J. Agric. Mech., 11 (1):55-70 (2026)

Journal of
Agricultural Mechanization

Online ISSN: 2717-4107
Journal homepage: https://jam.tabrizu.ac.ir/?lang=en

Original Article

Evaluation of Quality Changes in Honey Powder During the Spray Drying Process

Arash Jebelli Moghaddam [1], Ali Hassanpour [1]*, Faroogh Sharifian [1], Adel Hosainpour [1], Ahmad Piri[1]

1- Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

ARTICLE INFO

Keywords:

Atomizer Pressure,
Honey Powder,
Maltodextrin,
Spray Drying,
Quality Analysis

Received:
March 16, 2026

Revised:
July 09, 2026

Accepted:
July 13, 2026

***Correspondingauthor:**

a.hassanpour@urmia.ac.ir

ABSTRACT

The high viscosity and inherent stickiness of honey pose substantial challenges for handling, transport, packaging, and its incorporation as a food ingredient. Converting honey into a powder can mitigate many of these constraints and broaden its practical applications. This study aimed to produce honey powder via spray drying and to characterize the physicochemical quality of the resulting product. Spray drying was conducted at three inlet air temperatures (120, 150, and 180 °C), three atomization pressures (0.5, 1.0, and 1.5 bar), and three maltodextrin carrier levels (15, 32.5, and 50% w/w, based on honey dry matter). Process conditions were optimized using response surface methodology, with particular emphasis on atomization pressure as a key operating variable. The powder was evaluated for moisture content, water activity, bulk density, flowability, color parameters, pH, sucrose content, fructose-to-glucose ratio, and hydroxymethylfurfural (HMF) concentration. Analysis of variance indicated that inlet air temperature and maltodextrin concentration significantly affected ($p < 0.05$) most quality attributes. Temperature influenced 9 of the 11 measured responses and was the dominant factor overall, with pronounced effects on moisture, water activity, bulk density, flowability, HMF formation, and color indices. Maltodextrin concentration significantly affected water activity, pH, sucrose content, fructose-to-glucose ratio, and yellowness. Atomization pressure also contributed significantly to several critical responses, including moisture content, bulk density, water activity, yellowness, and HMF concentration. Multi-response optimization identified optimal conditions at an inlet air temperature of 170–180 °C, atomization pressure of 1.0–1.5 bar, and maltodextrin concentration of 45–50%. Under these settings, the process yielded honey powder with moisture content below 2%, water activity below 0.30, high flowability, desirable lightness, and low HMF levels.

Introduction

Honey is a highly hygroscopic and sticky material, making its storage, handling, and industrial application difficult. Spray drying is an effective technique for converting liquid honey into powder, improving shelf life, flowability, and product stability. However, the high sugar content and low glass transition temperature of honey often cause stickiness and wall deposition during drying. Maltodextrin is commonly used as a carrier to overcome these limitations. Although previous studies have mainly focused on inlet air temperature and carrier concentration, the influence of atomizer pressure has received limited attention. Therefore, this study investigated the combined effects of inlet temperature, maltodextrin concentration, and atomizer pressure on the physicochemical properties of spray-dried honey powder.

Materials and Methods

Honey (Azar Kando, Iran) was mixed with maltodextrin at 15, 32.5, and 50% (w/w) and dried using a laboratory-scale spray dryer. Process optimization was performed using a Box–Behnken response surface design with three independent variables: inlet air temperature (120–180 °C), atomizer pressure (0.5–1.5 bar),

How to cite:
Jebelli Moghaddam, A., Hassanpour, A., Sharifian, F., Hosainpour, A., and Piri, A. (2026). *Evaluation of Quality Changes in Honey Powder During the Spray Drying Proces.* Journal of Agricultural Mechanization, 11(1):55-70.
https://doi.org/10.22034/jam.2026.70751.1349

This is an open-access article under the CC BY NC license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

and maltodextrin concentration (15–50%). Seventeen experimental runs were conducted. The responses included moisture content, water activity, bulk density, flowability, pH, sucrose, fructose/glucose (F/G) ratio, hydroxymethylfurfural (HMF), and color parameters (L*, a*, and b*).

Results and Discussion

Response surface models adequately described all responses, with inlet air temperature identified as the most influential processing factor. Increasing temperature and maltodextrin concentration significantly reduced moisture content and water activity, while higher atomizer pressure further enhanced drying by producing finer droplets. The lowest moisture (<2%) and water activity (<0.30) were achieved at high temperature, high carrier concentration, and high pressure. Bulk density and flowability improved with increasing temperature and maltodextrin concentration. Higher atomizer pressure also enhanced powder flowability through the formation of smaller and more uniform particles. A slight increase in pH was observed with increasing temperature and maltodextrin concentration. Sucrose content increased under higher temperature and carrier levels, indicating better sugar retention during drying. In contrast, the fructose/glucose ratio decreased with increasing temperature and pressure because fructose is more susceptible to thermal degradation, whereas higher maltodextrin concentrations protected fructose and helped preserve this ratio. HMF formation increased markedly at temperatures above 150 °C due to enhanced sugar degradation and non-enzymatic browning. Nevertheless, increasing maltodextrin concentration and atomizer pressure partially reduced HMF formation by shortening drying time and protecting sugars from excessive thermal damage. Color was also affected by processing conditions. Increasing temperature reduced lightness (L*) and increased redness (a*), reflecting stronger browning reactions. Maltodextrin improved lightness by protecting color compounds, while atomizer pressure showed only a minor influence on color compared with temperature. Unlike most previous studies, this work demonstrated that atomizer pressure is an important process variable. Although its effect was generally smaller than that of temperature, optimizing atomizer pressure significantly improved moisture removal, water activity, flowability, and HMF control, thereby enhancing overall powder quality.

Conclusion

The physicochemical quality of spray-dried honey powder was mainly governed by inlet air temperature, followed by maltodextrin concentration and atomizer pressure. High temperature improved drying efficiency and powder flowability but promoted HMF formation and darkening. Maltodextrin protected sugars, improved powder stability, and enhanced lightness. Most importantly, this study confirmed that atomizer pressure, a parameter rarely investigated in previous honey spray-drying studies, plays a significant role in improving drying performance and final product quality. Multi-response optimization indicated that inlet temperatures of 170–180 °C, 45–50% maltodextrin, and 1.0–1.5 bar atomizer pressure provided the best balance between low moisture, low water activity, high flowability, acceptable HMF levels, and desirable color characteristics. These findings provide practical guidance for industrial production of high-quality honey powder and emphasize the importance of incorporating atomizer pressure into future spray-drying optimization studies.

نشریه نشریه
مکانیزاسیون کشاورزی
شاپا الکترونیکی: 2717-4107
درگاه نشریه: https://jam.tabrizu.ac.ir



مقاله پژوهشی

ارزیابی تغییرات ویژگی‌های کیفی پودر عسل در فرآیند خشک کردن پاششی

آرش جبلی مقدم[۱]، علی حسن پور*[۱]، فاروق شریفیان [۱]، عادل حسین پور[۱]، احمد پیری [۱]

تاریخ دریافت:۱۴۰۴/۰۹/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۸ تاریخ پذیرش:۱۴۰۵/۰۲/۲۸

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه - ارومیه - ایران

* نویسنده مسئول: E-mail: a.hassanpour@urmia.ac.ir

چکیده

ویسکوزیته بالای عسل و ماهیت چسبنده آن، حمل‌ونقل، بسته‌بندی و کاربردش در صنعت غذا به عنوان افزودنی را با مشکل روبه‌رو می‌کند. برخی از این مشکلات با عرضه محصول به شکل پودر قابل حل است. هدف از این پژوهش، تولید پودر عسل در خشک‌کن‌پاششی و بررسی ویژگی‌های کیفی محصول نهایی پودر می‌باشد. در این پژوهش پودر عسل با دستگاه خشک‌کن‌پاششی در سه سطح دمای هوای ۱۲۰، ۱۵۰ و۱۸۰درجه سلسیوس، سه سطح فشار اتمایزر ۰/۵، ۱ و ۱/۵ بار و نسبت‌های ۱۵، ۳۲/۵ و ۵۰ درصد کمک‌خشک‌کن مالتودکسترین نسبت به جرم ماده خشک عسل به روش سطح پاسخ مطالعه شد. در تحقیقات قبلی دما و درصد حامل بررسی و نقش فشاراتمایزر در تولید پودر عسل کمتر مورد مطالعه بوده است. فاکتورهای فیزیکوشیمیایی مورد ارزیابی شامل محتوای‌رطوبت، فعالیت‌آبی، چگالی، جریان‌پذیری، رنگ و pH، درصدساکارز، نسبت فروکتوز به گلوکز و HMF پودر مورد بررسی و آزمایش قرار گرفتند. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که در اغلب شاخص‌ها، اثر دما و درصد مالتودکسترین در سطح ۵ درصد معنی‌دار بوده و بر کیفیت نهایی پودر عسل تأثیر مستقیم دارد. بر این اساس در ۹ ویژگی از ۱۱ ویژگی، دما اثر معنی‌دار داشته و غالباً مهم‌ترین عامل تغییرات است. دما به ویژه بر رطوبت، فعالیت‌آبی، چگالی، جریان‌پذیری، HMF و شاخص‌های رنگی بیشترین تأثیر را نشان داد. درصد مالتودکسترین در بیشتر ویژگی‌ها به‌خصوص فعالیت‌آبی، pH، ساکارز، نسبت فروکتوز به گلوکز و گرایش‌به زردی اثر معنی‌دار داشت. فشار در چند ویژگی مهم مانند محتوای‌رطوبت، چگالی، فعالیت‌آبی و گرایش‌به زردی و HMF اثر معنی‌دار داشت. نتایج این تحقیق نشان داد که بهترین شرایط این فرآیند در دمای ورودی ۱۷۰–۱۸۰ سلسیوس، فشار ۱ تا ۱/۵ بار و درصد حامل ۴۵–۵۰ حاصل شد. در این شرایط، پودری با رطوبت زیر ۲ درصد، فعالیت‌آبی کمتر از ۰/۳، جریان‌پذیری بالا، روشنایی مطلوب و مقدار HMF پایین به‌دست آمد.

کلمات کلیدی: پودر عسل، خشک کردن پاششی، مالتودکسترین، فشار اتمایزر، خواص کیفی

This is an open-access article under the CC BY NC license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

۱- مقدمه

عسل در حالت مایع و طبیعی خود، ویسکوزیته و چسبندگی بالایی دارد. برای راحتی مصرف و استفاده آسان در صنعت غذا، عسل خشک کاربردی‌تر است. پودر عسل دارای ماندگاری بیشتری بوده و در صنایع غذایی و دارویی بدلیل راحتی استفاده، خاصیت سیلان آزاد، راحتی توزین و جابجایی، کاهش فضای انبار کردن، مورد استفاده است.در سال‌های اخیر تکنیک‌های جدید خشک کردن برای حفظ کیفیت محصول، مورد توجه بوده است. خشک کردن به روش پاششی جزو این روش‌ها می‌باشد(Krishnamurthy *et al*., 2008).

روش پاششی به صورت خشک کردن سریع مایع یا دوغاب به پودر خشک با گاز داغ است. این روش برای تولید موفق بسیاری از محصولات مانند محصولات لبنی، کنسانتره‌ها، تی بگ‌ها، محصولات صنایع غذایی استفاده شده است (Elmi *et al*., 2013).

تبدیل عسل مایع به پودرعسل به‌دلیل محتوای بالای قند عسل و چسبندگی عسل خشک مشکل می‌باشد. پودر عسل معمولا با اضافه کردن اجزایی مثل امولسیفایر، مواد ضد کلوخه‌ای شدن و مواد پرکننده با وزن مولکولی بالا به منظور کاهش چسبندگی تولید می‌شود (Nurhadi *et al*., 2022). عسل‌های خشک به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول گروهی هستند که عسل به صورت تکه تکه یا پولک[1] مانند داخل پودر عسل می‌باشد که با فشار کمتری تهیه می‌شوند و دسته دیگر از عسل‌ها معمولاً به عنوان آب نبات عسل مصرف می‌شوند. در این مورد تبخیر در خلاء انجام شده است. گروه دیگر پودرهای عسلی هستند که شامل ۵۰ تا ۷۰ درصد عسل همراه با سایر شیرین کننده‌های جامد مثل شربت ذرت با فروکتوز بالا یا شربت گلوکز یا سایر اجزاء کمکی و یا بدون آن‌ها می‌باشد (Qi Zheng *et al*., 2024) .

در تحقیقاتی که در رابطه با خشک کردن عسل به روش پاششی وجود دارد، نادلی و همکاران در دمای ۱۸۰ °C و۲۰۰ و درصد حامل ۴۰ و۶۰ پودر عسل به روش پاششی تولید کردند که در دمای ۱۸۰ و۶۰ درصد حامل بهترین حالت تولید شد (Nadali, *et al.* 2022). در پژوهشی دیگر روند تغییرات پارامترهای پودر عسل در مقایسه با عسل فرآوری نشده، افزایش سطح HMF، pH و شاخص روشنایی (L) را نشان داد. در مقابل، کاهشی در فعالیت دیاستاز، TA، ساکارز ظاهری، قندهای احیاکننده و شاخص‌های رنگ (*a و *b) مشاهده شد. این تغییرات، تأثیر خشک‌کردن پاششی بر خواص فیزیکوشیمیایی عسل، به ویژه تخریب حرارتی ترکیبات زیست فعال کلیدی و تغییرات در رنگ و ترکیب قند را برجسته می‌کند (Vosoghi, *et al.* 2025). نورهادی و همکاران طی تحقیقی در ۵۰ درصد مالتودکسترین و دمای ۸۰ °C و ۱۸۰ اقدام به تولید پودر با روش اسپری کردند و با روش فریزدرایر و ۵۰ درصد صمغ عربی به عنوان حامل نیز استفاده کردند که در نتیجه پودر حاصل از اسپری بهترین حالت شد (Nurhadi *et al*., 2012). در مطالعه‌ای دیگر موتلو و همکاران طی پژوهشی، اثر روش‌های مختلف خشک‌کردن با مالتودکسترین، صمغ عربی و نسبت‌های ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد وزن عسل انجام دادند؛ ایشان دریافتند که پودر عسل حاصل از روش پاششی مقدار HMF کمتر و اندازه ذرات کوچکتر از روش تحت خلا دارد (Mutlu, C. 2023). همچنین در تحقیقی دیگر تأثیر خشک‌کردن پاششی در دمای پایین ورودی ۷۵ °C و ۵۰ و به جای آب از شیر به عنوان ماده حل شونده استفاده و تاثیرات آن را بر ترکیبات فنولی، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ترکیبات آرومایی عسل کلزایی بررسی کردند و نتایج نشان داد هر چند پودرهای حاصل از این روش دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالا و آرومای غنی بودند ولی چسبندگی بالا و HMF بالایی داشتند (Samborska, *et al*. 2019).

با توجه به مطالعات پیشین عمده‌ترین مشکلات مهم پودر عسل در مطالعه (Nurhadi *et al*., 2022)، (Qi Zheng *et al*., 2024) و (Vosoghi, *et al.* 2025) چسبندگی به شدت بالای ذرات بهم، جریان‌پذیری نامناسب و افزایش سطح HMF، می‌باشد. استفاده از دماهای مختلف ۹۰ °C تا ۱۵۰ و نسبت‌های مختلف ماده مالتودکسترین و دیگر حامل‌ها از نسبت ۱۰ تا ۵۰ درصد روش‌های مناسبی جهت بهبود پودر نهایی و رسیدن به بهترین کیفیت محصول بود.

هدف از این پژوهش، با توجه به اهمیت محصول نهایی عسل و مزایای تهیه پودر با روش خشک‌کردن پاششی، مطالعه اثر دمای هوای ورودی و غلظت ماده کمک‌خشک‌کن و نیز اعمال تغییر فشار نازل از ۰/۵ تا ۱/۵ بار در خشک کن پاششی می‌باشد. در پژوهش‌های پیشین (Nadali, *et al.* 2022) و (Mutlu.& Erbaş, 2020) بیشتر به درصد کمک‌خشک‌کن و دما توجه شده که در این پژوهش عامل فشار اتمایزر نازل نیز مورد بررسی قرار گرفت و با بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محصول حاصله، پودری با کیفیت بالا به تولید انجامید.

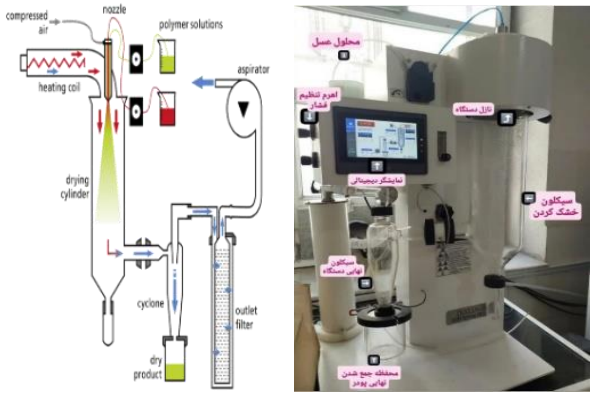
۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش از عسل بدون موم آذر کندو محصولی از صنایع غذایی گلشهد استفاده شد.

برای پودر کردن عسل از روش خشک کردن پاششی استفاده گردید. خشک‌کن پاششی مورد استفاده در تحقیق حاضر ساخت شرکت دانش بنیان درسا به ساز مدل DFD 50-4-V11 (شکل ۱)، دارای سیکلون استوانه‌ای با ابعاد ۱۱۰×۴۳×۶۵ cm3 بوده و در آزمایشگاه مرکز تحقیقات دانشگاه علوم پزشکی تبریز مستقر می‌باشد. آزمایشات خشک‌کن پاششی در در سه دمای هوای ورودی ۱۲۰ °C،

[1] Flakes

۱۵۰ و ۱۸۰، فشار نازل پاششی ۰/۵ bar، ۱ و ۱/۵ و هم‌چنین نسبت‌های ۱۵، ۳۲/۵ و ۵۰ درصد کمک‌خشک‌کن مالتودکسترین نسبت به جرم ماده خشک عسل با روش سطح پاسخ مطالعه شد و خواص فیزیکی و شیمیایی پودر تولید شده (شکل۲) مورد بررسی قرار گرفت و بعد آزمایشات در دمای یخچال C ° ۴±۱ نگهداری شد (Fazaeli, 2012).



شکل ۱- شماتیک دستگاه خشک‌کن پاششی
Fig 1. Schematic of spray dryer



شکل۲- پودر حاصل از روش اسپری درایر
Fig 2. Powder obtained by spray drying method

۱-۲- اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی پودر

۱-۱-۲- رطوبت

جهت اندازه‌گیری رطوبت پودر از استاندارد (AOAC, 2000) استفاده شد. ۲۰ گرم از هر یک از نمونه‌ها بر روی یک فویل آلومینیومی ۸×۸ cm^2 ریخته شدند. سپس فویل‌های حاوی پودر در داخل آون (Schalter Controller و مدل KEFA) در دمای C ° ۸۵ تا رسیدن به وزن ثابت قرار گرفتند. مقدار رطوبت از طریق رابطه (۱) و (۲) محاسبه گردید (AOAC, 2000).

(۱) $100 \times \text{ماده جامد کل} = (M_2 - M_0)/(M_1 - M_0)$

(۲) درصد ماده جامد کل - ۱۰۰ = ٪ محتوای رطوبت

M_2 : وزن ظرف + نمونه خشک شده نهایی (گرم)

M_1 : وزن ظرف + نمونه پودر اولیه (گرم)

M_0 : وزن ظرف (گرم)

۲-۱-۲- فعالیت آبی:

فعالیت آبی به صورت نسبت فشار بخار آب در ماده غذایی به فشار بخار اشباع آب در همان دما تعریف می‌شود. فعالیت آبی شاخص مهمی در پودرهای خشک‌شده است زیرا عمر مفید پودر تولید شده به آن وابسته است. جهت اندازه‌گیری فعالیت آبی از دستگاه آکوالب مدل Series 3 TE ساخت کشور آمریکا استفاده شد. این دستگاه با اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی، فعالیت آبی را محاسبه می‌کند (Ganaie *et al.*, 2021) بدین منظور ۱۰ گرم پودر عسل از هر نمونه در ظرف مخصوص دستگاه قرار داده شد و فعالیت آبی در دمای C ° ۲۵ بعد از زمان ۳ الی ۵ دقیقه اندازه‌گیری شد.

۳-۱-۲- اندازه‌گیری pH

برای اندازه‌گیری pH عسل و پودر حاصل از آن از دستگاه pHسنج رومیزی مدل Metrohm 827 pH meter ساخت کشور سوئیس استفاده شد. پس از کالیبراسیون دستگاه در این مرحله pHسنج آماده آزمایش می‌شود، مقدار ۱۰ گرم پودر در آب حل و به داخل بشر ۱۰۰ میلی‌لیتر ریخته می‌شود و الکترود داخل آن غوطه‌ور شده و حدود یک دقیقه دستگاه به حالت ثبات باقی ماند و pH نمونه قرائت شد.

۴-۱-۲- دانسیته توده‌ای

جهت اندازه‌گیری دانسیته توده‌ای از روش (ندیم و همکاران[1] ۲۰۱۳) استفاده شد. برای این منظور دو گرم پودر عسل را در یک استوانه مدرج ۱۰ میلی‌لیتر با درجه‌بندی ۰/۱ میلی لیتر ریخته و از نسبت جرم پودر به حجم اشغال شده در استوانه مدرج، دانسیته توده‌ای به صورت گرم بر میلی‌لیتر با رابطه (۳) محاسبه شد.

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_s} \qquad (۳)$$

که در این رابطه **ρ** چگالی توده‌ای ($gr.ml^{-1}$)، M_s جرم نمونه قبل فشرده شدن (gr) و V_s حجم نمونه‌ی استوانه‌ای (ml) می‌باشد.

۵-۱-۲- دانسیته حقیقی ذرات

جهت اندازه‌گیری دانسیته حقیقی ذرات نمونه‌ها دو گرم پودر در یک استوانهٔ مدرج ۱۰ میلی‌لیتر ریخته شد. در مرحله بعد ۵ میلی‌لیتر اتر نفت به آن اضافه و به استوانه مدرج ضرباتی وارد شد تا همه پودر ته‌نشین شود. سپس یک میلی‌لیتر اتر دیگر به آن اضافه شد تا پودرهایی که به دیواره چسبیده بودند، ته‌نشین شوند. در نهایت چگالی ذرات به صورت گرم بر میلی‌لیتر با رابطه (۴) محاسبه گردید.

[1] Nadeem *& al.*

$$\rho_t = \frac{M_t}{V_t} \quad (۴)$$

که در این رابطه ρ_t چگالی حقیقی ($gr.ml^{-1}$)، M_t جرم نمونه پودر (gr) و V_t حجم نمونه بعد ضربه زدن به استوانه (ml) می‌باشد.

۶-۱-۲- جریان‌پذیری پودر و چسبندگی

پودر با عدد هاوسنر کمتر از ۱/۲۵ که نشانگر شاخص پیوستگی هست، دارای چسبندگی کم و پودر با عدد هاوسنر ۱/۴-۱/۲ دارای چسبندگی متوسط می‌باشد. هرچه چسبندگی یک ماده کمتر باشد، جریان‌پذیری ماده بیشتر می‌شود (Bansal *et al*., 2014). در این تحقیق نسبت شاخص کار و عدد هاوسنر برای پودر عسل تیمارهای مختلف با سه تکرار متفاوت محاسبه شد سپس با استفاده از آن دو شاخص، جریان‌پذیری پودر و میزان چسبندگی طبق جدول (۱) و (۲) مقایسه شد.

جدول۱- طبقه‌بندی پیوستگی پودر بر اساس نسبت هاوسنر
Table 1. Classification of Powder Cohesiveness Based on the Hausner Ratio

پیوستگی پودر	HR
کم	<۱/۲
متوسط	۱/۲-۱/۴
زیاد	۱/۴<

جدول۲- طبقه‌بندی قابلیت جریان پودر بر اساس اندیس کار
Table 2. Classification of Powder Flowability Based on the Carr Index

قابلیت جریان پودر	%CI
خیلی خوب	<۱۵
خوب	۱۵-۲۰
نسبتا خوب	۲۰-۳۵
بد	۳۵-۴۵
خیلی بد	۴۵<

۷-۱-۲- رنگ پودر عسل

شاخص‌های رنگ پودر L*a*b* تمامی نمونه‌های مورد مطالعه توسط دستگاه هانترلب مدل CR Minolta ,Colorimeter Japan-400 اندازه‌گیری شدند.

۸-۱-۲- تعیین مقدار ساکاروز پودر

ساکارز در واقع یک قند دی ساکارید متشکل از قند فروکتوز و گلوکوز است. برای اندازه‌گیری درصد ساکارز پودر عسل از روش لین آینون[1] استفاده شد. اساس روش لین اینون استفاده از محلول فهلینگ و احیاء مس دو ظرفیتی توسط قندهای کاهنده در حضور معرف متیلن بلو است. در این آزمایش محلول فهلینگ از مجموعه آزمایشگاهی آروین شیمی تهیه و درصد ساکارز (N) از طریق اندازه‌گیری انحراف نوری محلول به دست آمد (رابطه ۵). S و S_1 دو مقدار اندازه‌گیری شده هستند که به ترتیب مربوط به انحراف نوری محلول حاوی ساکارز و انحراف نوری محلول شاهد که آب مقطر بود، می‌باشند. اختلاف این دو مقدار، نشان‌دهنده تأثیر ساکارز بر انحراف نوری است.

$$N = (S - S_1) \times 0.95 \quad (۵)$$

۹-۱-۲- نسبت فروکتوز به گلوکز

قندهای فروکتوز و گلوکوز مهم‌ترین قندهای موجود در عسل هستند. در عسل طبیعی نسبت F/G معمولا بالای ۰/۹ می‌باشد. بر این اساس در پودر حاصل از آن نیز یکی از عامل‌های مهم بوده و طبق استاندارد ملی ایران INSO 92 این نسبت بین ۰/۹ تا ۱/۲ می‌باشد. طبق استاندارد ملی ۹۲ فروکتوز و گلوکز موجود در نمونه‌های پودر عسل از روابط (۶) و (۷) بدست آمد.

$$\text{گلوکز} = \frac{۲۵۰\times۰۱/۹\times D\times۱۰۰}{25\times W\times 1000} \quad (۶)$$

W= وزن یک گرم نمونه پودر عسل

D= تفاوت تیتراسیون تیوسولفات سدیم مصرفی نمونه و شاهد.

$$\text{مقدار فروکتوز} = \text{مقدار گلوکز} - \text{مقدار قندهای احیاکننده قبل از هیدرولیز} \quad (۷)$$

با محاسبه مقادیر گلوکز و فروکتوز، نسبت فروکتوز به گلوکز بدست آمد.

۱۰-۱-۲- اندازه‌گیری هیدروکسی‌متیل‌فورفورال (HMF)

طبق استاندارد ملی ایران ۹۲، HMF قابل قبول برای پودر عسل حداکثر ppm ۴۰ می‌باشد. دو روش کمی و کیفی برای اندازه‌گیری هیدروکسی متیل فورفورال وجود دارد. در روش کمی از تکنیک اسپکتروفتومتری و اندازه‌گیری جذب در دو طول موج ۳۳۶ و ۲۸۴ نانومتر استفاده می‌شود. در روش کیفی اساس آزمایش بر پایه رزورسینول HMF و ایجاد رنگ قرمز است. در این تحقیق طبق استاندارد ملی از روش تتراسیون استفاده شد.

۲-۲- طرح آماری

در این تحقیق برای تحلیل نتایج روش خشک کردن پاششی از روش سطح پاسخ با استفاده از طرح باکس بانکن صورت گرفت و سه متغیر مستقل دما در سه سطح ۱۲۰°C، ۱۵۰ و ۱۸۰، نسبت‌های مختلف مالتودکسترین در سه سطح ۱۵ و ۳۲/۵ و ۵۰ درصد و فشار اتمایزر در سه سطح ۰/۵، ۱ و ۱/۵ بار مورد بررسی قرار گرفت. برای هر یک از ویژگی‌های پودر حاصله تحلیل‌های آماری انجام گرفت.

[1] Lane-Eynon

جامعه آماری تحقیق حاضر، پودر عسل در روش خشک کردن پاششی ۱۷ نمونه از آن طبق تیمارهای جدول (۳) انتخاب شد و نمودارها با نرم‌افزار اکسل استات XLSTAT 2017 رسم شد.

جدول۳- متغیرهای مستقل طرح آزمایش

Table 3. Independent Variables of the Experimental Design

شماره آزمون	دمای هوای ورودی (°C)	فشار اتمایزر (مگاپاسکال)	درصد کمک خشک‌کن عسل (gr/L)
۱	۱۲۰	۱	۱۵
۲	۱۸۰	۱	۱۵
۳	۱۲۰	۱	۵۰
۴	۱۸۰	۱	۵۰
۵	۱۲۰	۰/۵	۳۲/۵
۶	۱۸۰	۰/۵	۳۲/۵
۷	۱۲۰	۱/۵	۳۲/۵
۸	۱۸۰	۱/۵	۳۲/۵
۹	۱۵۰	۰/۵	۱۵
۱۰	۱۵۰	۰/۵	۵۰
۱۱	۱۵۰	۱/۵	۱۵
۱۲	۱۵۰	۱/۵	۵۰
۱۳	۱۵۰	۱	۳۲/۵
۱۴	۱۵۰	۱	۳۲/۵
۱۵	۱۵۰	۱	۳۲/۵
۱۶	۱۵۰	۱	۳۲/۵
۱۷	۱۵۰	۱	۳۲/۵

۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی امکان تولید پودر عسل با روش خشک کردن پاششی، خواص فیزیکی پودر شامل درصد محتوای رطوبتی، فعالیت آبی، چگالی ذرات، رنگ و جریان پذیری پودر و خواص شیمیایی پودر شامل تعیین مقدار pH، تعیین ساکارز، نسبت فروکتوز به گلوکز و تعیین مقدار هیدروکسی متیل فورفورال HMF مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

۳-۱- تحلیل نتایج حاصل از خواص فیزیکوشیمیایی پودر عسل

تجزیه واریانس صفات فیزیکی پودر عسل تولید شده توسط دستگاه اسپری درایر در جدول (۴) و (۵) نشان داده شده است.

۳-۱-۱- اثرات اصلی

دما (A): در ۹ ویژگی از ۱۱ ویژگی، دما اثر معنی‌دار داشته و غالباً مهم‌ترین عامل تغییرات بوده است. دما به ویژه بر رطوبت، فعالیت‌آبی، چگالی، جریان‌پذیری، HMF و شاخص‌های رنگی بیشترین تأثیر را نشان داد. افزایش دما معمولاً منجر به کاهش رطوبت و فعالیت آبی، بهبود جریان‌پذیری، اما افزایش HMF و تغییر رنگ به سمت قرمز و زرد شد.

درصد مالتودکسترین(B): در بیشتر ویژگی‌ها به‌خصوص فعالیت آبی، pH، ساکارز، نسبت F/G و زردی اثر معنی‌دار داشته است.

فشار(C): فشار در چند ویژگی مانند فعالیت آبی و زردی اثر معنی‌دار داشت و در سایر ویژگی‌ها اثر مشخص و معناداری نشان نداد.

۳-۱-۲- اثرات متقابل

بیشتر اثرات متقابل AB، AC،BC معنادار نبودند و تأثیر عوامل مستقل بر ویژگی‌های مورد بررسی به صورت غالب، خطی و مستقل بوده است. با این حال، در برخی ویژگی‌ها مثل گرایش به زردی و HMF برخی تعاملات دوگانه معنی‌دار مشاهده شد که نشان‌دهنده اهمیت همزمان چند عامل در تغییر ویژگی است.

۳-۱-۳- اثرات درجه دوم[1]

در اغلب موارد، اثرات درجه دومA^2 ، B^2 و C^2 معنی‌دار نبودند که نشان می‌دهد روند تغییرات ویژگی‌ها، نسبتاً خطی یا نزدیک به خطی بوده است. این موضوع به سادگی مدل‌سازی و پیش‌بینی درست پاسخ‌ها کمک می‌کند.

۳-۱-۴- خطای برازش مدل[2]

در تمام مدل‌ها، خطای برازش مدل غیرمعنی‌دار بود ($p > 0.05$) که نشان می‌دهد مدل‌ها برازش خوبی با داده‌ها داشته و خطاهای باقی‌مانده تصادفی بوده‌اند.

۳-۲- تحلیل نتایج حاصل از خواص فیزیکی و شیمیایی پودر عسل از روش اسپری درایر

۳-۲-۱- رطوبت

با توجه به نتایج گزارش شده در پژوهش‌های (Nadeem *et al*, 2013) و (Tonon *et al*., 2010) نشان می‌دهند افزایش مواد کمک‌خشک‌کن مالتودکسترین در خشک‌کن پاششی به کاهش محتوای رطوبت پودر کمک شایانی می‌کند.

[1] Quadratic Effects

[2] Lack of Fit

جدول ۴- تجزیه واریانس صفات فیزیکی پودر عسل حاصل از روش پاششی

Table 4. ANOVA for the Physical Attributes of Spray-Dried Honey Powder

منابع تغییرات S.V	درجه آزادی DF	میانگین مربعات (MS)					
		محتوای رطوبت Moisture Content	فعالیت آبی Water Activity (aw)	چگالی Density	جریان پذیری Flowability	pH	درصد ساکارز Sucrose (٪)
مدل کلی	۹	۰/۵۹۵۵*	۰/۰۵۲۱**	۰/۰۰۱۷**	۱۰/۳۱*	۰/۰۰۲۹*	۰/۰۲۷۶**
دما(A)	۱	۳/۰۳**	۰/۲۱۰۱**	۰/۰۰۵۴**	۸۱/۹۲**	۰/۰۱۳۲**	۰/۰۰۲۵ns
درصد کمک خشک‌کن(B)	۱	۱/۶۶**	۰/۱۶۵۰**	۰/۰۰۹۲**	۵/۴۴ns	۰/۰۰۹۱**	۰/۲۶۲۸**
فشار اتمایزر(C)	۱	۰/۳۳۶۲*	۰/۰۸۷۵**	۰/۰۰۰۸*	۰/۰۸۰۰ns	۰/۰۰۱۳ns	۰/۰۰۰۲ns
دما * کمک خشک-کن(A*B)	۱	۰/۰۲۲۵ ns	۰/۰۰۱۶**	۰/۰۰۶۷ns	۰/۳۰۲۵ns	۰/۰۰۰۴ns	۰/۰۰۴۲ns
دما * فشار اتمایزر(A*C)	۱	۰/۰۰۶۴ ns	۰/۰۰۰۸ns	۰/۰۰۰۱ns	۳/۰۶ns	۰/۰۰۰۲ns	۰/۰۰۰۹ns
فشار *کمک خشک-کن(C*B)	۱	۰/۰۱۰۰ ns	۰/۰۰۰۵ns	۰/۰۰۰۶ns	۰/۲۰۲۵ns	۰/۰۰۰۲ns	۰/۰۰۱۶ns
توان دوم دما(A^2)	۱	۰/۲۲۳۷ *	۰/۰۰۱۳ns	۰/۰۲۰۳ns	۰/۰۰۱۳ns	۰/۰۰۰۵ns	۰/۰۰۳۴ns
توان دوم حامل(B^2)	۱	۰/۰۳۸۴ ns	۰/۰۰۰۲ns	۰/۰۰۰۲ns	۰/۵۶۸۷ns	۰/۰۰۰۶ns	۰/۰۰۰۲ns
توان دوم فشار(C^2)	۱	۰/۰۱۸۱ ns	۰/۰۰۱۹ns	۰/۰۰۰۶ns	۱/۱۳ns	۰/۰۰۰۶ns	۰/۰۰۲۲ns
خطا	۳	۰/۰۲۶۸ns	۰/۰۰۱۴ns	۰/۰۰۰۲ns	۲/۸۲ns	۰/۰۰۰۶ns	۰/۰۰۰۸ns
ضریب تغییرات (٪)	-	۶/۷۹	۲/۹۹	۲/۳۰	۵/۵۰	۰/۴۹۱۳	۲/۴۹
R^2	-	۰/۹۶۳۵	۰/۹۷۵۵	۰/۹۳۷۵	۰/۸۳۸۸	۰/۹۲۵۷	۰/۹۷۷۲

جدول ۵- تجزیه واریانس صفات شیمیایی پودر عسل حاصل از روش پاششی

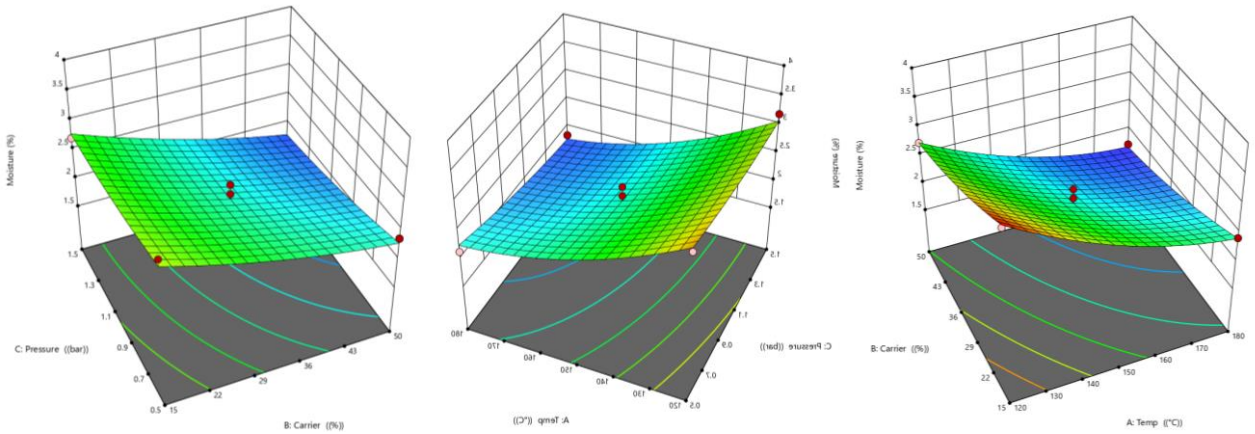
Table 5. ANOVA for the Chemical Attributes of Spray-Dried Honey Powder

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات (MS)				
		F/G	HMF	گرایش به زردی b*	گرایش به قرمزی-سبزی a*	روشنایی پودر L
مدل کلی	۱۰	۰/۰۱۱۷**	۷۵/۰۳**	۰/۱۸۹۸**	۰/۰۷۷۵**	۷/۶۳**
دما(A)	۱	۰/۰۱۹۶**	۲۸۰/۵۶**	۰/۰۴۰۰ ns	۰/۱۸۴۹**	۲۸/۰۹**
درصدکمک خشک‌کن(B)	۱	۰/۰۸۲۰**	۱۲/۰۰ ns	۱/۵۱**	۰/۰۱۰۵ ns	۵/۲۸**
فشار اتمایزر(C)	۱	۰/۰۰۰۳ ns	۰/۱۰۱۳ ns	۰/۰۲۷۶ ns	۰/۰۰۲۵ ns	۱/۳۶**
دما *کمک خشک‌کن(A*B)	۱	۰/۰۰۰۱ ns	۵/۲۹ ns	۰/۰۰۱۲ ns	۰/۰۱۵۶ ns	۰/۳۶۰۰*
دما * فشار اتمایزر(A*C)	۱	۰/۰۰۰۱ ns	۲۶/۵۲*	۰/۰۰۸۱ ns	۰/۰۰۰۱ ns	۰/۰۴۰۰ ns
فشار *کمک خشک‌کن(C*B	۱	۰/۰۰۰۱ ns	۲/۸۹ ns	۰/۱۹۸۰**	۰/۰۰۴۹ ns	۰/۰۲۲۵ ns
توان دوم دما(A^2)	۱	۰/۰۰۰۱ ns	۶/۳۴ ns	۰/۰۰۵۳ ns	۰/۰۰۶۷ ns	۰/۰۰۰۶ ns
توان دوم حامل(B^2)	۱	۰/۰۰۰۱ ns	۰/۲۵۷۹ ns	۰/۰۱۱۸ ns	۰/۰۰۶۸ ns	۰/۲۰۸۴ ns
توان دوم فشار(C^2)	۱	۰/۰۰۰۴ ns	۴/۸۴ ns	۰/۰۹۴۱ ns	۰/۰۰۳۱ ns	۰/۰۰۲۱ ns
دما * توان دوم حامل(A^*B^2)	۱	۰/۰۰۰۲ ns	۶/۳۰ ns	۰/۰۱۰۵ ns	۰/۰۴۶۵ ns	۰/۶۰۵۰**
خطا	۲	۰/۰۰۱۲ ns	۳/۴۵ ns	۰/۰۲۲۴ ns	۰/۰۰۴۴ ns	۰/۰۱۶۲ ns
ضریب تغییرات (٪)	-	۲/۵۹	۴/۲۵	۰/۹۲۶۶	۲/۶۱	۰/۲۸۴۲
R^2	-	۰/۹۶۹۰	۰/۹۶۷۳	۰/۹۳۷۳	۰/۹۳۸۳	۰/۹۹۶۶

**** معنی داری در سطح یک درصد * معنی داری در سطح ۵ درصد ns معنی دار نیست.**

تحلیل نمودارهای سه‌بعدی حاصل‌از دیزاین اکسپرت:

با افزایش دما و درصد مالتودکسترین، رطوبت پودر کاهش می‌یابد. کمترین رطوبت در دمای بالای ۱۶۰ درجه و ۵۰ درصد کمک‌خشک‌کن مشاهده شد. افزایش هم‌زمان دما و فشار اتمایزر منجر به کاهش رطوبت شد وکمترین رطوبت در حدود ۱۷۰–۱۸۰ درجه و فشار ۱/۵ بار به‌دست آمد. برای دستیابی به کمترین رطوبت نهایی زیر ۲ درصد در فرآیند، لازم است از دمای C ° ۱۷۰–۱۸۰ استفاده و حامل ۴۵–۵۰ درصد لحاظ شود. فشار اتمایزر نیز در بهترین حالت ۱/۵ بار تنظیم شود (شکل ۴).



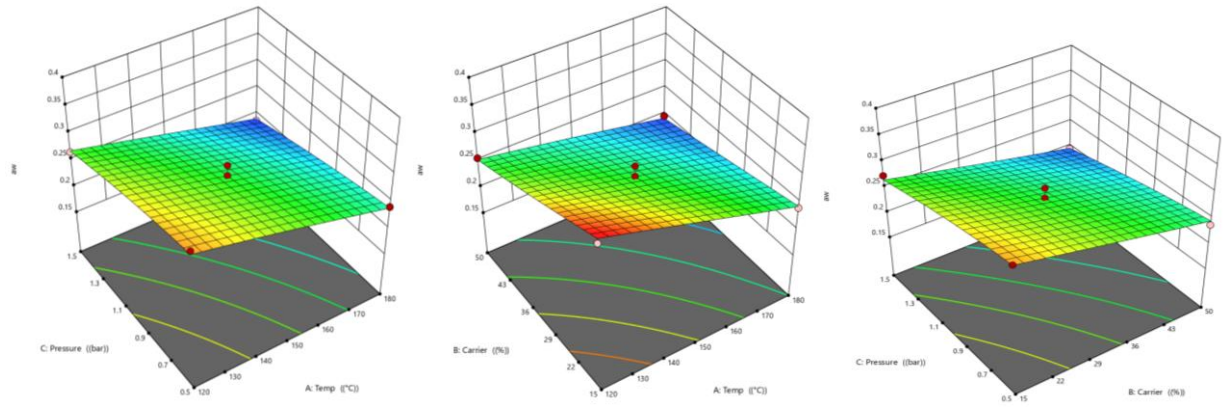
شکل ۴ - اثرات متقابل دوگانه متغیرهای مستقل بر رطوبت پودر عسل در روش پاششی

Fig 4. Three-Dimensional Moisture Response Surface Plots Generated by Design-Expert of Spray-Dried Honey Powder

۲-۲-۳- فعالیت آبی

افزایش درصد حامل در فرآیند پاششی منجر به کاهش فعالیت آبی پودر نهایی شده که به معنای افزایش پایداری میکروبی و شیمیایی محصول است. این موضوع با یافته‌های پژوهشگرانی چون (Jaya & Das, 2009) و (Quek *et al*, 2007) همسو می‌باشد. پایین بودن فعالیت آبی کمتر از ۰/۳ یک ویژگی مهم برای افزایش ماندگاری پودر و جلوگیری از واکنش‌های قهوه‌ای شدن و رشد میکروبی است.

افزایش دما و درصد حامل موجب کاهش معنی‌دار فعالیت آبی شد. کمترین فعالیت آبی در شرایط ۱۸۰°C و ۵۰ درصد مالتودکسترین حاصل شد. افزایش دما و فشار اتمایزر هر دو باعث کاهش فعالیت آبی گردید. افزایش هم‌زمان فشار اتمایزر و درصد حامل، فعالیت آبی را کاهش داد (شکل ۵). در مجموع کمترین مقدار فعالیت آبی در دمای ۱۸۰ درجه و فشار بالای ۱/۵ بار و کمک‌خشک‌کن ۵۰ درصدی حاصل شده است.



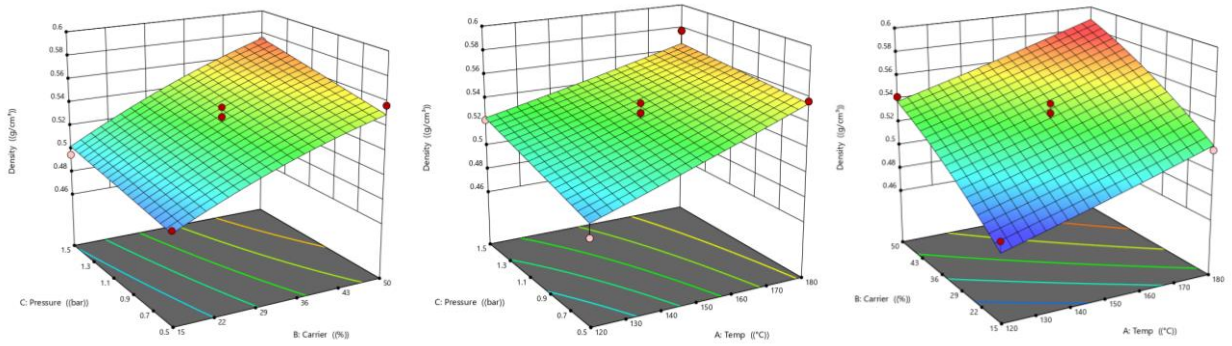
شکل ۵ - اثرات متقابل دوگانه متغیرهای مستقل بر فعالیت آبی پودر عسل در روش پاششی

Fig 5. Three-Dimensional Water Activity Response Surface Plots Generated by Design-Expert of Spray-Dried Honey Powder

۳-۲-۳- چگالی پودر

افزایش درصد حامل و دما در فرآیند اسپری‌درایر به وضوح باعث افزایش چگالی ظاهری پودر عسل می‌شود. این موضوع ناشی از فشردگی بیشتر ذرات، کاهش تخلخل داخلی و افزایش جرم ذرات در واحد حجم است. این نتایج با مطالعات (Tonon Silva *et al.*, 2006 and *et al*., 2009 هم‌راستا می‌باشد.

نتایج نشان دادند که افزایش دما و درصد حامل موجب بالا رفتن چگالی پودر شد و بیشترین مقدار خود را در شرایط دمای C ° ۱۸۰ ، ۵۰ درصد کمک‌خشک‌کن و فشار ۱/۵ بار نشان داد (شکل۶).



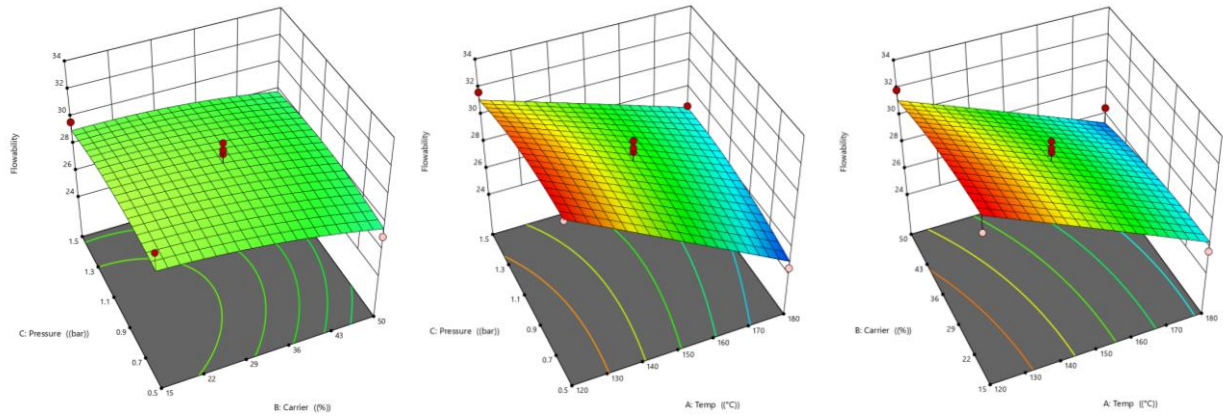
شکل ۶ – اثرات متقابل دوگانه متغیرهای مستقل بر چگالی پودر عسل در روش پاششی

Fig 6. Three-Dimensional Density Response Surface Plots Generated by Design-Expert of Spray-Dried Honey Powder

۴-۲-۳- جریان‌پذیری پودر

با افزایش درصد حامل و دما پودر تولیدشده دارای جریان‌پذیری بهتری خواهد بود. این موضوع از منظر فرآوری، انتقال، بسته‌بندی و مصرف نهایی بسیار مهم است. این یافته‌ها مطابق با نتایج پژوهشگرانی همچون (Jaya & Das, 2009) و همچنین (Fazaeli 2012) هم‌راستا می‌باشد. بر این اساس انتخاب درصد بالاتر حامل در اسپری‌درایر، نه تنها به کاهش رطوبت و فعالیت‌آبی کمک می‌کند، بلکه کیفیت فیزیکی و عملکردی پودر عسل از جمله جریان‌پذیری آن را بهبود می‌دهد.

افزایش دما و درصد حامل موجب بهبود جریان‌پذیری پودر شد. همچنین افزایش دما در بالاترین فشار اتمایزر جریان‌پذیری را بهبود بخشید. (شکل۷). بیشترین جریان‌پذیری در ۱۸۰ ، ۵۰ °C درصد حامل و فشار ۱/۵ bar بدست آمد.



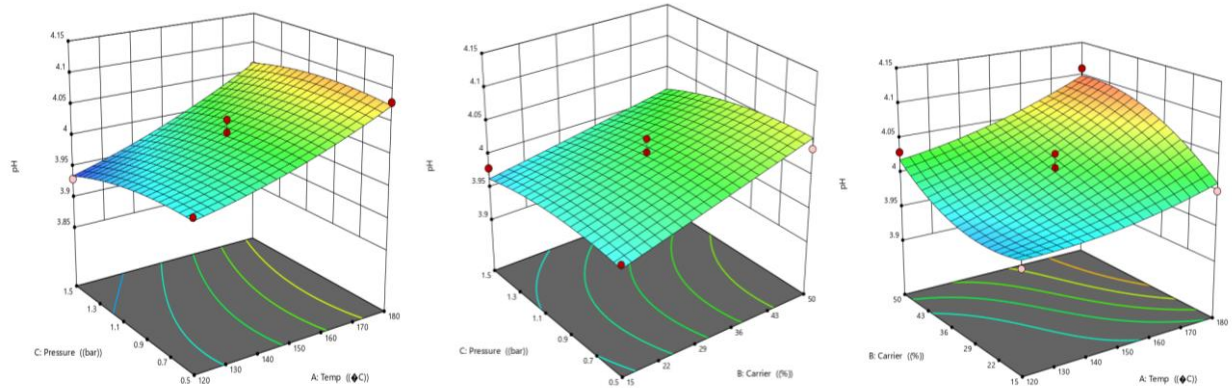
شکل ۷ – اثرات متقابل دوگانه متغیرهای مستقل بر جریان‌پذیری پودر عسل در روش پاششی

Fig 7. Three-Dimensional Flowability Response Surface Plots Generated by Design-Expert of Spray-Dried Honey Powder

۵-۲-۳- pH پودر

افزایش دما و مالتودکسترین باعث افزایش جزئی در pH نهایی پودر عسل می‌شود. این اثر بیشتر ناشی از رقیق‌سازی اسیدهای طبیعی عسل و افزایش ظرفیت بافری محیط پودری به واسطه مواد کمک‌خشک‌کن مالتودکسترین است. این نتایج با پژوهش (Nurhadi *et al.*, 2012) همراستا بوده و بر این اساس تاثیر افزایش دما و درصد حامل‌ها را بر افزایش pH پودر عسل نشان می‌دهد.

افزایش دما از ۱۲۰°C تا ۱۸۰ و بالا رفتن درصد مالتودکسترین موجب افزایش pH پودر شد. دمای بالا تبخیر را تسریع کرده و فشار بیشتر باعث تشکیل ذرات ریزتر و خشک‌تر می‌شود که ترکیبات با pH بالاتر را بهتر حفظ می‌کنند.۳- افزایش درصد مالتودکسترین و فشار اتمایزر به‌طور ملایم موجب افزایش pH شد. نتایج نشان داد که تمامی عوامل فرآیندی بررسی‌شده تأثیر معناداری بر مقدار pH پودر حاصل از خشک‌کن پاششی دارند. از بین این عوامل، دما ۱۸۰ °C بیشترین اثر را بر افزایش مقدار pH نشان داد (شکل۸).



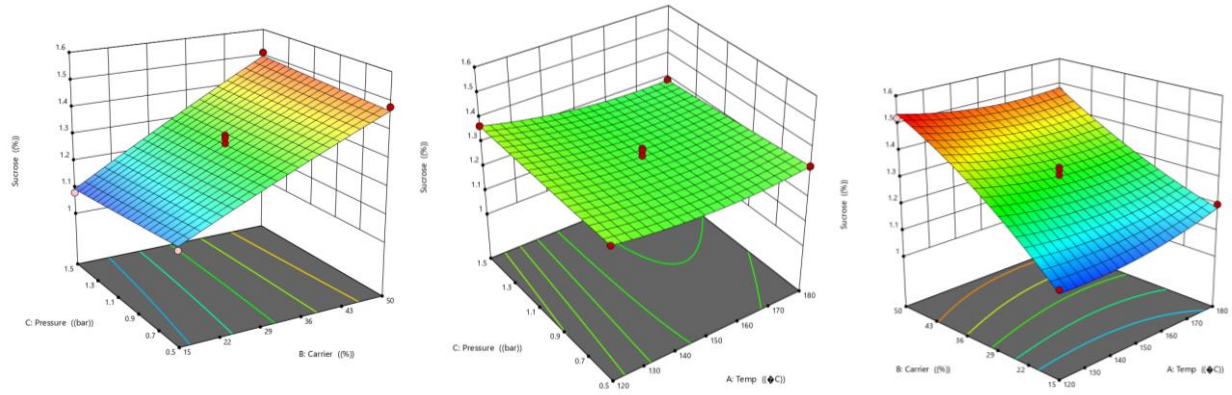
شکل ۸ - اثرات متقابل دوگانه متغیرهای مستقل بر PH پودر عسل در روش پاششی

Fig 8. Three-Dimensional PH Response Surface Plots Generated by Design-Expert of Spray-Dried Honey Powder

۶-۲-۳- مقدار ساکارز

با افزایش دما و درصد حامل مقدار ساکارز اندازه‌گیری‌شده در پودر عسل اندکی افزایش یافته است. این نشان‌دهنده‌ی حفظ بهتر ساختار ساکارز، کاهش واکنش‌های قهوه‌ای شدن و اختلاط بهتر ترکیبات در حضور مالتودکسترین می‌باشد. این یافته‌ها با مطالعات (Tonon *et al.*, 2010) هم‌راستا بوده و با استاندارد ملی ایران۹۲ نیز همخوانی دارد.

نتایج نشان داد با افزایش دما و درصد مالتودکسترین، مقدار ساکارز به‌طور معناداری افزایش یافت. بیشترین مقدار ساکارز در دمای ۱۸۰ °C ، ۵۰ درصد حامل و فشار ۱/۵ bar مشاهده شد که نشان‌دهنده بهینه بودن شرایط برای حفظ ساکارز است (شکل۹).



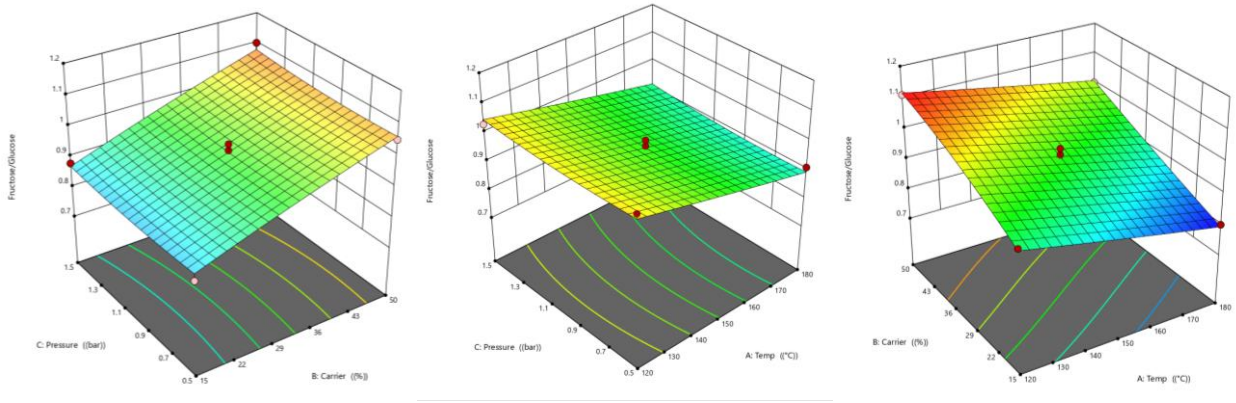
شکل ۹ - اثرات متقابل دوگانه متغیرهای مستقل بر ساکارز پودر عسل در روش پاششی

Fig 9. Three-Dimensional Sucrose Response Surface Plots Generated by Design-Expert of Spray-Dried Honey Powder

۷-۲-۳- نسبت فروکتوز به گلوگز(F/G)

افزایش ماده حامل و کاهش دما و فشار اتمایزر می‌تواند در پایداری ترکیبات قندی مؤثر واقع شود. نسبت F/G هرچه از ۱ بیشتر باشد، تمایل کمتری به کریستالیزاسیون یا تبلور دارد. نسبت کمتر از ۱ موجب تشکیل بلورهای گلوکز شده و کلوخه شدن پودر را به همراه دارد. در پودر حاصله بالا بودن این نسبت، ویژگی مطلوبی بوده و باعث حفظ بافت پودری، عدم تشکیل توده و افزایش ماندگاری محصول می‌شود. این موضوع با یافته (Mutlu.& Erbaş, 2020) همراستا بوده است.

افزایش دما از ۱۲۰ °C تا ۱۸۰ باعث کاهش نسبت F/G شد که نشان از تخریب حرارتی فروکتوز دارد. افزایش درصد حامل نقش حفاظتی مؤثری داشته و موجب افزایش F/G شده است. فشار اتمایزر بالا به دلیل پاشش ریزتر و تماس حرارتی مؤثرتر، منجر به کاهش F/G شده است (شکل۱۰).

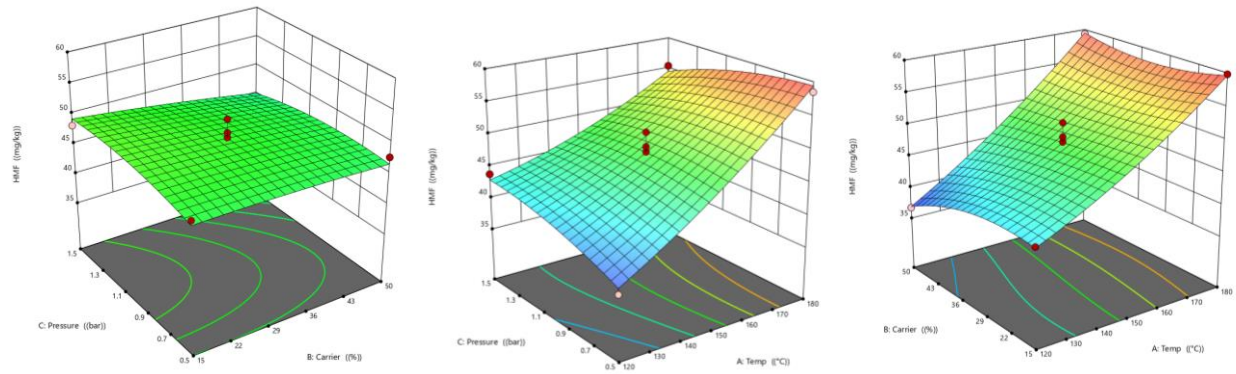


شکل ۱۰- اثرات متقابل دوگانه متغیرهای مستقل بر F/G پودر عسل در روش پاششی

Fig 10. Three-Dimensional F/G Response Surface Plots Generated by Design-Expert of Spray-Dried Honey Powder

۸-۲-۳- هیدروکسی متیل فورفورال(HMF)

افزایش دما یکی از عوامل مهم در افزایش HMF است. با افزودن مالتودکسترین و افزایش فشار، HMF پودر حاصله کنترل می‌شود. در یافته‌های (Berhe *et al.* 2018, (Gomes *et al.*, 2010) (Getachew *et al.* 2014) افزایش دما و درصد مالتودکسترین بالا، HMF را افزایش داده است. افزایش دما باعث افزایش HMF و در مقابل، افزایش درصد مالتودکسترین اثر حفاظتی داشته و با ایجاد محیطی پایدارتر، از تشکیل بیش از حد HMF جلوگیری می‌کند. فشار بالاتر اتمایزر (از ۰/۵ تا ۱/۵ bar) با تولید ذرات ریزتر و کاهش زمان ماند در دمای بالا، اثر کاهنده بر HMF دارد (شکل۱۱). در مجموع برای کنترل مقدار HMF در پودر عسل، باید از حرارت زیر $^{\circ}C$ ۱۵۰، ۵۰ درصد مالتودکسترین و فشار نازل bar ۱ به بالا استفاده شود.



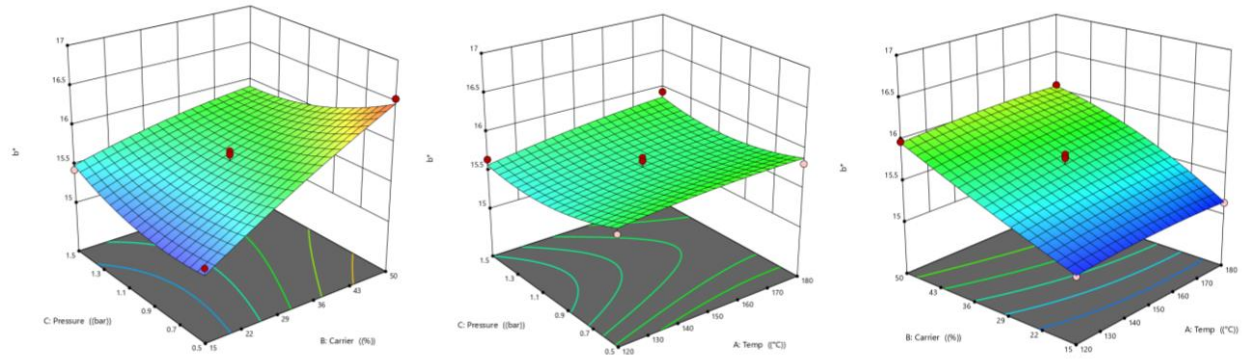
شکل ۱۱ - اثرات متقابل دوگانه متغیرهای مستقل بر HMF پودر عسل در روش پاششی

Fig 11. Three-Dimensional HMF Response Surface Plots Generated by Design-Expert of Spray-Dried Honey Powder

۹-۲-۳- رنگ پودر

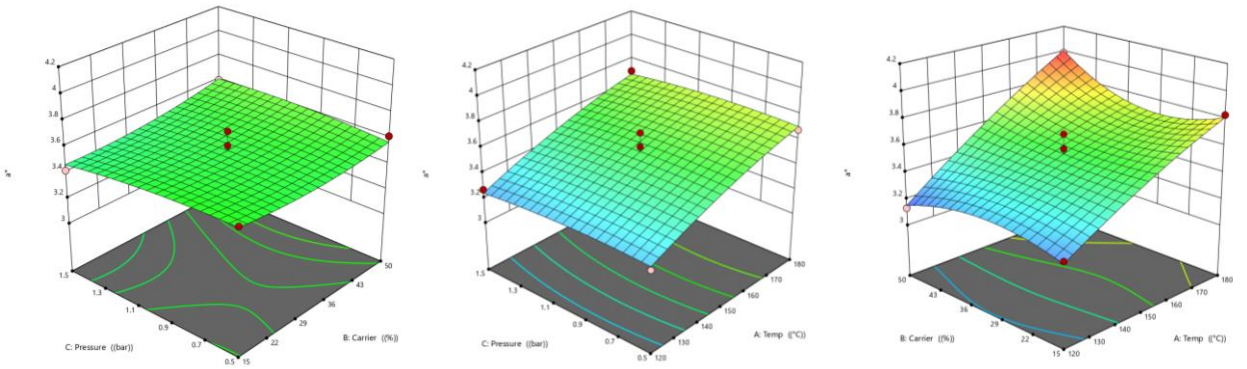
روند کاهشی پارامتر *b به معنای کاهش تمایل به قهوه‌ای‌شدن است که در راستای حفظ ظاهر محصول مفید است. همچنین با کاهش پارامتر *a رنگ قرمز پودرکاهش یافته که نشان از نزدیک شدن به رنگ زرد طبیعی عسل می‌باشد و روشنایی پودر از لحاظ ظاهری، تجاری و جذب مشتری اهمیت زیادی دارد. (Tonon *et al.*, 2010).

در مجموع، افزایش دما موجب کاهش گرایش به زردی (*b) در سطوح پایین مالتودکسترین شد، مقدار *b در پودر عسل تحت تأثیر شدید متقابل دما، درصد حامل و فشار قرار دارد. در نتیجه، فشار پایین‌تر از ۱ و دمای متوسط ۱۵۰ درجه سلسیوس با ۵۰ درصد ماده مالتودکسترین منجر به تولید پودر با زردی کنترل‌شده و طبیعی شد (شکل۱۲). به‌طور کلی، افزایش دما و درصد حامل موجب افزایش شاخص *a و گرایش پودر عسل به رنگ قرمز شد. فشار اتمایزر تأثیر کمتری بر شاخص *a داشت و تنها باعث بهبود یکنواختی ذرات و ثبات رنگ شد. دما عامل اصلی در افزایش قرمزی پودر و کمک‌خشک‌کن و فشار اتمایزر نقش تعدیل‌کننده و تقویت‌کننده دارد (شکل ۱۳).



شکل ۱۲ – اثرات متقابل دوگانه متغیرهای مستقل بر گرایش پودر عسل به زردی b^* در روش پاششی

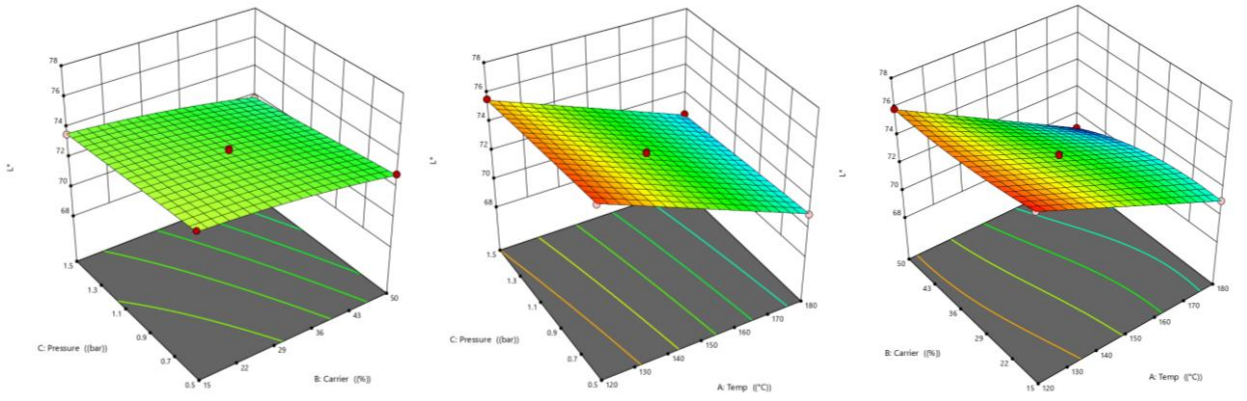
Fig 12. Three-Dimensional b* Response Surface Plots Generated by Design-Expert of Spray-Dried Honey Powder



شکل ۱۳ – اثرات متقابل دوگانه متغیرهای مستقل بر گرایش پودر عسل به قرمزی-سبزی a^*

Fig 13. Three-Dimensional a* Response Surface Plots Generated by Design-Expert of Spray-Dried Honey Powder

افزایش دما باعث کاهش مقدار L^* و در نتیجه تیره‌تر شدن رنگ پودر عسل شد، در حالی‌که افزایش مالتودکسترین موجب افزایش روشنایی و حفظ رنگ محصول گردید. افزایش فشار اتمایزر تأثیر منفی بر L^* داشت و موجب تراکم بیشتر ذرات و کاهش بازتاب نور شد. در مجموع، برای دستیابی به بیشترین روشنایی، دمای ^{o}C ۱۲۰، فشار bar ۰/۵ و ۵۰ درصد کمک‌خشک‌کن باید استفاده شود (شکل۱۴).



شکل ۱۴ – اثرات متقابل دوگانه متغیرهای مستقل بر روشنایی پودر عسل در روش پاششی

Fig 14. Three-Dimensional L* Response Surface Plots Generated by Design-Expert of Spray-Dried Honey Powder

۴- نتیجه‌گیری نهایی

در این پژوهش، روش خشک‌کردن اسپری‌درایر، با دمای ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ در سطوح مختلف مالتودکسترین (۱۵، ۳۲/۵ و ۵۰ درصد) و فشار اتمایزر ۰/۵، ۱ و ۱/۵ بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی پودر عسل ارزیابی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که هر سه عامل دما، فشار اتمایزر و درصد ماده کمک‌خشک‌کن (مالتودکسترین) تأثیر معناداری بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی پودر عسل حاصل از فرآیند خشک‌کردن پاششی دارند. در مطالعات پیشین (Tonon *et al*., 2010; Jaya &Das, 2009; Nurhadi *et al*., 2012) اثر دما و درصد حامل به‌طور گسترده بررسی شده بود اما در این تحقیق تأثیر فشار اتمایزر به عنوان یکی از متغیرهای کلیدی مورد ارزیابی قرار گرفت تا امکان تولید پودر عسل با کیفیت بالاتر و ویژگی‌های عملکردی بهینه فراهم گردد. یکی از نوآوری‌های اصلی این پژوهش، بررسی اثر فشار اتمایزر بر کیفیت پودر عسل بود؛ عاملی که در پژوهش‌های قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. افزایش فشار از ۰/۵ تا ۱/۵ بار موجب بهبود چشمگیر در فرآیند اتمایز، کاهش اندازه قطرات، تسریع تبخیر و بهبود یکنواختی ذرات شد. این امر در نهایت منجر به کاهش رطوبت و فعالیت آبی، بهبود جریان‌پذیری و کنترل واکنش‌های حرارتی گردید. با این حال، فشار بیش از حد بالا منجر به افزایش تماس حرارتی و تیره‌تر شدن محصول شد، بنابراین بهترین فشار حدود ۱ تا ۱/۵ بار پیشنهاد می‌شود. اثرات متقابل بین عوامل در اغلب ویژگی‌ها غیرمعنی‌دار بود و نشان داد که تغییرات هر عامل عمدتاً به صورت مستقل بر پاسخ‌ها اثر می‌گذارد. با این وجود، در شاخص‌های حساس نظیر HMF و شاخص رنگ a* و b*، تعامل بین دما و درصد حامل معنی‌دار بود که اهمیت هم‌زمان این دو متغیر را در کنترل واکنش‌های قهوه‌ای‌شدن و پایداری رنگ نشان می‌دهد. برازش مناسب مدل‌ها ($p>0.05$) در خطای مدل نشان‌دهنده صحت و دقت بالای مدل‌های آماری طراحی‌شده می‌باشد.

به‌طور کلی، بهترین شرایط فرآیند خشک‌کردن پاششی عسل در دمای ورودی ۱۷۰–۱۸۰ °C ، فشار اتمایزر ۱ تا ۱/۵ بار و درصد کمک‌خشک‌کن ۴۵–۵۰ درصد حاصل شد. در این شرایط، پودری با رطوبت زیر ۲ درصد، فعالیت آبی کمتر از ۰/۳، جریان‌پذیری بالا، روشنایی مطلوب و مقدار HMF پایین به‌دست آمد که با معیارهای استاندارد ملی ایران (شماره ۹۲) مطابقت داشت.

نتایج این تحقیق نشان داد که کنترل فشار اتمایزر به همراه کنترل شرایط دمایی و غلظت مالتودکسترین می‌تواند ابزاری مؤثر برای ارتقاء کیفیت، پایداری و ماندگاری پودر عسل باشد. از آن‌جا که فشار به‌عنوان یک عامل عملیاتی جدید در این پژوهش به‌صورت هدفمند وارد مدل شد، این یافته‌ها می‌تواند مبنای توسعه صنعتی و طراحی دقیق‌تر خشک‌کن‌های پاششی برای محصولات حساس قندی مانند عسل قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود بررسی مصرف انرژی فرآیند، آزمون‌های ماندگاری در طول زمان، ارزیابی حسی پودر عسل در کاربردهای واقعی (مثلاً در بیسکویت یا نوشیدنی)، یا تعمیم مدل به سایر حامل‌ها نیز برای بهبود هرچه بیشتر پودر عسل انجام گیرد.

منابع

Anonymous. (2015). *Agricultural Statistics of Iran*. General Office of Statistics and Information, Ministry of Agriculture Jihad.

AOAC. (2000). *Official methods of analysis*. Association of Official Analytical Chemists. 27 Arlington, VA, USA.

AOAC. (1995). *Official Methods of Analysis*, In K. Helrich (Ed.) Arlington, VA, USA. Association of official Analytical Chemists, Inc.

Bansal, V., Sharma, H. K., & Nanda, V. (2014). *Effect of honey additionon flowability and solubility of spray dried low fat milkpowder*. International Journal of Food Science and Technology, 49, 1196–1202.

Berhe, A., Tesfaye, E., & Terle, D. (2018). *Evaluation of physicochemical properties of honey bees (Apis mellifera) in Godere Woreda, Gambella, Ethiopia*. American Journal of Food Science and Technology, 6(1), 50-56.

Codex Stan (1981). *Codex Alimentarius Comission CAS/RvS 12/1969,* Recommended European Regional Standard for Honey, FAO/WHCXed., Rome. Codex Stan 12–1981, Rev.l (1987), Rev.2 (2001).

Codex Stan, (2001). *Harmonized Methods of the International honey commission*. 12-1981, Rev.1 (1987), Rev.2 (2001)

Codex Stan, (2000). *Honey quality methods of analysis and international regulatory standards review of the work of the international honey commission* –Swiss bee research center

Elmi A, Esmaiili M,. (2013). *Feasibility of production and investigation of physicochemical properties of dried honey using freeze drying and microwave drying methods*. J Food science and tech.; 10(41):p.117-124.

Fazaeli, M,. Djomeh, Z,. Ashtari, A,. Omid, M,. (2012). *Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder*. Food and Bioproducts Processing, Volume 90, Issue 4, Pages 667-675. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.04.006

Fan, Z., Shen, H., Hu, T., Yu, L., Xu, Y., Wu, J., ... & Yu, Y. (2024). *Effect of liquid nitrogen spray quick-freezing technology on the quality of bamboo shoots, Dendrocalamus brandisii from Yunnan Province, China*. Journal of Food Engineering, 368, 111916. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111916

Ganaie, T, A. Masoodi, F, A. Rather, S. Gani, A. (2021). *Exploiting maltodextrin and whey protein isolate macromolecules as carriers for the development of freeze-dried honey powder*. Journal of Carbohydrate Polymer Technologies and Applications 2. 100040. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100040

Getachew, A., Gizaw, H., Assefa, D., & Tajebe, Z. (2014). *Physico-chemical properties of honey produced in Masha, Gesha, and Sheko districts in Southwestern Ethiopia*. Current Research in Agricultural Sciences, 1(4), 110-116.

Gomes, S., Dias, L. G., Moreira, L. L., Rodrigues, P., & Estevinho, L. (2010). *Physicochemical, microbiological and antimicrobial properties of commercial honeys from Portugal*. Food and chemical toxicology, 48(2), 544-548. https://doi.org/10.1016/j.fct.2009.11.029

Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI). (2007). *Honey — Specifications and test methods (6th revision)*. National Standard of Iran No. 92. Tehran: ISIRI

Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI). (2013). *Honey — Microbiological specifications and test methods*. National Standard of Iran No. 7610. Tehran: ISIRI.

Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI). (2013). *Honey — Determination of sugars by gas chromatography*. National Standard of Iran No. 12187. Tehran: ISIRI.

Jaya, S., & Das, H. (2004). *Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and tricalcium phosphate on vacuum dried mango powder properties*. Journal of Food Engineering, 63, 125–134. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00135-3

Krishnamurthy, K., Khurana, HK., Soojin, J,Irudayaraj, J., Demirci, A. (2008). *Infrared Heating in Food Processing: An Overview.* Compr Rev Food Sci Food Safety 7:2-13. https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2007.00024.x

Mutlu, C. Koç, A. Erbaş, M. (2020). *Some physical properties and adsorption isotherms of vacuum-dried honey powder with different carrier materials*. LWT-Food Sci. Technol. 2020, 134, 110166. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110166

Nadali, N., Mirnajmi, R., Mirnajmi, B., Etemadiniya, H.. (2022). *Production of honey powder by spraying method and its use as a sugar substitute in cookie production*. The First National Congress on Confection and Chocolate. (In Persian).

Nadeem, H. S., Dinçer, C., Torun, M., Topuz, A., & Ozdemir, F. (2013). *Influence of inlet air temperature and carrier material on the production of instant soluble sage by spray drying*, LWT-Food Science and Technology, 52: 31-38. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.01.007

Nadeem, H. S., Torun, M., & Ozdemir, F. (2011*). Spray drying of the mountain tea water extract by using different hydrocolloid carriers*, LWT-Food Science and Technology, 44(7): 1626-1635. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.02.009

Nurhadi, B.; Maidannyk, V.A.; Djali, M.; Dwiyanti, E.H.; Editha, N.P.; Febrian, M. (2022). *Physical and*

functional properties ofagglomerated coconut sugar powder and honey powder polyvinylpyrrolidone as a binder. Int. J. Food Prop.,25, 93–104. https://doi.org/10.1080/10942912.2021.2023177

Nurhadi, B., & Roos, Y.H. (2016). *Dynamic Water Sorption for the Study of Amorphous Content of vacuum dried honey powder*. Journal of Powder Technology 301: 981-988. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.07.055

Nurhadi, B.; Andoyo, R.; Indiarto, R. (2012). *Study the Properties of Honey Powder Produced from Spray Drying and Vacuum Drying.* International Food Research Journal 19 (3): 849-854.

Quek, S. Y., Chok, N. K., & Swedlund, P. (2007). *The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders.* Chemical Engineering and Processing, 46, 386–392. https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.06.020

Qi Zheng, Xiaojie Wang, Yi Li , Huiping Fan, Zhen Li, Zhilu Ai, Yong Yang. (2024). *Effect of dried honey powder on the quality and flavor of Chinese steamed buns premicrofermented with Pediococcus pentosaceus.* Biao Suo, College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou, China. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115925

Samborska, K.; Jedli´nska, A.; Wiktor, A.; Derewiaka, D.; Wołosiak, R.; Matwijczuk, A.; Jamróz, W.; Skwarczy´nska-Maj.; et al. (2019). *The Effect of Low-Temperature Spray Drying with Dehumidified Air on Phenolic Compounds, Antioxidant Activity, and Aroma Compounds of Rapeseed Honey Powders*. Food Bioprocess Technol.12,pages 919–932. https://doi.org/10.1007/s11947-019-02260-8

Silva, M.A. Sobral, P.J.A., Kieckbusch., T.G. (2006). *State diagrams of freeze-dried camu–camu (*Myrciaria dubia *(HBK) Mc Vaugh) pulp with and without maltodextrin addition.* Journal of Food Engineering, 77(3), 426-432. . https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.07.009

Tonon, R., Brabet, C., Hubinger, M,. Baroni, A., Gibert, O,. Pallet, D,. (2009). *Water sorption and glass transition temperature of spray dried açai (Euterpe oleracea Mart.) juice.,* LWT-Food Engineering, Volume 94, Issue 3-4, Pages 215-221. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.03.009

Tonon, R.V.; Brabet, C.; Hubinger, M.D. (2010). *Anthocyanin stability and antioxidant activity of spray dried ac¸ai (Euterpe oleracea Mart.) juice powder produced with different carrier agents*. Int. Food Res. J., 43, 907–914. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.12.013

Vosoghi, M. Yousefi, S. Honarvar, M. (2025). *Physicochemical and sensory properties of honey powder from different climatic regions*. Applied Food Research 5 100843. https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100843