. ضریب نفوذ رطوبت مؤثر (D_{eff}) با رسم $\ln(MR)$ در مقابل زمان خشک شدن از داده‌های تجربی محاسبه شد. نمودار آن یک خط مستقیم با

$$(۴) \quad = \frac{m_{rc}}{m_0 - m_{re}} \text{ شاخص جذب آب}$$

در این معادله m_{rc} وزن بخش رسوب کرده از سانتریفیوژ، m_0 وزن اولیه نمونه و m_{re} وزن نمونه پس از خروج از آن است.

اندازه گیری pH

بدین منظور، پودر ملاس و آب مقطر به نسبت ۱:۱۰ (وزنی-حجمی) با هم مخلوط و سپس pH آن با استفاده از pH متر (Metrohm، ساخت سوئیس) اندازه‌گیری شد (قادری و همکاران ۲۰۱۷).

دانسیته حجمی فشرده و غیر فشرده

دانسیته حجمی فشرده و غیره فشرده مطابق روش نجات‌دارایی و همکاران (۲۰۲۱) انجام شد. بدین منظور مقدار مشخصی از پودر ملاس را به درون استوانه مدرج ریخته (دانسیته حجمی غیرفشرده) و سپس به آن ضربه زدن (۳۰ ضربه) شد، تا حجم ثابتی به دست آید (دانسیته حجمی فشرده) و با استفاده از معادلات (۵) و (۶) محاسبه شد.

$$(۵) \quad \frac{Mp}{V_f} = \text{دانسیته فشرده}$$

$$(۶) \quad \frac{Mp}{V} = \text{دانسیته غیر فشرده}$$

در این معادله، Mp وزن پودر (g)، Vf حجم نهایی پودر (cm^3) و V حجم پودر (cm^3) می‌باشند.

آبگیری مجدد

مقدار ۵ گرم پودر نمونه در ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر به مدت ۶۰ دقیقه غوطه‌ور شد. پس از فیلتر کردن، میزان آب‌گیری مجدد نمونه‌ها مطابق معادله (۷) محاسبه شد (نوشاد و همکاران ۲۰۲۰).

$$(۷) \quad \frac{w_2}{w_1} \times 100 = \text{آبگیری مجدد پودر}$$

در این معادله w_2 وزن ماده تخلیه شده و w_1 وزن ماده خشک شده می‌باشد.

بررسی سینتیک خشک شدن نمونه کف بهینه توسط خشک‌کن هوای داغ

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (12)$$

ضریب یا فاکتور آرنیوس (m^2/s)، E_a انرژی فعال سازی برای نفوذ رطوبت (kJ/mol)، R ثابت جهانی گازهای ایده آل ($kJ/k.mol$) و T دمای مطلق (K) می باشد. انرژی فعال سازی با رسم منحنی $\ln D_{eff}$ در برابر عکس دما ($1/T$) محاسبه می شود.

شیب منفی است و " K " با استفاده از معادله زیر به D_{eff} مربوط می شود:

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (11)$$

محاسبه انرژی فعال سازی

برای محاسبه انرژی فعال سازی از معادله آرنیوس استفاده شد (آلبوشریب و همکاران ۲۰۲۱):

Table 2- Mathematical models to investigate the drying kinetics of foam-mat drying of molasses foam

Number Model	Equation	References
Diffusion	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot x) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot x)$	Sobukola, Dairo, and Odunewu (2008)
Henderson Pabis	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot x)$	Pandith (2018)
Logarithmic	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot x) + c$	Erbay and Icier (2010)
Newton	$MR = \exp(-k \cdot x)$	Vengaiah and Pandey (2007)
Wang and Singh	$MR = \exp(-k \cdot x^n)$	Doymaz and Ismail (2011)
Page	$MR = 1 + a \cdot x + b \cdot x^2$	Kadam and Dhingra (2011)

آنالیز آماری

به منظور یافتن بهترین شرایط (بهینه یابی) تولید پودر ملاس به روش خشک کردن کف پوشی، از روش سطح پاسخ و نرم افزار Design Expert نسخه 10.0.4 استفاده شد. در این پژوهش از طرح مرکب مرکزی و با سه متغیر مستقل در سه سطح و ۶ نقطه مرکزی طرح استفاده گردید. متغیرهای مستقل شامل صمغ گزانتان ($0/15-0/1$ درصد وزنی-وزنی)، زمان همزدن ($2-6$) و آلبومین ($5-15$ درصد وزنی-وزنی) بودند. محدوده متغیرهای مستقل بر اساس آزمایش های اولیه انتخاب شدند. پس از بهینه یابی، مدل سازی ریاضی خشک شدن نمونه بهینه در سه دما (50 ، 60 و 70 درجه سانتی گراد) با دو ضخامت (4 و 6 میلی متر) بررسی شد.

نتایج و بحث

دانسیتة کف

یکی از مهم ترین عوامل برای بررسی شرایط عمل همزنی، دانسیته کف است که هر چه میزان هوای محبوس شده در

کف بیشتر باشد، مقدار دانسیته کف کمتر خواهد بود (فرید و همکاران ۲۰۲۳). براساس نتایج جدول (۳)، غلظت آلبومین، صمغ گزانتان و مدت زمان همزدن اثر معناداری ($p < 0/05$) بر دانسیته کف ها داشت و با افزایش غلظت آلبومین و مدت زمان همزدن، دانسیته کف ها کاهش یافت (شکل ۱). افزایش غلظت آلبومین سبب افزایش تعداد حباب های هوا در کف می شود که همین امر باعث افزایش حجم و کاهش دانسیته کف می شود که نتایج مشابهی برای دانسیته کف آلوئه ورا (روی و همکاران ۲۰۲۳)، میوه انبه (کومار و همکاران ۲۰۲۲)، میوه آناناس (شاری و همکاران ۲۰۱۸) و میوه پاپایا (عبدالسلام و همکاران ۲۰۲۱) مشاهده شد.

همچنین نتایج نشان داد همزدن به مدت ۲ دقیقه کف، منجر به تولید کف با دانسیته کمتر در مقایسه با مدت زمان ۶ دقیقه شد. افزایش مدت زمان همزدن باعث تخریب دیواره کف و فروپاشی آن می شود که هم امر باعث افزایش دانسیته کف می شود که با نتایج حاصل از پژوهش نوشاد و همکاران (۲۰۲۰) برای کف زرشک و صفات و همکاران (۲۰۲۱) برای کف آلو همخوانی دارد.

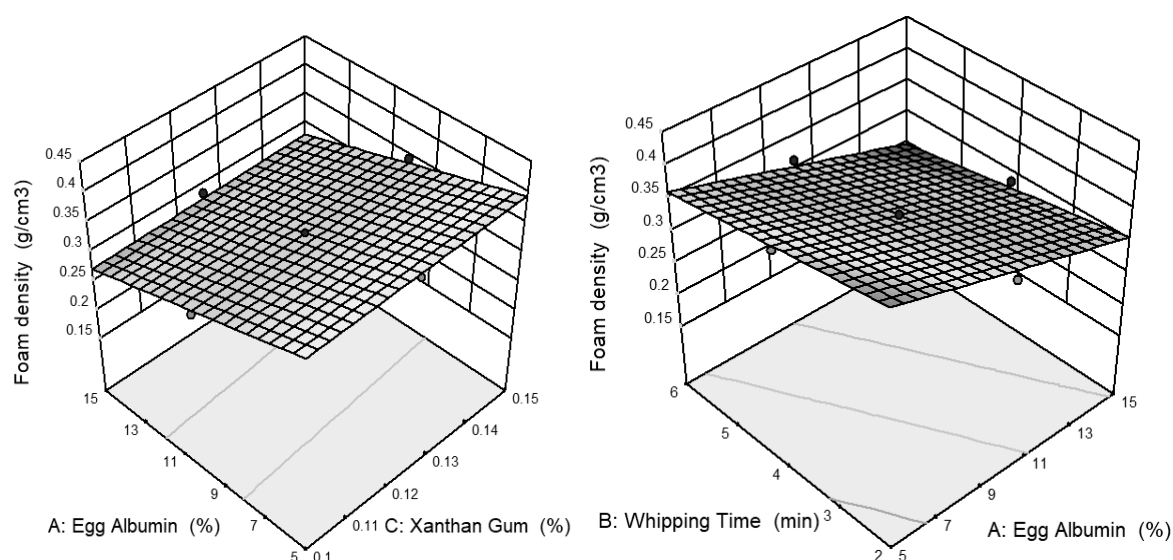


Figure 1- The effect of foam production conditions (albumin, Whipping Time and xanthan gum) on the density of sugarcane molasses foam

پایداری کف

پایداری کف به سرعت تخلیه مایع از ساختار کف بستگی دارد. هرچه حجم مایع تخلیه شده کمتر باشد، پایداری کف بیشتر باشد (فرید و همکاران ۲۰۲۳). کف باید برای مدت طولانی پلیدار بماند و در عین حال حداقل زهکشی را برای خشک شدن سریع فراهم کند. نتایج نشان داد (جدول ۳)، افزایش غلظت آلبومین و صمغ گزانتان اثر معناداری ($p < 0.05$) بر پایداری کف ملاس نیشکر داشت. با توجه به شکل (۲)، با افزایش غلظت آلبومین و صمغ گزانتان، پایداری کف نیز افزایش یافت. این احتمالاً به دلیل وجود آلبومین است

که به عنوان تثبیت‌کننده خوبی عمل کرده و انرژی سطحی بین حباب‌ها را در طول تشکیل مداوم کف‌ها را کاهش می‌دهد. علاوه‌براین، ویژگی آبگریزی تثبیت‌کننده‌های کف از استحکام دیواره‌های حباب نیز حفاظت می‌کند که در نتیجه، ساختار کف را در برابر فروپاشی حفاظت می‌کند. صمغ گزانتان به عنوان پلی‌ساکارید آنیونی با کاهش برهمکنش پروتئین و افزایش ضخامت دیواره کف‌ها باعث پایداری و استحکام کف می‌شود (سوسانتی و همکاران ۲۰۲۱). روند مشابهی نیز در فرآیند خشک کردن کف آلوه‌ورا (روی و همکاران ۲۰۲۳) و کف میگو (عزیزپور و همکاران ۲۰۱۴) مشاهده شده است.

Table 3- ANOVA for stability and density of the sugarcane molasses foam

Source	DF	Foam stability	Foam density
Intercep	1	225.48**	2.803**
Albumin	2	91.299**	0.029**
Whipping Time	2	2.343*	0.007**
Xanthan Gum	2	19.707**	0.000**
Albumin * Whipping Time	1	1.074**	0.000**
Albumin * Xanthan Gum	1	0.781**	0.000**
Whipping Time * Xanthan Gum	1	0.469**	7.656E-5**
Albumin * Whipping Time * Xanthan Gum	1	0.377**	0.000**
Error		0.040	1.227E-5
R-Squared		0.998	0.998
Adj R-Squared		0.995	

* Significant at 5% level
Df, Degrees of freedom

** Significant at 1% level
ns, lack-of-fit, is not significant at $p > 0.05$

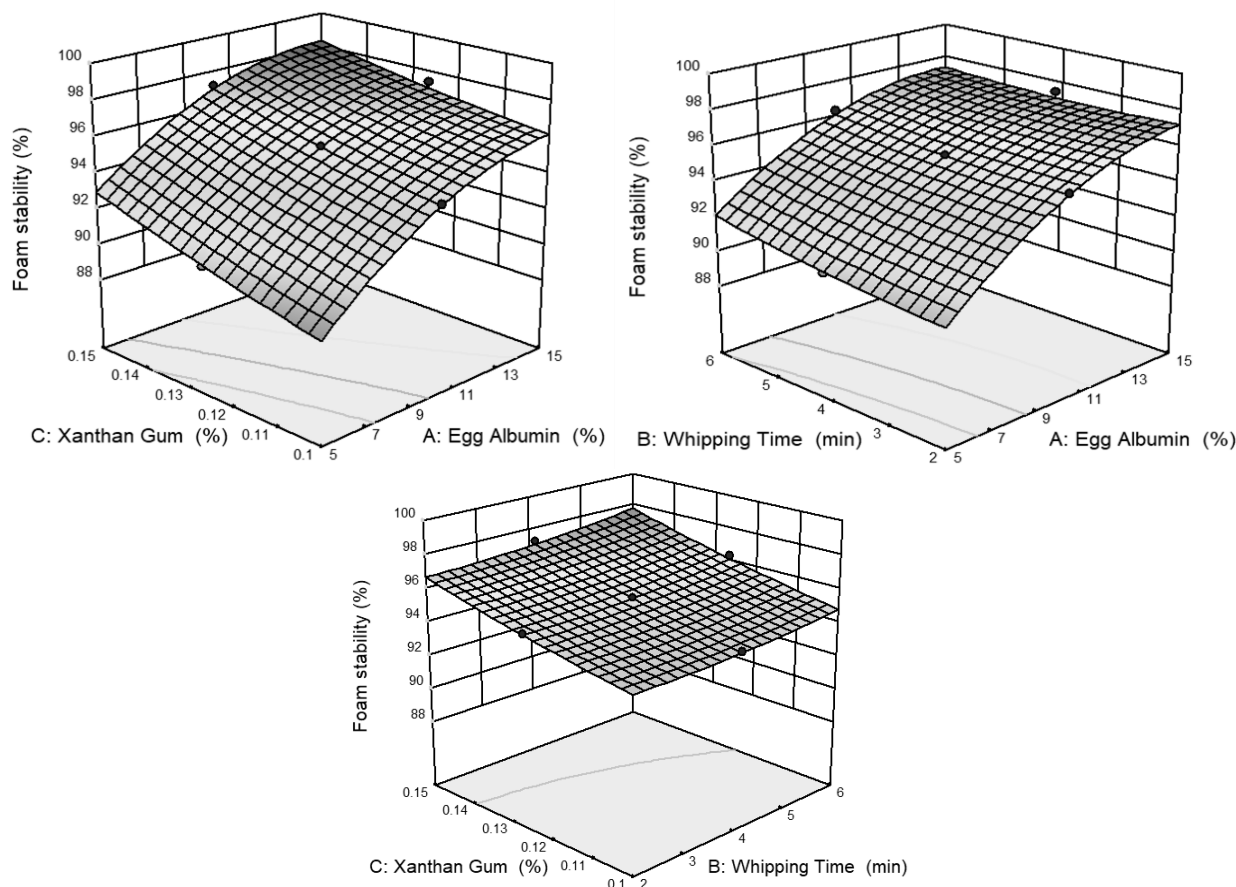


Figure 2- The effect of foam production conditions (albumin, whipping time and xanthan gum) on the stability of sugarcane molasses foam

شاخص حلالیت و شاخص جذب آب

با توجه به این که اکثر پودرها قبل از مصرف در آب یا یک سیستم آبی حل می‌شوند، بنابراین شاخص حلالیت و جذب آب یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های کیفی پودرها می‌باشد و بیان گر رفتار پودر در طی حل شدن در آب است. نتایج آنالیز واریانس (جدول ۴) نشان داد غلظت آلبومین و صمغ گزانتان بر شاخص حلالیت آب اثر معناداری ($p < 0.05$) داشت. در

حالی که مدت زمان هم‌زدن اثر معناداری ($p < 0.05$) بر شاخص حلالیت نداشت افزایش غلظت البومین و صمغ گزانتان سبب افزایش پایداری کف در فرایند خشک شدن می‌شود که همین امر سبب افزایش تخلخل و به تبع آن حلالیت پودر می‌شود که با یافته‌های پژوهش (نوشاد و همکاران، ۲۰۲۰) و بحریه و همکاران (۲۰۲۳) مطابقت دارد.

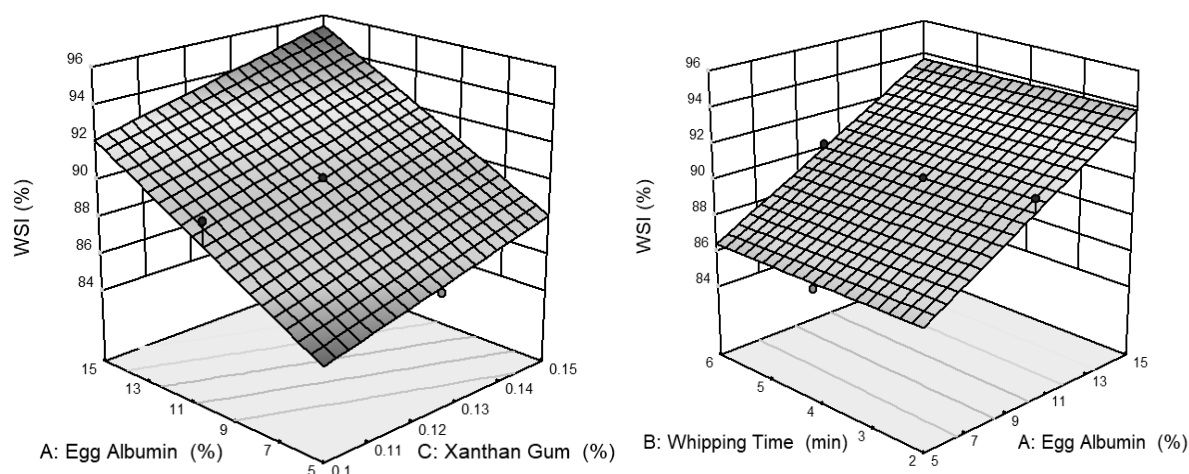


Figure 3- The effect of albumin, whipping time and xanthan gum on the solubility index of sugarcane molasses powder

سبب افزایش گروه‌های آب گریز و کاهش پیوند هیدروژنی می‌شود که در نتیجه شاخص جذب آب کاهش می‌یابد. در حالی که افزایش غلظت آلبومین باعث افزایش جذب آب توسط نمونه‌ها شد که احتمالاً به دلیل ویژگی آبدوستی پروتئین‌هاست (جدول ۴). روند مشابهی از افزایش جذب آب با افزایش غلظت سفیده تخم مرغ در پژوهش خشک کردن آب آلبالو نیز مشاهده شده است (صفات و همکاران ۲۰۲۱).

شاخص جذب آب ظرفیت یک ماده غذایی را نشان می‌دهد که تا چه حد می‌تواند آب را جذب کند و ارتباط مستقیمی با توانایی هیدراسیون آن دارد (صفات و همکاران ۲۰۲۱). افزایش غلظت آلبومین مدت زمان هم زدن، اثر معناداری ($p < 0.05$) بر میزان جذب آب توسط نمونه‌ها داشت. افزایش مدت زمان هم‌زدن باعث کاهش جذب آب توسط نمونه‌ها شد (شکل ۴). این امر به دلیل شکسته و باز شدن زنجیره پروتئینی است که

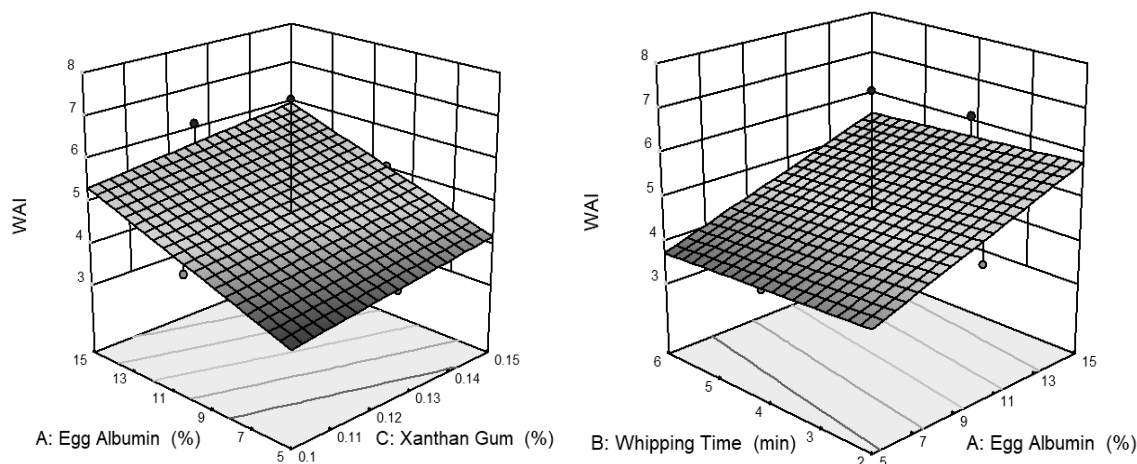


Figure 4- The effect of albumin, whipping time and xanthan gum on the water absorption of sugarcane molasses powder

Table 4- analysis results for sugarcane molasses powder responses

Source	DF	WSI	WAI	Moisture	pH	Bulk density	Tap density	Rehydration
Intercep	1	202.881**	563.692**	1153.11**	993.619**	7.595**	8.788**	132.223**
Albumin	2	124.187**	8.310**	22.231**	0.159**	0.080**	0.091**	1.739**
Whipping Time	2	0.041 ^{ns}	0.466**	3.101**	0.002**	0.001**	1.169E-5 ^{ns}	0.001 ^{ns}
Xanthan Gum	2	26.645**	1.037**	0.455**	8.306E-5 ^{ns}	0.001**	0.001**	0.199**
Albumin *	1	0.001 ^{ns}	0.062**	0.328**	0.009**	1.806E-5*	0.002**	1.000E-5 ^{ns}
Whipping Time	1	0.763**	0.452**	0.002*	2.500E-5 ^{ns}	0.000**	3.906E-5*	0.029**
Albumin * Xanthan Gum	1	0.002 ^{ns}	0.029**	0.011**	2.500E-5 ^{ns}	5.256E-5**	0.001**	0.001*
Whipping Time *								
Xanthan Gum	1	0.004 ^{ns}	0.118**	0.003*	0.000 ^{ns}	0.000**	0.001	0.001*
Albumin *								
Whipping Time *								
Xanthan Gum	1							
Error		0.081	0.002	0.002	0.000	0.008	0.015	0.001
R-Squared		0.996	0.999	0.993	0.992	0.995	0.997	0.996
Adj R-Squared		0.993	0.997	0.989	0.985	0.991	0.994	0.992

* Significant at 5% level

** Significant at 1% level

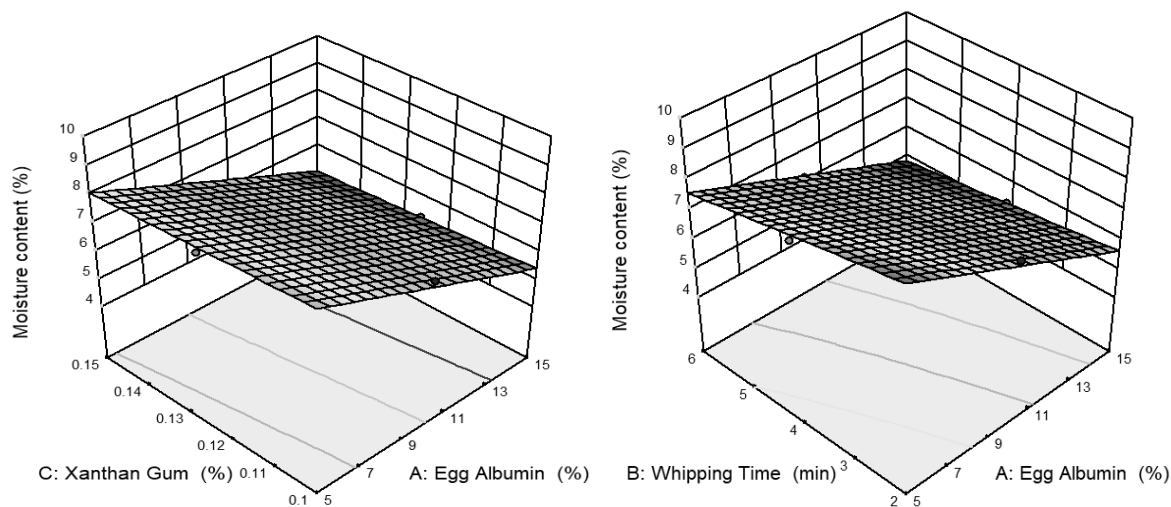
Df, Degrees of freedom

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

دلیل هم زدن اتفاق می افتد، می‌باشد (کانها و همکاران ۲۰۲۲؛ تان و همکاران ۲۰۲۰). هم چنین نتایج آنالیز واریانس (جدول ۴) نشان داد، افزایش غلظت صمغ گزانتان اثر معناداری ($P < 0.05$) بر میزان محتوای رطوبتی نمونه‌ها داشت. بطوری که با افزایش غلظت صمغ گزانتان، محتوای رطوبتی نمونه‌ها افزایش یافت که احتمالاً به دلیل ویژگی جاذبه الرطوبه بودن گزانتان است.

محتوای رطوبتی

محتوای رطوبتی یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عمر انبارمانی پودرها است. بطوری که با کاهش محتوای رطوبتی می‌توان عمر انبارمانی پودر را افزایش داد. براساس نتایج به دست آمده (شکل ۵)، با افزایش غلظت آلبومین و مدت زمان هم‌زدن محتوای رطوبتی نمونه‌ها کاهش یافت. این امر احتمالاً به دلیل محتوای رطوبتی پایین آلبومین و تغییراتی که در ساختار آن به



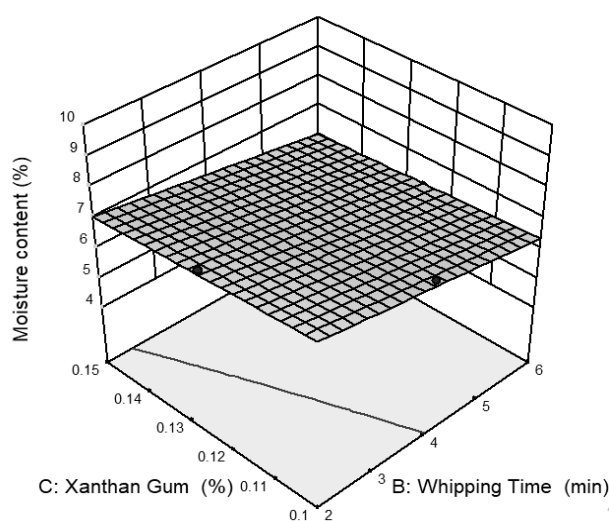


Figure 5- The effect of albumin, whipping time and xanthan gum on the moisture content of sugarcane molasses powder

اندازه گیری pH

براساس نتایج به دست آمده (جدول ۴)، غلظت آلبومین و مدت زمان هم زدن اثر معناداری ($p < 0.05$) بر میزان pH داشت در حالی که غلظت صمغ گزانتان اثر معناداری ($p < 0.05$) بر میزان pH نداشت. با افزایش غلظت آلبومین، مقدار pH نمونه-ها نیز افزایش یافت که به دلیل pH قلیایی آلبومین ($9.3 - 7.6$)

pH= است. حسینی و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که افزودن آلبومین سبب افزایش pH پودر گوجه فرنگی شد که با نتایج نوشاد و همکاران (۲۰۲۰) و علی و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت شد.

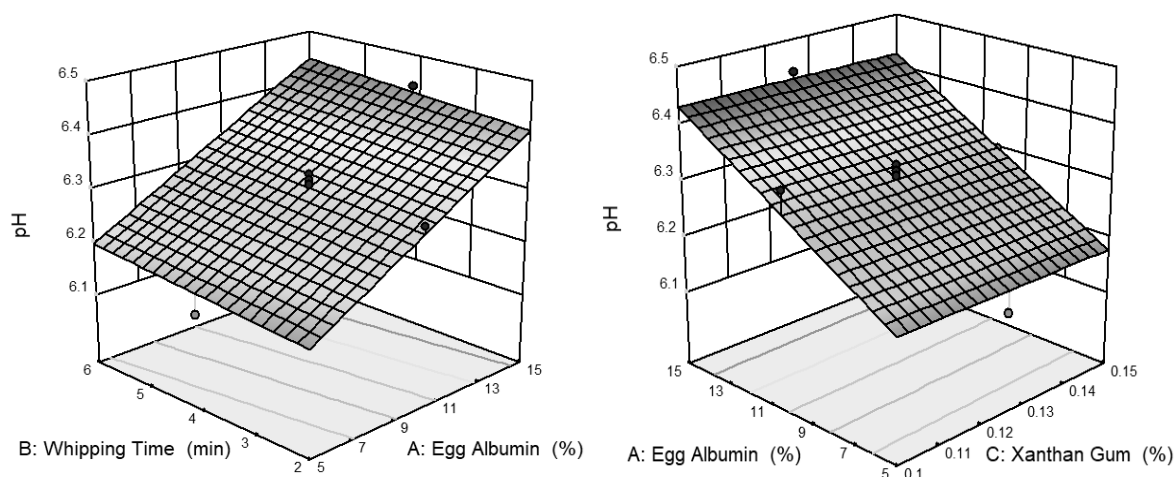


Figure 6- The effect of albumin, whipping time and xanthan gum on the pH of sugarcane molasses powder

دانسیتة فشرده و غیر فشرده

مقادیر دانسیته غیرفشرده پودر حاصل از خشک کردن کف-پوشی بین $0.2 - 0.6$ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد (روهیلا

کاهش اندازه ذرات پودر می‌شود که در نتیجه باعث افزایش دانسیته فشرده پودر می‌شود. در حالی که در ادامه بدلیل تغییر در ساختار آلبومین، اندازه ذرات پودر افزایش می‌یابد که همین امر باعث کاهش دانسیته فشرده نمونه‌ها می‌شود (کانها و همکاران ۲۰۲۲؛ روهیلا و همکاران ۲۰۲۲).

و همکاران ۲۰۲۲). براساس نتایج به دست آمده (جدول ۴ و اشکال ۷ و ۸)، افزایش غلظت آلبومین و صمغ گزانتان و اثر متقابل آن‌ها اثر معناداری ($p < 0.05$) بر دانسیته فشرده و غیر-فشرده نمونه‌ها داشت. صمغ گزانتان به دلیل داشتن وزن مولکولی بالا باعث افزایش دمای گذار شیشه‌ای در نمونه‌ها می‌شود که همین امر سبب کاهش رفتار آمورفی (بی‌شکلی) و

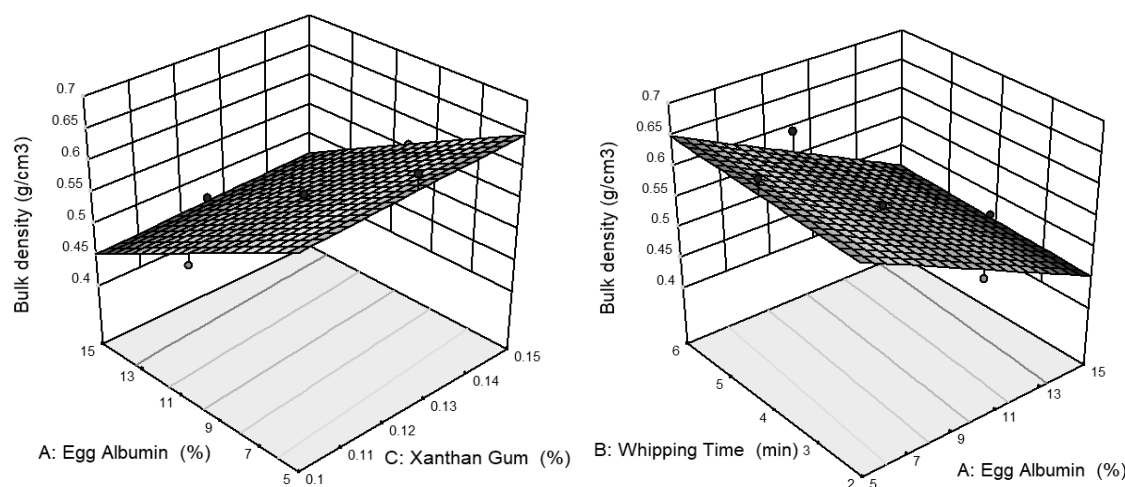


Figure 7- The effect of albumin, whipping time and xanthan gum on the Bulk density of sugarcane molasses powder

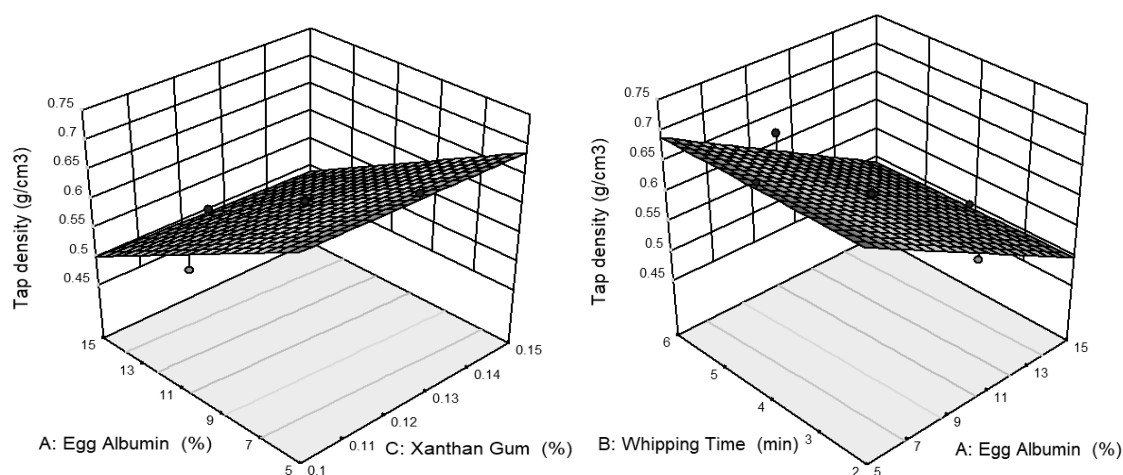


Figure 8- The effect of albumin, whipping time and xanthan gum on the Top density of sugarcane molasses powder

براساس نتایج به دست آمده (جدول ۴)، غلظت آلبومین و صمغ گزانتان اثر معناداری ($p < 0.05$) بر میزان آبگیری مجدد نمونه‌ها داشت. افزایش غلظت آلبومین و صمغ گزانتان باعث افزایش

آبگیری مجدد

اثرگذار است بطوری که پودرهایی با دانسیته بالا (ساختار متراکم) قابلیت ابگیری مجدد کمتری دارند. نتایج مشابهی را علی و همکاران (۲۰۱۵)، نوشتاد و همکاران (۲۰۱۹) به ترتیب برای پودر پاپایا و پودر زرشک گزارش کردند.

قابلیت ابگیری مجدد توسط نمونه‌ها شد که می‌تواند به دلیل وجود گروه‌های آبدوستی مانند هیدورکسیل در ساختار این ترکیبات باشد. علاوه‌براین، شکل و اندازه ذرات، تخلخل و ساختار و خواص سطحی نیز بر میزان ابگیری مجدد نمونه‌ها

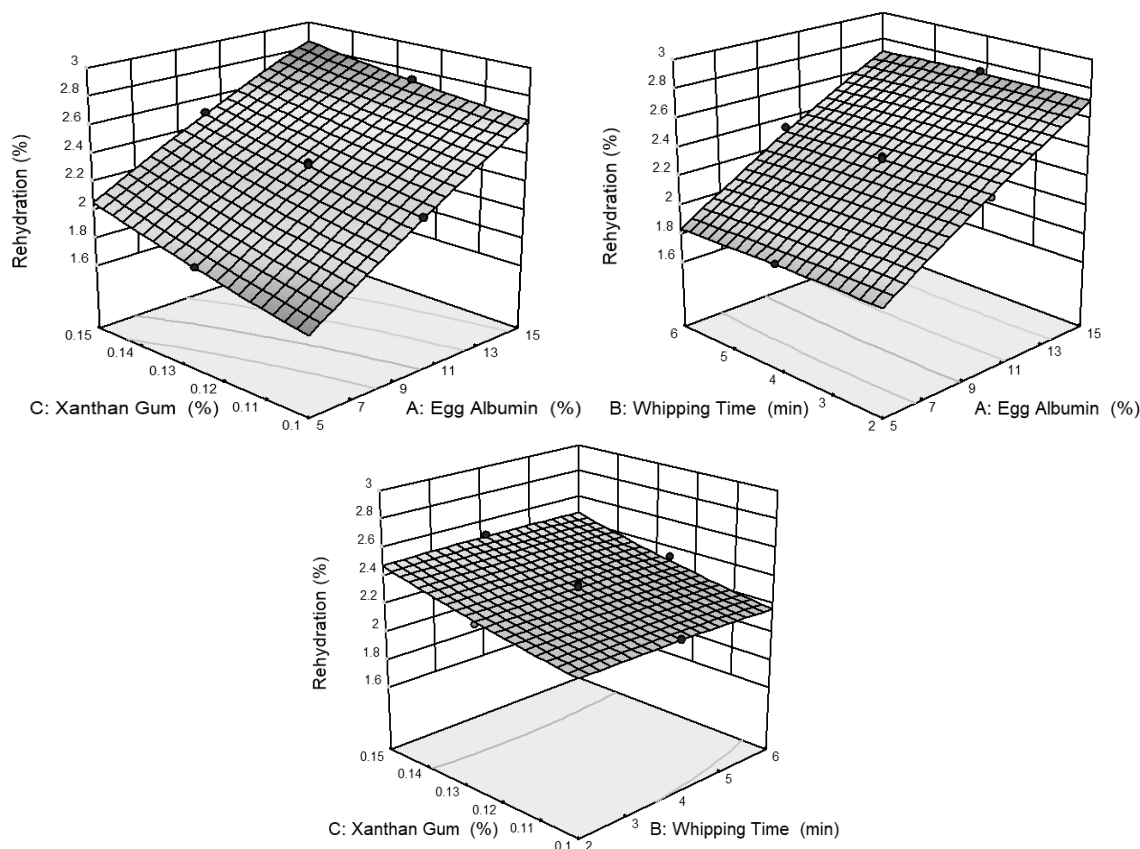


Figure9- The effect of albumin, whipping time and xanthan gum on the rehydration rate of sugarcane molasses powder

(حلالیت، ابگیری مجدد) و حداقل (رطوبت، pH، دانسیته غیره فشرده و فشرده) انجام و نتایج در جدول (۵) گزارش شد.

تعیین شرایط بهینه‌یابی تولید پودر ملاس نیشکر
بهینه‌یابی شرایط تولید پودر ملاس نیشکر به منظور دستیابی به کف با حداکثر پایداری و حداقل دانسیته و پودر با حداکثر

Table 4- Optimizing the production conditions of sugarcane molasses powder

Albumin	Whipping Time	Xanthan	Foam stability	Foam density	WSI	WAI	Moisture	pH	Bulk density	Tap density	Rehydration
12.417	6	0.12	98.412	0.451	94.988	5.741	5.581	6.363	0.513	0.532	2.861

مدل‌سازی سینتیک خشک کردن

خشک کردن کف‌پوشی ملاس نیشکر با استفاده از آلبومین و صمغ گزانتان در سه دمای متخلف (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی-گراد) و دو ضخامت (۴ و ۶ میلی‌متر) در خشک کن با هوای داغ انجام شد. تغییرات رطوبت در حین خشک کردن ملاس نیشکر در هوای داغ با عامل کف‌زا (آلبومین تخم مرغ) و پایدارکننده (صمغ گزانتان) با ضخامت‌های مختلف در شکل (۱۰) ارائه شده است. مدت زمان خشک کردن با افزایش دمای خشک کردن، کاهش یافت (شکل ۱۰). برار و همکاران (۲۰۲۰) و عبدالسلام و همکاران (۲۰۲۱) نتایج مشابهی را به

ترتیب برای خشک کردن پوره هلو و میوه پایا گزارش کردند. همان طور که از منحنی‌های خشک شدن مشاهده می‌شود، بیشترین سرعت خشک شدن در دوره نرخ سقوط اتفاق افتاد. با عبور هوای داغ از روی لایه نازک کف‌ها، آب آزاد از نمونه‌ها خارج می‌شود که با ادامه فرآیند خشک شدن، به دلیل از دست دادن آب آزاد، سرعت خشک کردن کاهش می‌یابد (برار و همکاران ۲۰۲۰). براساس نتایج به دست آمده (شکل ۱۰)، با افزایش ضخامت کف‌ها، مدت زمان خشک شدن کف‌ها نیز افزایش یافت.

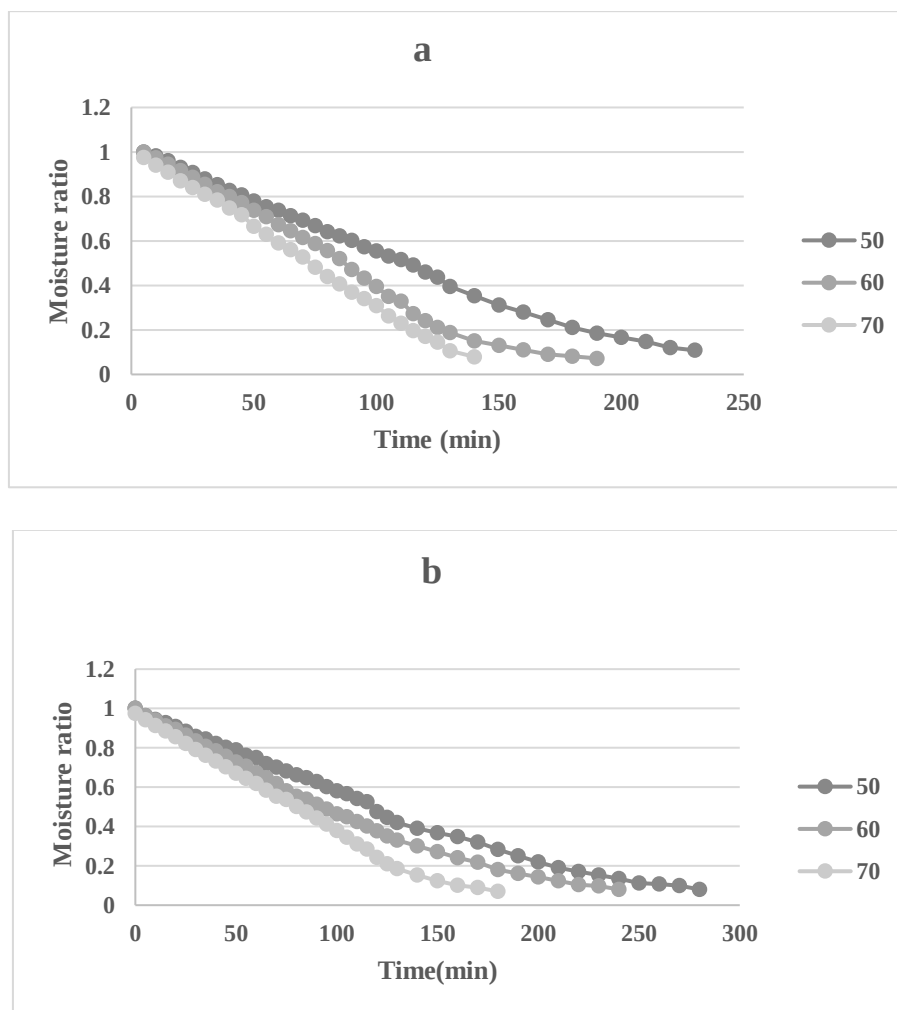


Figure 10- Variations of moisture ratio with drying time for foam-mat drying of sugarcane molasses at 4 mm(a) and 6mm(b) thickness

از مدل‌های مختلفی به منظور مدل‌سازی سینتیک خشک شدن کف ملاس نیشکر به روش کف پوشی استفاده شد و در نهایت مدلی که دارای بیشترین مقدار R^2 و کمترین میزان RMSE و SSE بود، به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. براساس نتایج به دست آمده (جداول ۶ و ۷)، مدل وانگ و سینگ دارای بهترین برازش با داده‌های آزمایشی در تمامی دماها و ضخامت‌ها داشت.

Table 5- Statistical results obtained from fitting the laboratory data with a thickness of 4 mm and a temperature of 50, 60 and 70 (°C)

Model		R^2	RMSE	SSE
Diffusion	50	0.9641	0.0562	0.1170
	60	0.9548	0.0620	0.1115
	70	0.9586	0.0663	0.1197
Henderson Pabis	50	0.9763	0.0451	0.0772
	60	0.9633	0.0549	0.0906
	70	0.9657	0.0532	0.0792
Logarithmic	50	0.9761	0.0458	0.0777
	60	0.9631	0.0551	0.0910
	70	0.9655	0.0533	0.0796
Newton	50	0.9641	0.0548	0.1170
	60	0.9548	0.0600	0.1115
	70	0.9486	0.0640	0.1187
Wang and Singh	50	0.9971	0.0158	0.0095
	60	0.9948	0.0205	0.0126
	70	0.9962	0.0178	0.0089
Page	50	0.9964	0.0177	0.0119
	60	0.9916	0.0263	0.0208
	70	0.9957	0.0185	0.0096

Table 6- Statistical results obtained from fitting the laboratory data with a thickness of 6 mm and a temperature of 50, 60 and 70 (°C)

Model		R^2	RMSE	SSE
Diffusion	50	0.9642	0.0563	0.1270
	60	0.9969	0.0161	0.0091
	70	0.9539	0.0668	0.1294
Henderson Pabis	50	0.974	0.0466	0.0892
	60	0.9855	0.0344	0.0427
	70	0.9623	0.0548	0.0901
Logarithmic	50	0.9747	0.0468	0.0897
	60	0.9855	0.0344	0.0427
	70	0.9633	0.0549	0.0904
Newton	50	0.9645	0.0548	0.1260
	60	0.9770	0.0427	0.0674
	70	0.9475	0.0646	0.1294
Wang and Singh	50	0.9962	0.0180	0.133
	60	0.9983	0.0118	0.0050
	70	0.9949	0.0205	0.0126
Page	50	0.9959	0.0189	0.0146
	60	0.9988	0.0097	0.0034
	70	0.9936	0.0230	0.0159

انرژی فعال‌سازی (E_a) شاخصی از انرژی لازم برای شروع انتقال رطوبت داخلی مواد غذایی به سطح آن است. محدوده کلی انرژی فعال‌سازی برای مواد غذایی مختلف و محصولات کشاورزی از ۱۲/۷ تا ۱۱۰ کیلوژول بر مول است (بحریه و همکاران ۲۰۲۳). براساس نتایج به دست آمده (جدول ۷)، انرژی فعال‌سازی برای کف ملاس نیشکر با ضخامت ۴ و ۶ میلی‌متر به ترتیب ۱۶/۳۵ و ۲۰/۱۵ کیلوژول بر مول بود.

براساس نتایج به دست آمده (جدول ۸)، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت نمونه‌ها با افزایش دما و ضخامت کف افزایش یافت. افزایش دما سبب افزایش جنبش مولکولی و مکش سطحی می‌شود که همین امر باعث افزایش فشار بخار درون کف می‌شود که در نتیجه باعث افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت می‌شود. از طرفی با افزایش ضخامت، سرعت مهاجرت رطوبت درونی به سطح نمونه‌ها کاهش می‌یابد که همین امر باعث افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت می‌شود که با نتایج نوشاد و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت داشت.

Table 7- Effective diffusivity and activation energy of drying sugarcane molasses foam

Temperature (°C)	Thickness (mm)	Effective moisture diffusivity (m^2/s)	$E_a(kJ/mol)$	$D_0(m^2/s)$
50	4	2.07×10^{-8}	16.35	9.21×10^{-8}
60	4	2.58×10^{-8}		
70	4	2.95×10^{-8}		
50	6	3.34×10^{-8}	20.15	2.1×10^{-7}
60	6	3.91×10^{-8}		
70	6	5.18×10^{-8}		

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از درصدهای مختلف آلبومین، صمغ گزانتان و سرعت هم‌زدن جهت تولید کف ملاس نیشکر استفاده شد و پارامترهای فیزیکی و شیمیایی کف تولید شده بررسی شد. براساس نتایج به دست آمده، بیشترین فرایند خشک شدن کف ملاس نیشکر، در مرحله سرعت نزولی بود و با توجه به برازش مدل‌های مختلف خشک کردن، بهترین مدل جهت توصیف رفتار خشک شدن کف ملاس نیشکر، مدل وانگ و سینگ بود. همچنین افزایش دما و ضخامت کف باعث افزایش میزان

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در نمونه‌ها شد. بنابراین می‌توان با استفاده از روش خشک کردن کف پوشی، پودر ملاس نیشکر به عنوان شیرین‌کننده و افزودنی در فرمولاسیون محصولات مختلف غذایی تولید کرد.

تشکر و قدردانی

در پایان، نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از حمایت‌های مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان تشکر و قدردانی نمایند.

References

- صالحی ف و ساترابی م ، ۱۴۰۱، مدل‌سازی فرایند خشک کردن برش‌های هلو پوشش داده شده با صمغ‌های دانه ریحان و گزانتان با سامانه فروسرخ نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی، ۳۲ (۳)، ۱۷ تا ۲۸.
- Abd El-Salam E A, Ali A M, & Hammad K S, 2021. Foaming process optimization, drying kinetics and quality of foam mat dried papaya pulp. *Journal of Food Science and Technology* 58: 1449-1461.
- Afifah, N, Sarifudin A, Kumalasari R, Indrianti N, Ratnawati L, Karim M A, ... & Taufan A, 2022. Foaming properties, microstructure, and mathematical model of foam mat drying of pasta sauce based on tomato. *Czech Journal of Food Sciences* 40(2): 130-137.

- Albosharib D, Noshad M, Jooyandeh H, & Zaki Dizaji H, 2021. Effect of freezing and radiofrequency pretreatments on quality and kinetics of convective air-drying of potatoes. *Journal of Food Processing and Preservation* 45(12): 1-9.
- Ali S M, Begum S, Kulkarni L R, Ranganatha S C, & Nagraj K H, 2015. Optimizing Process Parameters for Foam Mat Drying of Papaya Pulp (Carica Papaa L.). *Agricultural Engineering Today* 39(2): 3-10.
- AOAC. 1995. Official methods of analysis (16th ed.); Association of Official Analytical Chemists: AOAC Arlington, VA, Washington DC. USA.
- Azizpour M, Mohebbi M, Hossein Haddad Khodaparast M, & Varidi M, 2014. Optimization of foaming parameters and investigating the effects of drying temperature on the foam-mat drying of shrimp (*Penaeus indicus*). *Drying Technology* 32(4): 374-384.
- Bahriye G, Dadashi S, Dehghannya J, & Ghaffari H, 2023. Influence of processing temperature on production of red beetroot powder as a natural red colorant using foam-mat drying: Experimental and modeling study. *Food Science & Nutrition* 1-19
- Brar A S, Kaur P, Kaur G, Subramanian J, Kumar D, & Singh A, 2020. Optimization of process parameters for foam-mat drying of peaches. *International journal of fruit science*, 20(sup3): S1495-S1518.
- 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. *International Journal of Thermal Sciences* 135: 30-43.
- Deseo M A, Elkins A, Rochfort S, & Kitchen B, 2020. Antioxidant activity and polyphenol composition of sugarcane molasses extract. *Food Chemistry* 314: 126180.
- Dotaniya M L, Datta S C, Biswas D R., Dotaniya C K, Meena B L, Rajendiran S, ... & Lata M, 2016. Use of sugarcane industrial by-products for improving sugarcane productivity and soil health. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* 5: 185-194.
- Doymaz I, & Ismail O, 2011. Drying characteristics of sweet cherry. *Food and Bioproducts Processing* 89: 31-38.
- Erbay Z, & Icier F, 2010. A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 50(5): 441-464.
- Farid E, Mounir S, Siliha H, El-Nemr S, & Talaat E, 2023. Effect of soy protein isolate concentration and whipping time on physicochemical and functional properties of strawberry powder. *Journal of Food Measurement and Characterization* 1-12.
- Fauziyah N, Ifie I, Syarief O, & Darniadi S, 2023. Impact of hydrocolloid and foaming agent on the physicochemical, microstructural and bioactive characteristics of foam-mat freeze-dried tapai (fermented black glutinous rice) powder. *Food Science & Nutrition* 11(1): 578-589.
- Franco T S, Perussello C A, Ellendersen L N, & Masson M L, 2016. Effects of foam mat drying on physicochemical and microstructural properties of yacon juice powder. *LWT-Food Science and Technology* 66: 503-513.
- Gomes J V P, de Oliveira L A, Pereira S M S, da Conceição A R, Anunciação P C, de Souza E C G, ... & Della Lucia C M, 2021. Comparison of bioactive compounds and nutrient contents in whey protein concentrate admixture of turmeric extract produced by spray drying and foam mat drying. *Food Chemistry* 345: 128772.
- Hossain M A, Mitra S, Belal M, & Zzaman W, 2021. Effect of foaming agent concentration and drying temperature on biochemical properties of foam mat dried tomato powder. *Food Research* 5(2): 291-297.
- Jain R, & Venkatasubramanian P, 2017. Sugarcane molasses—a potential dietary supplement in the management of iron deficiency anemia. *Journal of dietary supplements* 14(5): 589-598.
- Jamir L, Kumar V, Kaur J, Kumar S, & Singh H, 2021. Composition, valorization and therapeutical potential of molasses: a critical review. *Environmental Technology Reviews* 10(1): 131-142.
- Kadam D M, & Dhingra D, 2011. Mass transfer kinetics of banana slices during osmoconvective drying. *Journal of Food Process Engineering* 34: 511-532.

- Kamali R, Dadashi S, Dehghannya J, & Ghaffari H, 2020. Production of Green Banana Powder Using Foam-Mat Drying Method: Effects of Ovalbumin Concentration on Drying Kinetics and Physicochemical Properties of the Product. *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology* 15(2):101-112.
- Kanha N, Regenstien J M, & Laokuldilok T, 2022. Optimization of process parameters for foam mat drying of black rice bran anthocyanin and comparison with spray-and freeze-dried powders. *Drying Technology* 40(3): 581-594.
- Kumar A, Kandasamy P, & Chakraborty I, 2022. Analysis of foaming properties of mango pulp for foam-mat drying: Impact of egg albumin concentration and whipping time. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A* 103(3): 717-724.
- Minh T N, La Bao P, Van T N, & Quang M V, 2023. Impact of foaming conditions on quality for foam-mat drying of Butterfly pea flower by multiple regression analysis. *Plant Science Today* 10(2): 51-57.
- Nejatdarabi S, & Mohebbi M, 2021. Effect of foam-mat drying condition on physical properties and rehydration behavior of mushroom powder. *Iranian Food Science & Technology Research Journal* 17(3).
- Noshad M, & Ghasemi P, 2020. Influence of freezing pretreatments on kinetics of convective air-drying and quality of grapes. *Food Bioscience* 38: 100763.
- Noshad M, Hojjati M, Ghasemi P, & Mostaan A, 2020. Optimization and modeling of mass transfer kinetics during foam-mat drying of date syrup. *Innovative Food Technologies* 7(4): 535-550.
- Pandith J A, 2018. Induction heating assisted foam mat drying of papaya pulp: drying kinetics, drying modeling, and effects on quality attributes. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 20(2): 206-215.
- Qadri O S, & Srivastava A K, 2017. Microwave-assisted foam mat drying of guava pulp: Drying kinetics and effect on quality attributes. *Journal of food process engineering* 40(1): 1-11.
- Reyed R M, & El-Diwany A, 2007. Molasses as bifidus promoter on bifidobacteria and lactic acid bacteria growing in skim milk. *Internet J Microbiol* 5(1): 1-8.
- Rohilla S, & Mahanta C L, 2022. Foam mat dried tamarillo powder: Effect of foaming agents on drying kinetics, physicochemical and phytochemical properties. *Journal of Food Processing and Preservation* 46(12): 1-17.
- Roy T, & Alam M S, 2023. Foam-mat dried modified aloe polysaccharide powder: Optimization and physiochemical characterization. *eFood* 4(2): 1-14.
- Seerangurayar T, Manickavasagan A, Al-Ismaili A M, & Al-Mulla Y A, 2017. Effect of carrier agents on flowability and microstructural properties of foam-mat freeze dried date powder. *Journal of Food Engineering*: 215: 33-43.
- Shaari N A, Sulaiman R, Rahman R A, & Bakar J, 2018. Production of pineapple fruit (*Ananas comosus*) powder using foam mat drying: Effect of whipping time and egg albumen concentration. *Journal of Food processing and Preservation* 42(2):1-10.
- Sifat S A, Trisha A T, Huda N, Zzaman W, & Julmohammad N, 2021. Response surface approach to optimize the conditions of foam mat drying of plum in relation to the physical-chemical and antioxidant properties of plum powder. *International journal of food science* 1-16.
- Sobukola O, Dairo O U, & Odunewu A, 2008. Convective hot air drying of blanched yam slices. *International Journal of Food Science and Technology* 43: 1233–1238.
- Song K W, Kim Y S, & Chang G S, 2006. Rheology of concentrated xanthan gum solutions: Steady shear flow behavior. *Fibers and Polymers* 7: 129-138.
- Susanti D Y, Sediawan W B, Fahrurrozi M, & Hidayat M, 2021. Foam-mat drying in the encapsulation of red sorghum extract: Effects of xanthan gum addition on foam properties and drying kinetics. *Journal of the Saudi society of Agricultural Sciences* 20(4): 270-279.
- Tan S L, & Sulaiman R, 2020. Color and rehydration characteristics of natural red colorant of foam mat dried *Hibiscus sabdariffa* L. powder. *International Journal of Fruit Science* 20(1): 89-105.
- Vengaiah P C, & Pandey J P, 2007. Dehydration kinetics os sweet pepper (*Capsicum annum* L.). *Journal of Food Engineering* 81: 282–286.

- Wadia C, Champawat P S, & Jain S K, 2020. Influence of foam thickness, whipping time and drying temperature on production of guava powder during foam mat drying. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 9(5S):720-727.