

Research Article

Optimization of Persian lime essential oil (*Citrus latifolia*) microencapsulation through spout fluidized bed drying

Azam Sharifpour¹, Somayeh Rahimi^{2*}, Majid Javanmard³, Alireza Bassiri⁴

1. Ph.D. Student of Food Technology, Department of Food Technology, Institute of Chemical Technologies, Iranian Research Organization for Science & Technology (IROST), Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of Food Technology, Institute of Chemical Technologies, Iranian Research Organization for Science & Technology (IROST), Tehran, Iran
3. Professor, Department of Food Technology, Institute of Chemical Technologies, Iranian Research Organization for Science & Technology (IROST), Tehran, Iran
4. Associate Professor, Department of Food Technology, Institute of Chemical Technologies, Iranian Research Organization for Science & Technology (IROST), Tehran, Iran

(Received: 2 February 2025, Revised: 9 March 2025, Accepted: 10 March 2025)

Abstract

Introduction: Citrus trees are widely cultivated for their fruits, leaves, and flowers, which have diverse applications in food, pharmacology, aromatherapy, and cosmetics. During fruit processing, peels are the primary waste byproduct, yet they are rich in essential oils with valuable uses in perfumery, pharmacology, aromatherapy, cosmetics, detergents, and food flavoring. This study focuses on extracting essential oil from Persian lime peels and microencapsulating it to enhance its stability and preserve its beneficial properties, including antioxidant activity, with a DPPH radical scavenging percentage of 63.64% in run 18.

Materials and Methods: Persian lime essential oil (PLEO) was used as the core material, with maltodextrin and whey protein as wall materials and microcrystalline cellulose as the carrier. The encapsulation process was optimized using a central composite design, evaluating three independent variables: EO concentration (10%, 20%, and 30% w/w), maltodextrin concentration (25%, 50%, and 75% w/w), and whey protein concentrate (10%, 20%, and 30% w/w). The dependent variables included encapsulation yield, efficiency, loading capacity, moisture content, hygroscopic properties, bulk density, tapped density, and particle density.

Results and Discussion: Based on numerical optimization, when EO, MD, and WPC were set at 29.68%, 41.28%, and 30%, respectively, the following values were obtained: encapsulation yield (66.46%), encapsulation efficiency (76.70%), loading capacity (64.7%), moisture content (1.83%), hygroscopicity (1.8%), bulk density (0.39 g/cm³), tapped density (0.43 g/cm³), particle density (1.28

* Corresponding author: s.rahimi@irost.ir

g/cm³), compressibility index (7.98%), Hausner ratio (1.08), powder recovery (66.94%), solubility (23.81%), inhibitory power (32.23%), and release rates in buffer (65.4%) and simulated saliva (92.74%), with an overall desirability of 0.492. The results indicated that high EO and WPC concentrations, combined with moderate MD levels, improved encapsulation efficiency, yield, density parameters, flowability, solubility, inhibitory power, and release rates while reducing moisture content and hygroscopic properties.

Conclusion: The combination of moderate maltodextrin and high whey protein concentrate effectively preserved the antioxidant activity of PLEO by enhancing entrapment efficiency. Maltodextrin served as an effective carrier for producing powders with desirable properties, while whey protein concentrates significantly influenced the release of the encapsulated core. The selection of appropriate wall materials and the use of an efficient drying technique, such as spout fluidized bed drying, can facilitate the production of microencapsulated powders containing volatile flavors and essential oils.

Keywords: Persian lime essential oil, Microencapsulation, Spout fluidized bed drying, Release in saliva.

How to cite this article:

Sharifpour, A., Rahimi, S., Javanmard, M., Bassiri, A. (2025). Optimization of persian lime essential oil (*Citrus latifolia*) microencapsulation through spout fluidized bed drying., *Innov. Food Technol.*, 12 (2), 136-162. <https://doi.org/10.22104/IFT.2025.7377.2198>

مقاله پژوهشی

بهینه سازی ریزدرون پوشانی اسانس لیموترش ایرانی (*Citrus latifolia*) به روش خشک کن بستر شناور

اعظم شریف پور^۱، سمیه رحیمی^{۲*}، مجید جوانمرد^۳، علیرضا بصیری^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه صنایع غذایی و تبدیلی، پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران
۲. استادیار، گروه صنایع غذایی و تبدیلی، پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران (IROST)، تهران، ایران
۳. استاد، گروه صنایع غذایی و تبدیلی، پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران (IROST)، تهران، ایران
۴. دانشیار، گروه صنایع غذایی و تبدیلی، پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران (IROST)، تهران، ایران

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰)

چکیده

امروزه در صنعت غذا درون پوشانی به کمک خشک کن بستر شناور، به دلیل اثرات محافظتی آن از مواد روغنی حساس، مانند اسانس‌ها، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق، اسانس لیموترش ایرانی در نسبت‌های (۱۰، ۲۰ و ۳۰٪) با استفاده از مواد دیواره‌ای شامل مالتودکسترین (۲۵، ۵۰ و ۷۵٪) و کنسانتره پروتئین آب پنیر (۱۰، ۲۰ و ۳۰٪)، به روش خشک کن بستر شناور ریزپوشانی شد. سپس با استفاده از روش سطح پاسخ، بازده درون پوشانی، کارایی درون پوشانی، محتوای رطوبت، خواص رطوبت پذیری، چگالی ظاهری، چگالی ضربه‌ای، چگالی ذره، شاخص جریان پذیری، پیوستگی، تخلخل، حلالیت، قدرت بازدارندگی و رهایش در بافر و بزاق شبیه سازی شده بهینه شدند. نتایج نشان دادند که غلظت بالای اسانس و کنسانتره پروتئین آب پنیر و غلظت متوسط مالتودکسترین، منجر به افزایش بازده درون پوشانی، کارایی درون پوشانی، چگالی ظاهری، چگالی ضربه‌ای، چگالی ذره، شاخص جریان پذیری، حلالیت، قدرت بازدارندگی و رهایش و کاهش محتوای رطوبت، خواص رطوبت پذیری و تخلخل شدند. بهینه یابی متغیرهای وابسته و مستقل نیز نشان داد که غلظت متوسط (مالتودکسترین) و بالای (کنسانتره پروتئین آب پنیر)، ترکیبات دیواره‌ای و همچنین غلظت بالای هسته برای رسیدن به خواص بهینه مورد انتظار از ریزپوشینه نهایی (نظیر فعالیت آنتی اکسیدانی بالا و محتوای رطوبت پایین)، ضروری است. بر اساس نتایج به دست آمده، شرایط بهینه شامل استفاده از اسانس لیموترش، مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب پنیر، به ترتیب به میزان ۲۹/۶۸٪، ۴۱/۲۸٪ و ۳۰٪ بود. از آن جاکه ریزدرون-پوشانی با خشک کن بستر شناور، امکان ریزدرون پوشانی در دمای پایین را ممکن می سازد، لذا به خوبی توانست در این تحقیق با حفظ خواص آنتی اکسیدانی اسانس لیمو (با درصد مهار رادیکال DPPH ۶۳/۶۴٪ در نمونه ۱۸)، فراوری آن را ممکن سازد.

واژه‌های کلیدی: اسانس لیموترش ایرانی، ریزدرون پوشانی، خشک کن بستر شناور، رهایش در بزاق

*نویسنده مسئول: s.rahimi@irost.ir

۱. مقدمه

در سراسر جهان، کشت درختان مرکبات به منظور بهره‌مندی از میوه، برگ‌ها و گل‌ها که می‌توانند در صنایع غذایی، داروسازی، رایحه‌درمانی و صنایع آرایشی به کار روند، اهمیت به‌سزایی دارد [۱-۲]. پوست مرکبات در صنایع غذایی، طی تولید فرآورده‌هایی همچون آب‌میوه، مربا، مارمالاد و غیره، دورریز می‌شوند [۳-۴]؛ اما درواقع پوست این نوع میوه‌ها به‌عنوان محصولات جانبی بخش کشت و صنعت، سرشار از انواع اسانس‌ها هستند که کاربردهای فراوانی در صنعت عطرسازی، داروسازی، رایحه‌درمانی، صنایع آرایشی و بهداشتی، تولید مواد شوینده و طعم‌دهنده‌های غذایی دارند [۲، ۵]. از سوی دیگر، اسانس‌ها به‌عنوان ترکیبات ضد میکروبی و آنتی‌اکسیدانی شناخته شده‌اند که می‌توانند ارتقادهنده سلامتی باشند. امروزه تحقیقات چشمگیری پیرامون استفاده از اسانس حاصل از بخش‌های مختلف گیاهان انجام شده و آن‌ها را به‌عنوان یک ماده نگه‌دارنده طبیعی که می‌توانند جایگزین مناسبی برای نمونه مصنوعی خود باشند، معرفی کرده است [۶، ۹].

لیموترش ایرانی با نام علمی *Citrus latifolia* از خانواده Rutaceae بوده که به‌طور گسترده در کشورهای گرمسیری مانند ایران، برزیل، هندوستان و چین کشت می‌شود. کل تولید این نوع لیموترش در جهان، به بیش از ۲۰ میلیون تن در سال ۲۰۱۹ رسیده و در کنار پرتقال، گریپ‌فروت و نارنگی به یکی از گونه‌های مهم مرکبات تبدیل شده است [۱۰-۱۱]. علاوه بر این، بقایای پس از برداشت و فراوری میوه، مانند پوست و دانه‌های آن نیز به‌عنوان یک ماده اولیه مهم برای استخراج اسانس، با هدف کاهش مشکلات زیست‌محیطی مربوط به ضایعات کشاورزی استفاده می‌شوند [۱۲]. روش استخراج اسانس موجود در پوست لیموترش شامل پرس سرد، تقطیر مداوم با بخار و یا استخراج به کمک سیال فوق بحرانی CO₂ است که منجر به تولید اسانس با محتوای قابل توجهی از لیمونن، لینالول، بتاپینن، میرسن و گاماترپینن می‌شود که دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی، ضد میکروبی و ضدتوموری شناخته شده هستند [۱۳]. با وجود اثرات ارزشمند و سلامتی بخش اسانس پوست

لیموترش، استفاده از آن به‌شدت تحت تأثیر شرایط محیطی نامطلوب، به‌ویژه دمای بالا، نور و اکسیژن قرار می‌گیرد که موجب تخریب ۹۰٪ ترکیبات فرّار آن می‌شود [۱۴]. اسانس پوست مرکبات دارای ترکیب فرّار دی-لیمونن با فراریت بالاست و در برابر شرایط نامطلوب محیطی تخریب می‌شوند که استفاده از آن‌ها را به‌ویژه در کاربردهای غذایی محدود می‌کند [۱۴-۱۶].

درون پوشانی روشی است که طی آن، دیواره‌ای در اطراف قطرات اسانس، به‌عنوان هسته تشکیل می‌شود و درنتیجه، فراریت اسانس کاهش یافته و پایداری شیمیایی آن طی نگهداری افزایش می‌یابد [۱۷-۲۰]. تاکنون، روش‌های درون پوشانی مختلفی ارائه شده‌اند که برخی از آنها صنعتی یا نیمه‌صنعتی هستند [۱۸]. روش‌هایی که به‌طور گسترده در درون پوشانی مواد غذایی یا مواد دارویی استفاده می‌شوند، شامل خشک کردن پاششی، انجمادی و بستر شناور هستند. خشک کردن پاششی می‌تواند منجر به درون پوشانی ناقص شده که طی آن، دیواره‌های نازک ایجاد شده، امکان ورود اکسیژن را به ترکیبات محصور شده می‌دهند [۲۱]. همچنین، به‌دلیل دمای بالای اعمال شده در حین فرایند خشک کردن پاششی، تخریب حرارتی گسترده‌ای رخ می‌دهد [۲۱-۲۲]. خشک کردن انجمادی نیز می‌تواند روش مناسبی برای درون پوشانی ترکیبات حساس به حرارت باشد ولی زمان طولانی فرایند (۲۴-۴۸ ساعت) و هزینه بالا، ازجمله معایب این روش هستند که مانعی برای مصارف صنعتی آن است [۱۸]. خشک کردن بستر شناور به‌عنوان یک تکنیک انعطاف‌پذیر شناخته شده است که طراحی هدفمند فرآورده را از طریق تغییر پارامترهای مختلف مرتبط، با فرایند امکان‌پذیر می‌کند. به‌عبارت دیگر، انتخاب پارامترهای مهم فرایند (به‌عنوان مثال، سرعت هوای ورودی، دما و موقعیت نازل‌ها) می‌تواند بر رشد ذرات، تخلخل و توزیع اجزای فرآورده نهایی تأثیر بگذارد [۲۱]. پودرهای درون پوشانی شده به روش خشک کن بستر شناور، ویژگی‌های نهایی برتری همچون جریان‌پذیری، ترشوندگی و پراکندگی در آب را در مقایسه با پودرهای تهیه شده به روش خشک کن پاششی نشان می‌دهند؛ علاوه بر این، خشک کن بستر شناور، به‌دلیل

محصول کردن کامل لیپیدها، روغن ها و آروماهای حساس، دستیابی به پودرهایی با کیفیت بالا را از نظر پایداری به اکسیداسیون فراهم می سازد [۲۱]. از خشک کن بستر شناور به طور کلی برای پوشش ذرات با هسته مرکزی جامد استفاده می شود. در این فرایند، ذرات جامد درون محفظه دستگاه معلق و ترکیبات دیواره ای مایع برای تشکیل پوشش، اسپری می شوند. در مطالعه ای گزارش شد که درون پوشانی اسانس های پرتقال با روش خشک کن بستر شناور در مقایسه با روش خشک کن پاششی، حفاظت بهتری (۹۴٪) در روش خشک کن بستر شناور در مقابل (۷۰٪) در خشک کن پاششی را برای اسانس ها فراهم آورد [۲۳-۲۴].

تاکنون از روش بستر شناور جهت درون پوشانی ترکیبات مختلفی استفاده شده است. محققان در سال (۲۰۱۹) به بررسی امکان استفاده از فناوری بستر شناور برای پوشش دهی عصاره رزماری بر روی هسته های میکروکریستالین سلولز پرداختند. مطابق با نتایج آن ها، راندمان پوشش دهی از ۶۴/۳ تا ۷۹/۲٪ متغیر بود [۲۵]. در پژوهش دیگری، از خشک کن بستر شناور جهت خشک کردن عصاره چای سبز (*Camellia sinensis*) استفاده شد. نمونه پودر بهینه با غلظت بالایی از کاتچین در دمای ۱۱۰ °C و با ذرات تفلون به عنوان ماده خنثی حاصل شد. این فرایند خشک کردن منجر به حداقل تلفات ترکیبات زیست فعال و حفظ خاصیت آنتی اکسیدانی قوی عصاره شد [۲۶]. محققان در سال ۲۰۲۰، موفق به درون پوشانی باکتری *Lactobacillus reuteri* با استفاده از پوشش دو لایه آلژینات سدیم ۱٪ (لایه اول) و کیتوزان ۱٪ (لایه دوم) با استفاده از سیستم خشک کن بستر شناور شدند. این درون پوشینه ها بالاترین بقای نسبی باکتری (۱۱/۱٪) را پس از ۱ ساعت در شرایط شبیه سازی شده معده (pH=۲) نشان دادند [۲۲]. Jayatunga و Amarasinghe (۲۰۲۳) از خشک کن بستر شناور، جهت خشک کردن فلفل سیاه استفاده کرده و نشان دادند که مقادیر بالاتر سرعت خشک کردن زمانی به دست آمد که خشک کن با دمای متوسط بالا و نرخ جریان هوا بالا کار کند. آنها دریافتند که ۶۵ °C بهترین دما برای خشک کردن فلفل سیاه در خشک کن بستر شناور به منظور به دست آوردن

بالاترین راندمان حفظ اسانس فلفل سیاه است [۲۷]. طبق مطالعه ای در سال ۲۰۲۴، در پی خشک کردن عصاره خام پوست درخت گیلاس برزیلی (*Hymenaea. courbaril*) گزارش شد که غلظت های بالای اسانس در عصاره می تواند منجر به چسبندگی مواد به دیواره خشک کن و افزایش تجمع و شکست احتمالی فرایند شود؛ بنابراین، تحقیق و مطالعه برای بهینه سازی فرایندهای خشک کن بستر شناور، همراه با اثرات ترکیبی عصاره ها و مخلوط آنها با مواد افزودنی برای درون پوشانی ضروری است [۲۸]. در پژوهش مشابه قبلی شریف پور و همکاران (۲۰۲۴)، به درون پوشانی اسانس پوست نارنج با استفاده از خشک کن بستر شناور پرداختند. طی این پژوهش بهترین نتایج در غلظت بهینه اسانس نارنج ۵۳٪/۳۴ و غلظت های دیواره ای ۱۱/۹۸٪ مالتودکسترین به عنوان لایه اول و ۲۳/۲۶٪ کنسانتره آب پنیر به عنوان دیواره ای دوم به دست آمد [۲۹].

هدف از مطالعه حاضر، بهینه سازی درون پوشانی اسانس لیموترش ایرانی به روش خشک کن بستر شناور بود که طبق بررسی های انجام شده تا کنون مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این مطالعه از میکروکریستالین سلولز به عنوان هسته جامد و ترکیب مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب پنیر به عنوان مواد دیواره ای استفاده شد.

۲. مواد و روش ها

۲.۱. مواد

اسانس لیموترش ایرانی حاصل از روش تقطیر با آب، از ضایعات خشک شده لیموترش توسط شرکت پارس اکسیر آرون تهیه شد. میکروکریستالین سلولز (MCC (ph-200)، مالتودکسترین (DE<20)، کنسانتره پروتئین آب پنیر (پروتئین: ۸۰٪، چربی: ۶٪، لاکتوز: ۷٪، خاکستر: ۳٪ و رطوبت: ۴٪) و توئین ۸۰ (HLB12) از شرکت Sigma-Aldrich (USA) خریداری شدند. لازم به توضیح است که تمام مواد شیمیایی مورد استفاده با درجه خلوص آزمایشگاهی بودند.

میلی لیتر از امولسیون تهیه شده در مرحله قبل، در فضای خشک کن اسپری شد. سپس مالتودکسترین در غلظت های ذکر شده اضافه و فرایند خشک کردن حدود ۱۵ دقیقه به طول انجامید. برای نهایی کردن فرایند درون پوشانی، کنسانتره پروتئین آب پنیر نیز اضافه شد و پس از خشک شدن، پودر به دست آمده جمع آوری شد. پودر ریز پوشانی شده به ظروف تیره نفوذناپذیر نسبت به اکسیژن و رطوبت منتقل و در دمای ۴ °C نگهداری شد.

۲.۴.۲. ارزیابی ویژگی های پودر ریز پوشانی شده

۲.۴.۲.۱. بازده درون پوشانی

بازده درون پوشانی بر اساس رابطه بین وزن کل پودر جمع آوری شده (Wp) و وزن مواد دیواره ای (Ww) که در ابتدا ترکیب شده بودند، مطابق با رابطه ۱ تعیین شد [۳۰، ۱۸].

$$(EY\%) = \frac{Wp(g)}{Ww(g)} \times 100 \quad (1)$$

۲.۴.۲.۲. کارایی درون پوشانی و ظرفیت بارگذاری

کارایی درون پوشانی و ظرفیت بارگذاری بر اساس روش اسپکتروفتومتری در محدوده UV در طول موج ۲۷۳ نانومتر طبق روش جعفری و همکاران (۲۰۰۸)، به ترتیب توسط رابطه های ۲ و ۳ تعیین شد [۳۱].

$$(EE\%) = \frac{M \text{ loaded } EOs(g)}{M \text{ initial } EOs(g)} \times 100 \quad (2)$$

در این فرمول، EE راندمان درون پوشانی، M loaded EOs وزن اسانس درون پوشانی شده و M initial EOs وزن اسانس اولیه است.

$$(LC\%) = \frac{M \text{ loaded } EOs(g)}{Mp(g)} \times 100 \quad (3)$$

در رابطه فوق، LC ظرفیت بارگذاری اسانس، M loaded EOs وزن اسانس درون پوشانی شده و Mp وزن ذرات پودر درون پوشانی شده است.

۲.۲. طراحی آزمایشات و بهینه سازی

درون پوشانی اسانس لیموترش با در نظر گرفتن سه متغیر مستقل، شامل غلظت اسانس (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی/وزنی)، غلظت مالتودکسترین (۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد وزنی/وزنی) و کنسانتره پروتئین آب پنیر (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی/وزنی)، با استفاده از طراحی مرکب مرکزی بهینه شد (جدول ۱). پاسخ ها شامل کارایی درون پوشانی (EE)، بازده درون پوشانی (EY)، ظرفیت بارگذاری (LC)، محتوای رطوبت (MC)، خاصیت رطوبت پذیری (HG)، چگالی ظاهری (BD)، چگالی ضربه ای (TD)، چگالی ذره ای (PD)، تخلخل (PR)، جریان پذیری (FI)، شاخص Carr (CI)، نسبت هازنر (HR)، حلالیت (SO)، قدرت بازدارندگی (IP)، رهایش در بافر (REL1) و رهایش در بزاق (REL2) بودند. شرایط بهینه براساس دستیابی به بالاترین مقادیر رهایش، کارایی درون پوشانی، بازده درون پوشانی، ظرفیت بارگذاری، چگالی ظاهری، چگالی ضربه ای، چگالی ذره ای، حلالیت، قدرت بازدارندگی و کمترین مقادیر محتوای رطوبت، خاصیت هیگروسکوپ و تخلخل تعیین شدند. شاخص Carr و نسبت هازنر در محدوده در نظر گرفته شدند.

۳.۲. درون پوشانی اسانس لیموترش

درون پوشانی اسانس لیموترش بر اساس روش Velázquez-Contreras و همکاران (۲۰۱۴) و همچنین Zaghari و همکاران (۲۰۲۰) با برخی تغییرات انجام شد [۲۲، ۲۳]. در ابتدا با اختلاط اسانس لیموترش و آب مقطر حاوی ۰/۲٪ توئین ۸۰ و همگن ساختن آن توسط اولتراتوراکس (توان خروجی: ۷۵ وات) به مدت ۵ دقیقه با شدت ۱۳۰۰۰ دور بر دقیقه، امولسیون ها تهیه شدند. از میکرو کریستالین سلولز، با پتانسیل شناور سازی و پخش بالا، به عنوان یک بستر خنثی استفاده شد. بدین ترتیب، ۱۰ گرم میکرو کریستالین سلولز به خشک کن بستر شناور (محفظه شیشه ای مخروطی شکل به طول ۶۰ سانتی متر با قطر کوچک ۱۰ و قطر بزرگ ۲۰ سانتی متر متصل به استوانه استیل ۱ متری، توان هیتر: ۱/۵ کیلووات، فشار نازل: ۴ بار، قطر نازل ۳۰ میکرومتر) اضافه و پس از ۵ دقیقه (رسیدن به دمای ۵۰ درجه سانتی گراد)، ۱۰

۳.۴.۲. محتوای رطوبت

محتوای رطوبت پودرهای حاصل با خشک کردن در آون تحت خلاء (دمای ۷۰ °C و فشار زیر ۷ kPa) تا رسیدن به وزن ثابت مشخص شد [۳۲].

۴.۴.۲. خاصیت رطوبت پذیری

خاصیت رطوبت پذیری پودرهای درون پوشانی شده (HG%) بر اساس روش Rezende و همکاران (۲۰۱۸) به مدت هفت روز در مجاورت سدیم کلرید اشباع در دمای ۲۵ °C با تقسیم وزن رطوبت جذب شده به وزن نمونه بر حسب گرم با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد [۳۳]:

$$(HG\%) = \frac{\text{Adsorbed moisture (g)}}{\text{Sample weight (g)}} \times 100 \quad (۴)$$

۵.۴.۲. چگالی ظاهری

چگالی ظاهری^۱ (BD یا ρ_B) پودرهای حاصل بر اساس روش Oliveira و Benelli (۲۰۱۹) با نسبت وزن به حجم دو گرم پودر در یک استوانه ۱۰ میلی لیتری تعیین شد [۲۵].

۶.۴.۲. چگالی ضربه ای

چگالی ضربه ای^۲ (TD یا ρ_T) بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب، بر اساس روش Oliveira و Benelli (۲۰۱۹) با نسبت وزن نمونه (گرم) بر حجم نمونه (سانتی متر مکعب) پس از ضربه، تعیین شد. به این منظور، دو گرم پودر در یک استوانه ۱۰ میلی لیتری وزن شده و سپس از فاصله ۲۰ سانتی متری بر سطحی چرمی، ۱۰۰ ضربه زده و حجم نهایی قرائت شد [۲۵].

۷.۴.۲. چگالی ذره

چگالی ذره^۳ (PD یا ρ_P) پودر بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب بر اساس روش Santhalakshmy و همکاران (۲۰۱۵) اندازه گیری شد [۳۴].

۲.۴.۸. تخلخل و قابلیت جریان پذیری (شاخص

(Carr

تخلخل نمونه پودری با استفاده از چگالی ذره و ضربه ای بر اساس رابطه ۵ تعیین شد. همچنین، جریان پذیری به عنوان شاخص Carr بر حسب چگالی ذره و ضربه ای بر اساس رابطه ۶ محاسبه شد [۳۴]:

$$PR, \varepsilon = \frac{\rho_P - \rho_T}{\rho_P} \times 100 \quad (۵)$$

$$CI = \frac{\rho_T - \rho_B}{\rho_T} \times 100 \quad (۶)$$

۲.۴.۹. انسجام (نسبت هازنر)

انسجام پودر تولید شده بر حسب نسبت هازنر (HR)، به دست آمده از چگالی ذره و ضربه ای بر اساس معادله ۷ ارزیابی شد [۳۴]:

$$HR = \frac{\rho_T}{\rho_B} \quad (۷)$$

۲.۴.۱۰. انحلال پذیری

انحلال پودر حاصل مطابق با روش Santhalakshmy و همکاران (۲۰۱۵)، از طریق اختلاف وزن پودر حل شده در آب پس از خشک شدن در آون و وزن اولیه پودر (%) مشخص شد [۳۴].

۲.۴.۱۱. قدرت مهار رادیکال آزاد DPPH

برای تعیین فعالیت آنتی اکسیدانی از روش اسپکتروفتومتری استفاده شد که بدین منظور، درصد قدرت مهار رادیکال های DPPH برای پودرهای درون پوشانی شده ارزیابی شد [۳۵].

۲.۴.۱۲. رهائش در شرایط آزمایشگاهی در بافر و بزاق

رهائش اسانس در شرایط آزمایشگاهی، به روش اسپکتروفتومتری در طول موج ۲۷۳ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر UV-VIS تعیین شد [۳۶]. همچنین،

^۱Bulk Density^۲Tapped Dendity^۳Particle Density

نشان داده شده است، یک مدل خطی داده ها را برازش می کند و متغیرهای مستقل مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب پنیر اثرات معناداری بر بازده درون پوشانی داشتند ($p < 0.05$). کنسانتره پروتئین آب پنیر شیبی تندتر از آنچه برای مالتودکسترین و اسانس حاصل شد، نشان داد که می توان به چنین نتیجه ای رسید که کنسانتره پروتئین آب پنیر می تواند به میزان چشمگیری بازده درون پوشانی را کاهش دهد. طبق جدول ۱، بازده درون پوشانی از ۶۲/۷۸ (نمونه ۱۹) تا ۸۰/۹۸٪ (نمونه ۱۴) متغیر بود که تأیید می کند غلظت بالای مالتودکسترین می تواند بازده درون پوشانی را افزایش دهد. کنسانتره پروتئین آب پنیر تأثیر معناداری بر بازده درون پوشانی داشت، افزایش غلظت آن منجر به کاهش بازده درون پوشانی شد. نتایج نشان می دهند که کنسانتره پروتئین آب پنیر بیشتر به عنوان یک عامل امولسیون کننده به جای یک عامل درون پوشانی کننده عمل کند، اما مالتودکسترین به عنوان یک عامل بلوکه کننده در اطراف مواد هسته عمل می کند و بازده را با افزایش دمای انتقال شیشه ای (Tg) افزایش می دهد [۳۸-۳۹]. همان طور که گزارش شد، مالتودکسترین دارای Tg حدود ۱۱۰ °C، با فعالیت آبی ۰/۱ بود، در حالی که WPC دارای مقادیر دمای انتقال شیشه ای ۵۳ و ۵۱ °C با رطوبت ۹/۶ و ۱۰٪ بود [۳۹] که نشان داد غلظت بالای WPC می تواند حالت چسبندگی فرمول ها را افزایش و بازده پودر را کاهش دهد [۳۸-۳۹].

رهایش در بزاق شبیه سازی شده بر اساس روش Chen و همکاران (۲۰۲۱) انجام شد [۳۷]. رهایش اسانس لیموترش به روش تجمعی با استفاده از معادله ۸ محاسبه گردید:

$$Q = \sum_{t=0}^t \frac{M_t}{M_0} \times 100 \quad (8)$$

در این معادله Q درصد رهایش تجمعی، M_t مقدار تجمعی اسانس آزاد شده در هر زمان نمونه برداری و M_0 جرم اولیه بارگذاری شده در نمونه است [۳۶].

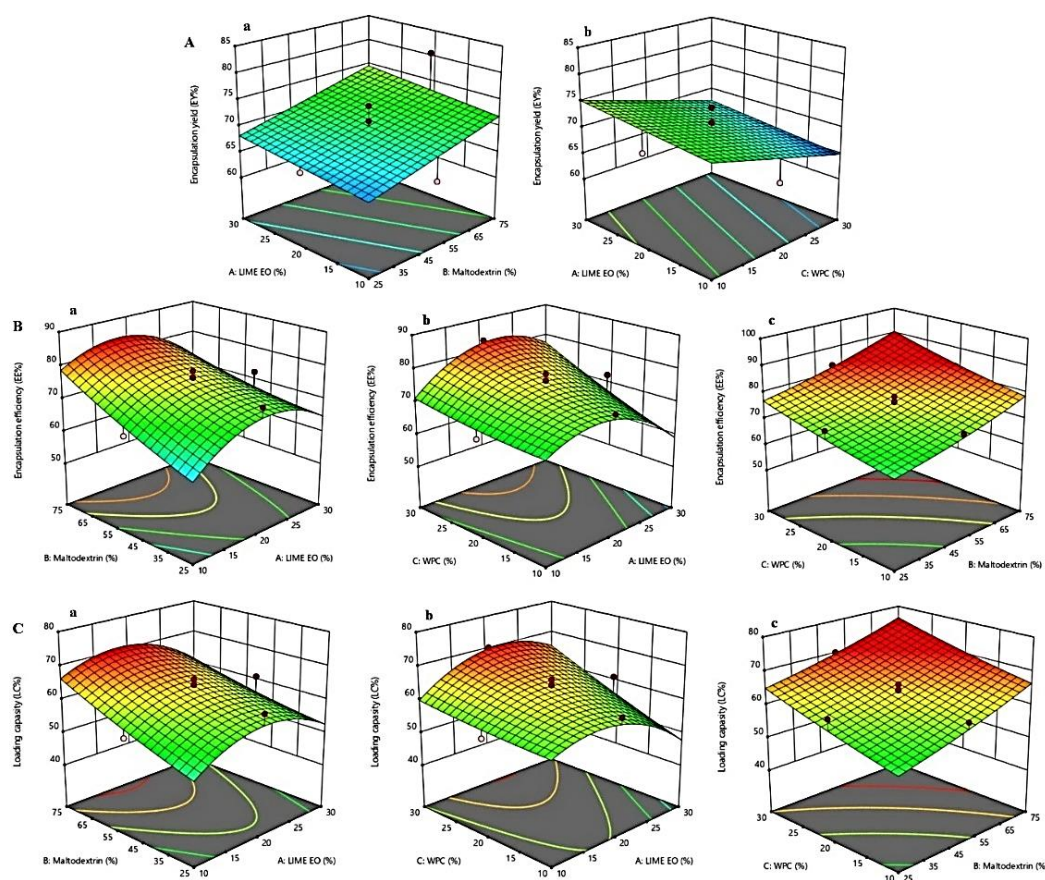
۵.۲. تحلیل آماری

بهینه سازی داده های RSM توسط نرم افزار Design Expert 13 صورت گرفت. تمامی آزمایش ها در سه تکرار و تجزیه و تحلیل آن ها با کمک روش آماری ANOVA و برنامه SPSS نسخه ۲۲ انجام شد. اختلاف میانگین با آزمون چنددامنه ای دانکن در سطح اطمینان ۹۵٪ ($p < 0.05$) انجام شد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. بازده درون پوشانی اسانس لیموترش

بازده درون پوشانی، رابطه بین مقدار مواد دیواره ای به کاررفته در امولسیون های اولیه و مقدار پودر تهیه شده توسط خشک کن بستر شناور است. همان طور که در شکل A-۱



شکل ۱. نمودارهای کانتور سطحی سه‌بعدی RSM برای ارزیابی متغیرهای مستقل (غلظت اسانس لیموترش، مالتودکسترین و WPC؛ درصد) و تأثیر آنها بر متغیر وابسته بازده درون‌پوشانی (EY)، کارایی درون‌پوشانی (EE) و ظرفیت بارگذاری (LC)

Fig 1. 3D surface contour plots of RSM for evaluation of independent variables (Lime EO concentration, maltodextrin, and WPC; %) effects on the dependent variable Encapsulation Yield (EY), Encapsulation Efficiency (EE) and Loading Capacity (LC)

ریزپوشینه‌ها در حین شناورسازی می‌شود. این امر، موجب تشکیل بیشتر ذرات چسبنده و کاهش بازده پودر می‌شود [۴۱]. همچنین، پودرهایی که اسانس سطحی بالایی دارند، مایل‌اند به دیواره سیستم خشک‌کن بچسبند؛ در نتیجه منجر به کاهش بازده پودر می‌شوند [۴۱]. بازده بالایی برای ریز-پوشینه‌های حاوی مالتودکسترین به‌تنهایی (۸۱/۱۴٪)، مالتودکسترین: ژلاتین (۱:۲) (۹۰/۰۹٪)، مالتودکسترین: ژلاتین (۱:۱) (۸۹/۰۹٪) به‌دست آمد که نشان‌دهنده کارایی روش خشک‌کن انجمادی برای ریزپوشانی اسانس نارنگی است [۴۲]. به‌طورکلی، EY نزدیک به ۱۰۰٪ فرایند ریزپوشانی، به‌دلیل ازدست‌رفتن مواد هسته‌ای (در طول

در پژوهشی، اثر MD به‌تنهایی به‌عنوان عامل درون-پوشانی‌کننده، در مقابل مخلوط MD و صمغ عربی بر ویژگی‌های ریزپوشینه‌های پودری بررسی شد [۴۰]. بر این اساس، زمانی که MD با غلظت ۳۰٪ (به همراه ۱/۵٪ اسانس لیمون گرس) ترکیب شد، بالاترین EY (۸۴/۴۹٪) به‌وسیله خشک‌کن پاششی به‌دست آمد [۴۰]. استفاده از غلظت‌های بالای اسانس لیمون گرس، به‌دلیل وزن مولکولی کمتر آن نسبت به مواد پوشش‌دهنده، منجر به کاهش Tg شد و محصول چسبناک بود که باعث کاهش EY شد [۴۱، ۱۸]. رابطه بین ویسکوزیته امولسیون و بازده پودر معنادار است [۴۱]. در واقع، ویسکوزیته بالا، باعث به‌تعویق افتادن تشکیل

هنگامی که از غلظت های بالای مواد دیواره ای استفاده می شود، دوره کوتاه تری برای تشکیل غشاهای نیمه نفوذ پذیر در شروع فرایند خشک کردن مورد نیاز است. با این حال، کاهش بازده درون پوشانی به دلیل غلظت های بسیار بالای مواد جامد، در امولسیون خوراک بود [۴۳].

امولسیون سازی و خشک کردن) و مواد دیواره ای که ممکن است به دیواره سیستم خشک کن چسبیده باشند، به دست نمی آید [۴۲]. این فرضیه که افزایش غلظت مواد دیواره ای در محلول خوراک، می تواند مسئول افزایش بازده تولید پودر ریزپوشینه طعم باشد، به اثبات رسیده است. درواقع،

جدول ۱. مقادیر دقیق هر نمونه تصادفی برای متغیرهای مستقل و وابسته

Table 1. Exact values of each random run for independent and dependent variables

RUN	EO%	MD%	WPC%	EY%	EE%	LC%	MC%	HG%	BD g/cm ³	TD g/cm ³	PD g/cm ³	CI%	PR%	HR%	SO%	IP%	REL1%	REL2%
1	20	75	20	80.52	82.91	69.89	2.27	1.64	0.358	0.435	1.287	17.69	66.20	1.215	22.60	8.20	29.76	56.89
2	20	50	20	67.06	72.76	61.33	1.56	1.75	0.357	0.400	1.259	10.75	68.23	1.120	14.00	14.48	39.20	71.20
3	20	50	20	73.91	76.45	64.44	1.47	2.07	0.364	0.417	1.250	12.71	66.64	1.146	12.20	25.61	42.70	69.47
4	30	25	30	63.65	73.65	62.09	2.14	1.36	0.385	0.417	1.213	7.67	65.62	1.083	23.00	44.92	75.54	98.20
5	20	25	20	65.73	74.02	62.40	0.66	2.20	0.412	0.460	1.175	10.50	60.85	1.140	9.00	41.90	56.51	77.40
6	30	75	10	75.33	63.63	53.64	2.09	2.24	0.376	0.435	1.215	13.45	64.20	1.155	22.60	8.99	35.28	65.72
7	20	50	30	64.68	83.35	70.27	1.79	2.19	0.385	0.435	1.272	11.49	65.80	1.130	15.20	11.85	68.72	93.50
8	10	25	10	70.85	60.33	50.86	0.67	2.56	0.476	0.526	1.168	9.51	54.97	1.105	13.20	51.78	57.55	88.52
9	10	25	30	67.25	62.15	52.39	0.77	2.96	0.405	0.476	1.170	15.00	59.32	1.176	16.20	50.18	85.48	100.0
10	20	50	10	69.55	72.93	61.48	1.32	2.06	0.370	0.426	1.185	13.15	64.05	1.151	11.00	34.29	36.60	78.40
11	30	50	20	70.38	72.46	61.08	1.00	2.20	0.417	0.460	1.268	9.35	63.72	1.103	20.80	44.31	36.10	65.40
12	20	50	20	71.00	76.64	64.61	2.72	1.96	0.380	0.435	1.253	12.64	65.28	1.145	13.80	26.69	43.50	74.57
13	10	50	20	64.10	65.77	55.45	0.69	2.89	0.363	0.417	1.255	13.00	66.77	1.149	22.40	13.60	56.20	84.91
14	10	75	10	80.98	77.37	65.23	1.43	2.86	0.333	0.370	1.260	10.00	70.63	1.111	28.60	15.45	49.50	79.38
15	20	50	20	68.81	78.49	66.16	1.12	2.40	0.385	0.435	1.247	11.49	65.12	1.130	17.40	24.24	36.48	69.45
16	30	75	30	75.51	81.63	68.81	2.20	1.80	0.400	0.455	1.360	12.09	66.54	1.138	33.40	7.57	42.80	67.40
17	20	50	20	67.71	76.54	62.15	1.64	1.84	0.370	0.430	1.253	13.95	65.68	1.162	15.40	25.45	36.45	68.65
18	30	25	10	75.04	54.11	40.56	0.54	2.43	0.462	0.500	1.175	7.56	57.45	1.082	13.20	63.64	47.80	70.50
19	10	75	30	62.78	83.84	70.68	2.46	2.40	0.354	0.400	1.350	11.50	70.37	1.130	30.60	5.43	52.10	78.40
20	20	50	20	65.87	72.74	62.15	1.60	1.78	0.369	0.435	1.260	15.09	65.48	1.178	12.80	26.30	41.43	73.76

درحالی که جملات خطی مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب پنیر نیز اثرات معناداری ($p < 0.05$) نشان دادند. اثر اسانس لیموترش، در معادله درجه دوم معنادار ($p < 0.05$) بود. طبق جدول ۱، بالاترین راندمان درون پوشانی (۸۳/۸۴٪) برای نمونه ۱۹ به دست آمد. مشاهده شد که با استفاده از غلظت های متوسط اسانس لیموترش (۲۰٪)، MD (۵۰٪) و

۳.۲. کارایی درون پوشانی

کارایی درون پوشانی، پارامتر کیفی اصلی است که نشان دهنده درصد مقادیر اولیه اسانس موجود در امولسیون است که پس از خشک شدن در ریزپوشینه ها باقی می ماند [۴۲]. همان طور که در شکل ۱-B نشان داده شده است، یک مدل درجه دوم می تواند داده ها را برازش دهد،

WPC (۲۰٪)، درصدهای بالاتر EE حاصل شد؛ به‌همین ترتیب، نمونه‌های ۱، ۳، ۷، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۹ دارای راندمان بالاتری بودند. از نظر غلظت اسانس، افزایش تا ۲۰٪ باعث افزایش مقدار راندمان درون‌پوشانی شد، درحالی‌که افزایش به ۳۰٪ باعث کاهش آن گردید که می‌تواند مربوط به کشش سطحی بالای اسانس باشد. به‌عبارت دیگر، دیواره‌ها و به‌طور خاص‌تر، کنسانتره پروتئین آب‌پنیر ظرفیت خاصی برای کشیدن مولکول‌های اسانس به‌سمت فضای بین سطحی و کاهش کشش بین سطحی داشتند و قطرات هسته‌ای را به قطرات کوچک‌تر می‌شکنند [۴۴]. این قطرات را می‌توان با پروتئین آب‌پنیر، مالتودکسترین و میکروکریستالین سلولز پوشش داد؛ با این حال، افزایش مقادیر اسانس لیموترش در امولسیون می‌تواند منجر به کاهش راندمان به‌دلیل حفظ مولکول‌های اسانس باقی‌مانده در سطح ذرات پودری شود؛ بنابراین، مقدار متوسطی از اسانس (۲۰٪) منجر به درصد بالاتری از راندمان شد. افزایش غلظت مالتودکسترین، درصد راندمان درون‌پوشانی پودر را افزایش داد. همچنین، غلظت کمتر آن و اسانس بالاتر، منجر به مقادیر EE پایین‌تر شد. مالتودکسترین نشان داد که می‌تواند یک ماده محصورکننده کارآمد در تشکیل دیواره باشد. مالتودکسترین به‌عنوان یک ماده بی‌اثر گزارش شده است (که در ساخت امولسیون دخالتی ندارد) و می‌توان آن را به‌عنوان یکی از کارآمدترین ترکیبات دیواره‌ای برای افزایش مقادیر راندمان و بازده درون‌پوشانی به حساب آورد. در مورد پروتئین آب‌پنیر، مشاهده شد که کمترین غلظت (۱۰٪)، موجب کاهش مقادیر EE شد و با افزایش غلظت (تا ۳۰٪) مقادیر EE افزایش یافت. این نشان داد که امولسیون‌سازی اسانس لیموترش به محتوای کافی امولسیون‌کننده نیاز دارد و محتوای کم مواد فعال سطحی، منجر به مقادیر راندمان درون‌پوشانی پایین‌تر می‌شود، به این معنی که مولکول‌های امولسیون‌کننده کافی برای پشتیبانی از پراکندگی مولکول‌های اسانس در فاز پیوسته وجود ندارد (نمونه ۶).

بر پایه گزارش‌های پیشین، MD و WPC (۱:۱) برای درون‌پوشانی اسانس ریحان با استفاده از روش خشک‌کن پاششی

با راندمان درون‌پوشانی ۸۲/۸۵٪ استفاده شد [۴۱]. بر اساس مطالعات، امولسیون‌های با ویسکوزیته بالا با کاهش گردش درونی قطرات و تشکیل سریع یک غشای نیمه‌تراوا، EE را افزایش می‌دهند [۴۱]. حفظ مواد فرار در امولسیون ممکن است زمانی کاهش یابد که ویسکوزیته مایع از حد مطلوب فراتر رود؛ زیرا لازم است دمای آن در طول اتمیزه‌شدن یا شناورشدن افزایش یابد. همچنین، پایداری امولسیون می‌تواند بر EE تأثیر بگذارد و استحکام بالاتر، مقادیر EE بالاتری را ایجاد کند که در مطالعات قبلی نیز تأیید شده است [۳۹، ۴۱]. با توجه به خشک‌کردن امولسیون اسانس پرتقال (نشاسته اصلاح‌شده به‌عنوان ترکیب دیواره) در خشک‌کن بستر شناور، گزارش شده است که EE با افزایش دمای هوای ورودی و خروجی (۱۴۰ و ۹۰ °C به‌ترتیب دمای ورودی و خروجی)، حداکثر مقدار ۵۴٪ افزایش یافته است که کمتر از بالاترین مقدار راندمان درون‌پوشانی یافت‌شده در مطالعه حاضر بود [۲۳]. Benelli و Oliveira (۲۰۱۹) فناوری بستر شناور را برای پوشش میکروکریستالین سلولز با یک سیستم بر پایه لیپید بارگذاری‌شده با عصاره غنی از پلی‌فنل *R. officinalis* با استفاده از صمغ عربی و پروتئین آب‌پنیر به‌عنوان ترکیبات دیواره‌ای و تجمع‌دهنده، مطالعه و بررسی کردند. آنها گزارش کردند که پروتئین آب‌پنیر به‌عنوان یک سورفکتانت رفتار می‌کند و حضور آن در ترکیب دیواره ممکن است باعث کاهش انرژی (نیروی کششی) مورد نیاز برای شکستن قطرات در طول فرایند اتمیزاسیون می‌شود [۲۵]. همچنین، پروتئین آب‌پنیر منجر به نیروهای ویسکوز کوچک‌تر، تسهیل پخش مواد اتمیزه‌شده بر روی سطح ذرات دانه و کمک به ایجاد لایه‌های یکنواخت‌تر مواد پوششی گردید که می‌تواند راندمان درون‌پوشانی و ذخیره‌سازی را افزایش دهد [۲۵]. با توجه به مطالعه De Araujo و همکاران (۲۰۲۰ a) در مورد ریزپوشانی اسانس نارنگی با لیوفیلیزاسیون با استفاده از مالتودکسترین و مالتودکسترین/ژلاتین، گزارش شد که مقادیر EE، برای نمونه‌های متشکل از مالتودکسترین به‌تنهایی یا مالتودکسترین و ژلاتین حدود ۷۴/۷۵٪ و ۷۵/۷۵٪ بدون تفاوت معنادار بود ($p > 0.05$) [۴۲]. در ریزپوشانی اسانس زنجبیل توسط صمغ عربی، مخلوط صمغ عربی و

به عنوان یک ترکیب درون پوشانی کننده، اثرات خطی قابل توجهی بر ظرفیت بارگذاری داشت.

مخلوط های MD و WPC به طور گسترده برای درون پوشانی ترکیبات فرار و غیرفرار استفاده شده اند [۴۵، ۳۸، ۱۹]. مالتودکسترین بطور نسبی هزینه پایین، عطر و طعم خنثی، ویسکوزیته کم در غلظت های بالا و محافظت خوب از طعم ها در برابر اکسیداسیون را ارائه می دهد [۱۸]. با این حال، استفاده از آن به دلیل ظرفیت امولسیون کنندگی کم و نگهداری پایین مواد فرار محدود است [۴۶، ۱۹]؛ بنابراین، استفاده از یک ترکیب مناسب از کربوهیدرات ها و پروتئین ها می تواند ظرفیت امولسیون کنندگی و محافظت بالایی را ایجاد کند [۴۴]. در مطالعه ای، اسانس نارنج با استفاده از روش ژلاسیون یونی در نانوذرات کیتوزان گنجانده شدند [۲]. براساس گزارش ها، ظرفیت بارگذاری که در محدوده ۲/۵۱-۵/۸۹ قرار داشت، به طور قابل توجهی کمتر از یافته های ما بود [۲]. بنابراین، خشک کن بستر شناور می تواند روش مناسبی برای درون پوشانی ترکیبات فرار باشد.

۴.۳. میزان رطوبت

همان طور که در شکل ۲-A نشان داده شده است، مدل معنی دار پیشنهادی برای برازش داده های تجربی، خطی بود. اثر خطی کنسانتره پروتئین آب پنیر و مالتودکسترین معنادار بود ($p < 0.05$). محتوای رطوبت با افزایش غلظت اسانس افزایش یافت، اما این تغییرات معنادار نبود ($p > 0.05$). بر اساس شکل ۲-A (b)، مشاهده شد که با افزایش WPC محتوای رطوبت به طور قابل توجهی افزایش یافت ($p < 0.05$). بر اساس شکل ۲-A (a)، مشاهده شد که محتوای رطوبت با افزایش غلظت مالتودکسترین از ۲۵ به ۷۵٪ افزایش یافت. طبق جدول ۱، بیشترین مقادیر رطوبت برای نمونه های ۱۲، ۱۹، ۱۶، ۴ و ۶ به ترتیب ۲/۷۲، ۲/۴۶، ۲/۲۷، ۲/۲ و ۲/۱۴ و ۲/۰۹ به دست آمد، در حالی که کمترین مقدار آن برای نمونه ۱۸ (۰/۵۴) (۳۰٪ اسانس، ۲۵٪ مالتودکسترین و ۱۰٪ پروتئین آب پنیر) به دست آمد. در واقع بالا بودن مقادیر مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب پنیر منجر به مقادیر رطوبت بالاتر شد. این امر شاید به دلیل خاصیت

مالتودکسترین و مخلوط صمغ عربی و اینولین (روش خشک کن پاششی)، مقادیر EE، به ترتیب ۸۶/۵۰، ۹۳ و ۴۸٪ بود که نشان داد بالاترین مقدار EE زمانی به دست آمد که از مالتودکسترین استفاده شد [۴۵]. کارایی مخلوط حاوی مالتودکسترین برای حفظ اسانس زنجبیل نشان داده شده است. این ماده تا حدودی ارزان است و به خوبی از مواد محصور شده محافظت می کند. از طرفی، مالتودکسترین به دلیل عدم وجود ویژگی های امولسیون کنندگی نمی تواند به عنوان یک ماده پوششی به تنهایی و بدون افزودن مواد تشکیل دهنده دیواره فعال سطحی استفاده شود. با این حال، افزودن MD به دیواره به احتمال زیاد خواص خشک کردن ماتریکس دیواره را با افزایش تشکیل یک پوسته خشک در اطراف قطرات در حال خشک شدن، کاهش نفوذپذیری اکسیژن و پرکردن فضاهای خالی در ماتریکس ترکیبات دیواره ای را بهبود می بخشد [۴۵].

۳.۳. ظرفیت بارگذاری

ظرفیت بارگذاری نسبت بین جرم هسته بارگذاری شده به جرم ذرات را تعیین می کند. همان طور که در شکل ۱-C نشان داده شده است، یک مدل درجه دوم می تواند با داده ها مطابقت داشته باشد که اثر خطی مالتودکسترین و پروتئین آب پنیر، اثر متقابل اسانس لیموترش بر کنسانتره پروتئین آب پنیر و اثر درجه دوم اسانس معنادار ($p < 0.05$) بود. مشاهده شد که با افزایش WPC (۱۰ تا ۳۰٪) و MD (۲۵ تا ۷۵٪)، مقادیر ظرفیت بارگذاری به طور معناداری ($p < 0.05$) افزایش یافت. با وجود این، ظرفیت بارگذاری هنگامی که غلظت اسانس تا ۲۰٪ بود، افزایش یافت. زمانی که غلظت اسانس به ۳۰٪ رسید، کاهش یافت. طبق جدول ۱، بیشترین مقدار ظرفیت بارگذاری (۷۰/۶۸٪) برای نمونه ۱۹ و کمترین مقدار (۴۰/۵۶٪) برای نمونه ۱۸ به دست آمد. نمونه ۷ و نمونه ۱ مقادیر ظرفیت بارگذاری نسبتاً بالاتری را نشان می دهد. در بیشتر موارد، اسانس ۲۰٪، مالتودکسترین بالاتر از ۵۰٪ و کنسانتره پروتئین آب پنیر بیش از ۲۰٪ منجر به ظرفیت بارگذاری بالاتر از ۶۱٪ شد. مشابه تفسیر راندمان درون پوشانی، مالتودکسترین

رطوبت‌پذیری WPC و مالتودکسترین باشد هرچند اثرات متغیرهای مستقل معنادار است، عمده مقادیر محتوای رطوبت کمتر از ۲/۵٪ بود که می‌توان آن را به روش کارآمد خشک‌کردن به کمک بستر شناور مورد استفاده در مطالعه حاضر نسبت داد. محتوای رطوبت می‌تواند بر چگالی و جریان‌پذیری پودرهای حاصل تأثیر بگذارد [۴۴].

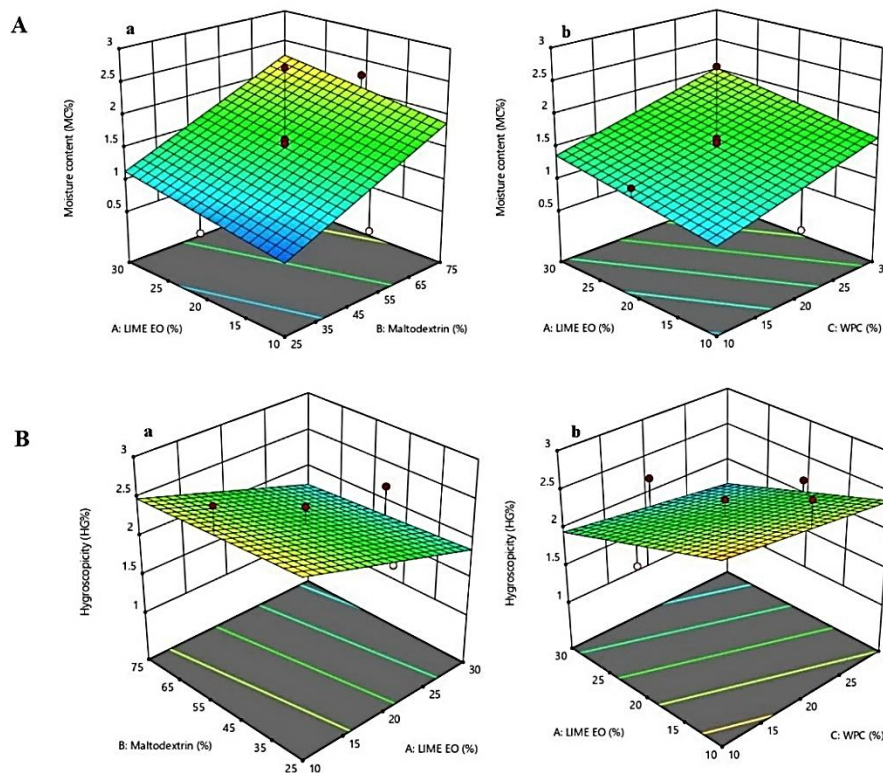
در یک مطالعه مقادیر محتوای رطوبت برای اسانس زنجبیل ریزپوشانی‌شده بسته به نوع مواد دیواره مورد استفاده در محدوده ۰/۸۸ تا ۱/۷۶٪ بود [۴۵]. هنگامی که از صمغ عربی استفاده شد، محتوای رطوبت، ۱/۷۶٪ بود. مخلوط مالتودکسترین و صمغ عربی منجر به کمترین مقدار رطوبت (۰/۸۸٪) شد. این امر نشان داد که مالتودکسترین می‌تواند به‌طور مؤثر بر محتوای رطوبت تأثیر بگذارد [۴۵]. ریزپوشینه‌های تولیدشده (با خشک‌کن پاششی) حاوی روغن بذر کتان، مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب‌پنیر دارای رطوبت ۱/۵۴٪ بودند [۳۹]. گزارش شده است که با افزایش اسانس رزماری در امولسیون، ذرات به‌دست‌آمده با خشک‌کن پاششی (مالتودکسترین و نشاسته اصلاح‌شده به‌عنوان مواد دیواره‌ای) محتوای رطوبت بالاتر، خاصیت رطوبت‌پذیری کمتر و محتوای روغن کل بالاتری را نشان می‌دهند [۴۳]. ریزپوشانی اسانس میوه گیاه *Juniperus communis* L. با خشک‌کن پاششی با استفاده از صمغ عربی، مالتودکسترین، آلزینات سدیم و کنسانتره پروتئین آب‌پنیر به‌عنوان مواد دیواره‌ای انجام شد [۴۷]. گزارش شده است که کنسانتره پروتئین آب‌پنیر ممکن است برای کاهش رطوبت و خاصیت رطوبت‌پذیری ارجح باشد [۴۷]. هر چند داده‌های پژوهش حاضر افزایش محتوای رطوبت را با افزایش مقادیر کنسانتره آب‌پنیر و مالتودکسترین نشان داد.

۳.۵. خواص رطوبت‌پذیری

خواص رطوبت‌پذیری، ظرفیت جذب آب پودر در یک محیط نسبتاً مرطوب است. رطوبت به‌دلیل تأثیر بر فرایند

اکسیداسیون لیپیدها و احتمال از بین رفتن طعم‌ها، به‌عنوان یک عامل کلیدی در عمر نگهداری ریزپوشینه‌های اسانس و طعم در نظر گرفته می‌شود [۴۵، ۴۸]. همان‌طور که در شکل B-۲ (b,a)، نشان داده شده است، یک مدل خطی برای برازش داده‌ها پیشنهاد شد درحالی که اثر خطی اسانس لیموترش معنادار بود ($p < 0.05$)، اثر مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب‌پنیر بر HG معنادار نبود ($p > 0.05$). با افزایش غلظت اسانس خاصیت رطوبت‌پذیری کاهش یافت. با توجه به جدول ۱، کمترین مقادیر HG (۱/۳۶٪)، زمانی به‌دست آمد که غلظت اسانس، مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب‌پنیر، به‌ترتیب ۳۰٪، ۲۵٪ و ۳۰٪ (نمونه ۴) بود. همچنین بالاترین مقادیر HG (۲/۹۶٪) زمانی حاصل شد که غلظت اسانس، مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب‌پنیر به‌ترتیب ۱۰٪، ۲۵٪ و ۳۰٪ بود.

گزارش شده است که اسانس زنجبیل ریزپوشانی‌شده با مالتودکسترین و صمغ عربی به‌عنوان مواد دیواره از طریق خشک‌کردن پاششی نشان‌دهنده محتوای رطوبت کمتر، به‌دلیل کاهش سطح خواص رطوبت‌پذیری، است [۴۷]. کنسانتره پروتئین آب‌پنیر به‌عنوان یک ماده دیواری ترجیحی برای کاهش HG گزارش شد [۱۴]. مقادیر HG بین ۹/۳ تا ۱۳/۹٪ برای اسانس رزماری ریزپوشینه‌شده با مالتودکسترین و نشاسته اصلاح‌شده، خشک‌شده به کمک خشک‌کن پاششی ثبت شد [۴۵]. مقادیر HG برای ریزپوشینه‌های اسانس قهوه بین ۱۳/۷۳ تا ۱۷/۸۹٪ با استفاده از صمغ عربی به‌عنوان یک عامل درون‌پوشانی‌کننده متغیر بود [۴۳]. افزایش مصرف اسانس منجر به کاهش خواص رطوبت‌پذیری شده است که می‌تواند به ماهیت آب‌گریز خود اسانس مرتبط باشد [۴۵]. همچنین، کمترین مقادیر HG در غلظت‌های بالای مواد دیواره یافت شد [۴۵]. نتایج ما به‌طور قابل‌توجهی کمتر از نتایج گزارش‌شده در مطالعات قبلی بود [۳۲].



شکل ۲. نمودارهای کانتور سطحی سه بعدی RSM برای ارزیابی متغیرهای مستقل (غلظت اسانس لیموترش، مالتودکسترین و WPC؛ درصد) و تأثیر آنها بر متغیر وابسته محتوای رطوبتی (MC) و رطوبت پذیری (HG).

Fig 2. 3D surface contour plots of RSM for evaluation of independent variables (Lime EO concentration, maltodextrin, and WPC; %) effects on the dependent variable Moisture Content (MC) and Hygroscopicity (HG).

۳.۶. چگالی ظاهری

و کاهش غلظت مالتودکسترین (۷۵ تا ۲۵٪) چگالی ظاهری به طور قابل توجهی افزایش می یابد ($p < 0.05$). همان طور که در شکل ۳-ا (b) نشان داده شده است اثر توأمان افزایش غلظت اسانس و کاهش غلظت WPC، باعث افزایش چگالی ظاهری پودر حاصل شد. همچنین با توجه به شکل ۳-ا (c) اثر توأمان کاهش مالتودکسترین و WPC، موجب افزایش چگالی ظاهری شد. طبق جدول ۱، بیشترین چگالی ظاهری (0.476 g/cm^3) (نمونه ۸) مرتبط با اثر متقابل کمترین غلظت مالتودکسترین (۲۵٪) و کنسانتره پروتئین آب پنیر (۱۰٪) بود. همچنین کمترین مقادیر چگالی ظاهری 0.333 g/cm^3 و 0.354 g/cm^3 مرتبط با نمونه های ۱۴ و ۱۹، با بالاترین

چگالی ظاهری یک پارامتر ضروری از نظر شرایط نگهداری، فراوری، بسته بندی و توزیع فرآورده های غذایی پودری است [۴۴]. همان طور که در شکل ۳-ا (c, b, a) نشان داده شده است، مناسب ترین مدل درجه دوم برای تنظیم داده های تجربی بود ($p < 0.05$). در بین عبارات خطی، اسانس و مالتودکسترین تأثیر معناداری بر چگالی ظاهری نشان دادند ($p < 0.05$). همچنین، اثر توأمان اسانس و مالتودکسترین و نیز اثر توأمان مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب پنیر تأثیر معناداری داشت ($p < 0.05$). چنان که در شکل ۳-ا (a) نشان داده شده است با افزایش غلظت اسانس (۱۰ تا ۳۰٪)

محتوای کنسانتره پروتئین آب‌پنیر و مالتودکستری ۳۰ و ۷۵٪ به‌دست آمد؛ بنابراین استفاده از کنسانتره پروتئین آب-پنیر و مالتودکستری در حداکثر غلظت‌هایشان منجر به مقادیر چگالی ظاهری بالاتری شد که می‌توان آن را به ترکیب محتوای جامد بالا که احتمالاً تخلخل را کنترل می‌کند نسبت داد [۳۰].

بر اساس آخرین گزارش‌ها، پودرهای ریزدرون‌پوشینه تولیدشده (به روش خشک‌کردن انجمادی) حاوی روغن دانه کدو تنبل، مالتودکستری، کنسانتره پروتئین آب‌پنیر و صمغ عربی دارای چگالی ظاهری در محدوده ۰/۲۲ تا ۰/۳۲ گرم بر میلی‌لیتر بودند [۴۴]. گزارش شده است که مقادیر کمتر چگالی ظاهری منجر به ایجاد فضای خالی بیشتری بین ذرات می‌شود؛ از این رو، پودرها در طول ذخیره‌سازی نسبت به تخریب اکسیداتیو حساس‌تر هستند [۴۴، ۴۷]. ریزدرون-پوشینه‌های حاصل از خشک‌کن پاششی حاوی مالتودکستری: کنسانتره پروتئین آب‌پنیر و مالتودکستری: صمغ عربی به‌ترتیب چگالی ظاهری ۰/۲۸ و ۰/۴۰ g/cm³ را نشان دادند [۴۷]. مقادیر چگالی ظاهری برای ریزدرون-پوشینه‌های حاوی مالتودکستری و نشاسته اصلاح‌شده در محدوده ۹/۳ تا ۱۳/۹ g/cm³ بود [۴۳]. گزارش شده است که چگالی ظاهری در غلظت‌های بالاتر افزایش یافته است و تراکم‌پذیری پودر را افزایش می‌دهد؛ در نتیجه نفوذ هوا یا آب را به ذرات محدود می‌کند. چگالی ظاهری در سطوح بالاتر غلظت، بیشتر می‌شود و در ادامه، پودر فشرده‌تر می‌شود و در نتیجه نفوذ هوا یا آب به ذرات را مهار کند [۴۳]. چگالی ظاهری پودرهای حاصل از خشک‌کن بستر شناور در مطالعه حاضر در محدوده‌ی مناسبی قرار دارد که نشان‌دهنده غلظت‌های مناسب ترکیبات دیواره‌ای به‌کاررفته و کارایی مناسب روش خشک‌کردن است.

۳.۷. چگالی ضربه‌ای

چگالی ضربه‌ای، عاملی حیاتی مربوط به بسته‌بندی و تجاری‌سازی پودرها است. در واقع، یک فراورده خشک با چگالی بالا را می‌توان در ظروف کوچک‌تر نسبت به فراورده مشابه با چگالی کم نگهداری کرد [۴۳]. همان‌طور که در

شکل ۳-B (c,b,a) نشان داده شده است، مدل 2FI داده‌ها را برازش داد. درعین حال اثر توأمان پودر اسانس لیموترش و مالتودکستری و همچنین اثر توأمان مالتودکستری و کنسانتره پروتئین آب‌پنیر تعامل معناداری داشتند ($p < 0/05$). طبق مدل 2FI اثر مالتودکستری بر چگالی ضربه‌ای معنادار بود ($p < 0/05$). بر اساس شکل ۳-B (a) که اثر متقابل پودر اسانس لیموترش و مالتودکستری را نشان می‌دهد، مشاهده شد که مقادیر چگالی ضربه‌ای بالاتر در کمترین مقادیر اسانس لیموترش و مالتودکستری حاصل شد. بر اساس شکل ۳-B (c)، که اثر متقابل WPC و مالتودکستری را نشان می‌دهد، مشاهده شد که مقادیر چگالی ضربه‌ای بالاتر در کمترین مقادیر WPC و مالتودکستری به‌دست آمد ($p < 0/05$). طبق جدول ۱، بالاترین مقادیر چگالی ضربه‌ای برای نمونه ۸ (۰/۵۲۶ g/cm³) و نمونه ۱۸ (۰/۵۰۰ g/cm³) به دست آمد.

مطالعات مختلف گزارش کرده‌اند که مقادیر چگالی ضربه‌ای بالاتر از مقادیر چگالی ظاهری است [۴۳]. در مطالعه حاضر، مقادیر چگالی ضربه‌ای نیز بالاتر از مقادیر چگالی ظاهری و در اثر ضربه‌زدن بود و ممکن است مشکلاتی در به جریان انداختن پودر ایجاد کند. مقادیر بالاتر چگالی ظاهری و چگالی ضربه‌ای با اندازه ذرات کوچک تشکیل‌شده در حین فرایند با دستگاه خشک‌کن بستر شناور مرتبط است [۴۴].

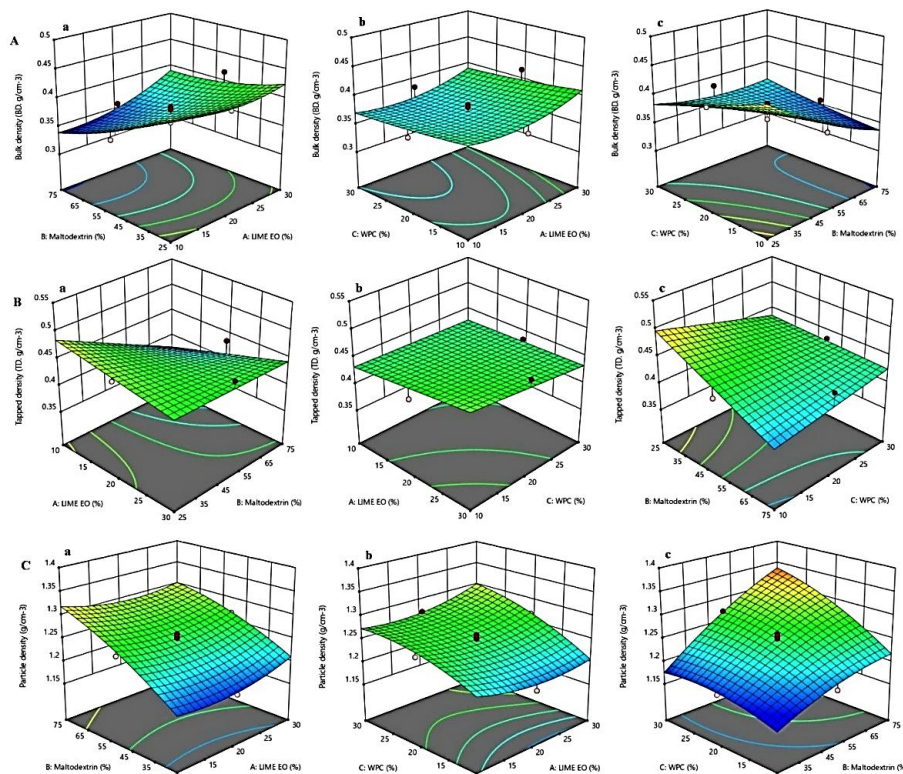
۳.۸. چگالی ذره

همان‌طور که در شکل ۳-C (c,b,a) نشان داده شده است، یک مدل درجه دوم داده‌های تجربی را برازش داد ($p < 0/05$). اثرات مالتودکستری و WPC به‌تنهایی بسیار معنادار بود ($p < 0/05$)؛ درحالی‌که غلظت اسانس به‌تنهایی اثری بر چگالی ذره نداشت ($p > 0/05$). تعامل متقابل مالتودکستری و کنسانتره پروتئین آب‌پنیر اثر معناداری نشان داد ($p < 0/05$). مدل درجه دوم اسانس، مالتودکستری و کنسانتره پروتئین آب‌پنیر معنادار بود ($p < 0/05$). با افزایش غلظت مالتودکستری و کنسانتره پروتئین آب‌پنیر هر یک به‌تنهایی، چگالی ذره به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت ($p < 0/05$). بالاترین چگالی ذره زمانی به‌دست آمد که

کاهش دمای ورودی منجر به افزایش چگالی ذره شد. هنگامی که نرخ همگن سازی کاهش یافت، اندازه قطرات امولسیون افزایش یافت که تمایل به کاهش ویسکوزیته آن داشت. هنگامی که ویسکوزیته کاهش یافت، بسته به محتوای ماده خشک امولسیون، اندازه قطرات بیشتر شد و چگالی ذره بالاتر رفت. علاوه بر این، هنگامی که دمای ورودی افزایش یافت، پوسته ای تشکیل شد که حذف آب از قطرات و انتقال جرم را مسدود کرد، در نتیجه محصول دارای رطوبت بالا و چگالی ذره پایین بود. در واقع، محتوای رطوبت کمتر به طور کلی به معنای چگالی ذره بالاتر است، زیرا چگالی آب کمتر از ماده خشک است [۴۹].

بالاترین غلظت مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب پنیر ترکیب شد. با توجه به جدول ۱، بالاترین چگالی ذره ($1/360 \text{ g/cm}^3$) برای نمونه ۱۶ حاصل شد، در حالی که کمترین مقدار ($1/168 \text{ g/cm}^3$) برای نمونه ۸ بود. مشخص شد که هرچه محتوای جامد بالاتر باشد، مقادیر چگالی ذره بالاتر می شود.

با توجه به پژوهش های پیشین، چگالی ریزپوشینه ها با عصاره بره موم با استفاده از خشک کن پاششی بین $1/133$ و $1/243 \text{ g/cm}^3$ تغییر کرد. مالتودکسترین و ایزوله کنسانتره پروتئین-آب پنیر به عنوان حامل برای درون پوشانی استفاده شد. افزایش سرعت همگن سازی و دمای خروجی و همچنین



شکل ۳. نمودارهای کانتور سطحی سه بعدی RSM برای ارزیابی متغیرهای مستقل (غلظت اسانس لیموترش، مالتودکسترین و WPC؛ درصد) و تأثیر آنها بر متغیر وابسته دانسیته ظاهری (BD)، دانسیته ضربه ای (TD) و دانسیته ذره ای (PD).

Fig 3. 3D surface contour plots of RSM for evaluation of independent variables (Lime EO concentration, maltodextrin, and WPC; %) effects on the dependent variable Bulk Density (BD), Tapped Density (TD) and Particle Density (PD)

۹.۳. شاخص جریان پذیری

شاخص جریان پذیری به عنوان نسبت تفاوت مقادیر چگالی ضربه ای و چگالی ظاهری به چگالی ضربه ای تعیین شد و به عنوان شاخص Car_t بیان گردید [۴۳]. شاخص جریان پذیری یک ویژگی ضروری برای ذرات خشک شده است و مقادیر بالاتر شاخص Car_t (به اختصار CI) نیز نشان دهنده شاخص جریان پذیری ضعیف است. CI کمتر از ۱۵٪ بهترین جریان پذیری، مقادیر بین ۱۵ تا ۲۰٪ شاخص جریان پذیری خوب، بین ۲۰ تا ۳۵٪ جریان پذیری مناسب، ۳۵ تا ۴۵٪ جریان پذیری بد و CI بالاتر از ۴۵٪ نشان دهنده جریان پذیری بسیار بد است [۴۳]. همان طور که در شکل ۴-A (c,b,a) نشان داده شده است، یک مدل درجه دوم برای تنظیم داده های تجربی پیشنهاد شده است ($p < 0.05$). متغیر مستقل مالتودکسترین به طور معناداری بر CI تأثیر گذاشت ($p < 0.05$) در حالی که اثر سایر متغیرهای مستقل معنادار نبود ($p > 0.05$). طبق جدول ۱، کمترین مقادیر CI برای نمونه های ۱۸ (۷/۵۶٪) و ۴ (۷/۶۷٪) به دست آمد. بالاترین مقدار CI (۱۷/۶۹٪) برای نمونه یک به دست آمد. همه مقادیر CI کمتر از ۲۰٪ بودند که بهترین جریان پذیری ریزدرون پوشینه های تولید شده با تکنیک خشک کن بستر شناور را نشان می دهد.

Özbek و Ergönül (۲۰۲۰) گزارش کردند که مقادیر CI در محدوده ۴۳/۱۸-۵۳/۱۳٪ است که نشان دهنده شاخص جریان-پذیری خیلی بد ریزپوشینه ها است [۴۴]. در یک مطالعه، روغن دانه هندوانه ابوجهل^۱ با استفاده از مالتودکسترین، کنسانتره-پروتئین آب پنیر و صمغ عربی از طریق روش خشک کردن پاششی درون پوشانی شد [۵۰]. مقادیر CI از ۴۰/۶۲ تا ۵۲/۰۴٪ بود که نشان دهنده شاخص جریان پذیری خیلی بد است. گزارش شده است که ریزدرون پوشینه های مبتنی بر کربوهیدرات نسبت به ریزدرون پوشینه های دارای کنسانتره پروتئین آب پنیر یا مخلوطی از پروتئین و کربوهیدرات، مقادیر CI پایین تری (جریان پذیری بالا) نشان می دهند [۵۰]. یافته های ما به طور چشمگیری، بهتر و مناسب تر از گزارش مطالعات پیشین بود.

۱۰.۳. تخلخل

به نسبت تفاوت چگالی ذره و چگالی ضربه ای به چگالی ذره، تخلخل می گویند. در فراوری مواد غذایی، در بازیابی پودر خشک اهمیت ویژه ای دارد [۵۰]. همان طور که در شکل ۴-B (c,b,a) نشان داده شده است، یک مدل درجه دوم برازش داده های تجربی را توجیه می کند. اثر خطی و اثر درجه دوم مالتودکسترین مهم ترین پارامتر مؤثر و معنادار بودند ($p < 0.05$). با این حال، تأثیر کنسانتره پروتئین آب پنیر بر مقادیر تخلخل را نمی توان نادیده گرفت ($p < 0.05$). همچنین برهم کنش توأمان مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب پنیر اثر معنادار نشان داد ($p < 0.05$). همان طور که در شکل ۴-B (a) نشان داده شده است، زمانی که مالتودکسترین از ۲۵ به ۷۵٪ افزایش یافت، تخلخل به طور قابل توجهی افزایش یافت ($p < 0.05$). با توجه به جدول ۱، بیشترین میزان تخلخل (۷۰/۶۳٪) برای نمونه ۱۴ و کمترین مقدار (۵۴/۹۷٪) برای نمونه ۸ به دست آمد.

در تحقیقات قبلی، مالتودکسترین به عنوان پوشینه برای تولید پودر آب میوه جامون ریزپوشینه شده به کمک خشک کن پاششی استفاده شد که در آن مقادیر تخلخل بین ۹۰/۷۷ و ۹۲/۶۰٪ متغیر بود [۴۳]. مقادیر بالاتر تخلخل به دلیل وجود فضای قابل توجهی بین ذرات و وجود اکسیژن، امکان وقوع واکنش های تخریبی را فراهم می کند [۴۳]. نتایج پژوهش حاصل کمتر از مقادیر ذکر شده بود که می تواند بر پایداری اکسیداتیو اسانس ریزپوشانی شده تأثیر مثبت بگذارد.

۱۱.۳. پیوستگی

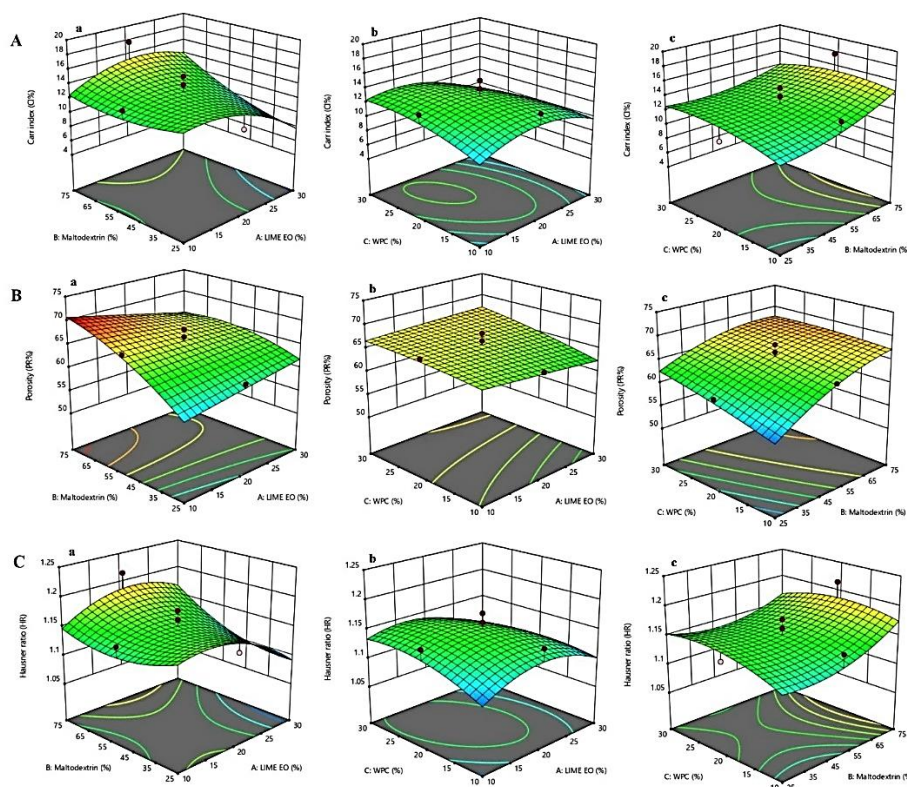
انسجام یا پیوستگی به عنوان نسبت مقادیر چگالی ضربه ای و چگالی ظاهری بیان می شود. این ویژگی، به عنوان نسبت Hausner (به اختصار HR) توصیف شد که می تواند با شاخص جریان پذیری مرتبط باشد. این امر در پودرها به جهت بسته بندی، نگهداری و نیز کاربردهای ثانویه بسیار حائز اهمیت است. همان طور که در شکل ۴-C (c,b,a) نشان داده شده است، یک مدل درجه دوم برای برازش داده های تجربی پیشنهاد شده است ($p < 0.05$). بر اساس این مدل، متغیر مستقل مالتودکسترین

^۱Gurum seed oil

مقدار HR بالاتر از ۱/۴ است [۴۳]، بنابراین پودرهای حاصل از خشک کن بستر شناور تولید شده در این مطالعه دارای به هم پیوستگی کم و جریان پذیری زیادی بودند. با توجه به ریزپوشانی روغن دانه کدو تنبل توسط مالتودکسترین، کنسانتره پروتئین آب-پنیر و صمغ عربی با روش خشک کردن انجمادی، گزارش شده است که مقادیر HR از ۱/۷۶ تا ۲/۱۸ متغیر است که نشان دهنده جریان پذیری بسیار بد ریز پوشینه های تولید شده است [۴۴]. می توان گفت که نه تنها مواد دیواره بر جریان پذیری تأثیر می گذارد، بلکه نوع خشک کردن نیز می تواند بر شاخص های CI و HR مؤثر باشد. از این رو، روش خشک کن بستر شناور روشی مناسب برای تولید پودرهایی با جریان پذیری بالاست.

به طور معناداری بر مقادیر HR تأثیر گذاشت ($p < 0.05$) به طوری که با افزایش مالتودکسترین مقادیر HR افزایش یافت. هرچند تغییرات غلظت اسانس و کنسانتره پروتئین آب پنیر بر این شاخص معنادار نبود ($p > 0.05$). اثر متقابل اسانس و مالتودکسترین و نیز اثر درجه دوم غلظت اسانس بر HR معنادار بود ($p < 0.05$). طبق جدول ۱، بیشترین مقدار HR برای نمونه ۱ (۱/۲۱۵)، کمترین مقادیر HR برای نمونه ۴ (۱/۰۸۰) و نمونه ۱۸ (۱/۰۸۲) به دست آمد.

گزارش شده است که به هم پیوستگی کم یا پودر با جریان بالا دارای مقدار HR کمتر از ۱/۲، به هم پیوستگی متوسط دارای مقدار HR در محدوده ۱/۲ تا ۱/۴ و به هم پیوستگی بالا دارای



شکل ۴. نمودارهای کانتر سطحی سه بعدی RSM برای ارزیابی متغیرهای مستقل (غلظت اسانس لیموترش، مالتودکسترین و WPC؛ درصد) و تأثیر آنها بر متغیر وابسته CI (شاخص جریان پذیری)، PR (تخلخل) و HR (پیوستگی).

Fig 4. 3D surface contour plots of RSM for evaluation of independent variables (Lime EO concentration, maltodextrin, and WPC; %) effects on the dependent variable CI (Carr Index), PR (Porosity), and HR (Hausner Ratio)

۱۲.۳. حلالیت

(۳۰٪ اسانس، ۲۵٪ مالتودکسترین و ۱۰٪ پروتئین آب‌پنیر) به‌دست آمد؛ درحالی‌که کمترین مقدار آن (۵/۴۳ درصد) برای نمونه ۱۹ (۱۰٪ اسانس، ۷۵٪ مالتودکسترین و ۳۰٪ پروتئین آب‌پنیر) به‌دست آمد. فعالیت آنتی‌اکسیدانی پودرهای حاصل می‌تواند به‌دلیل وجود ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و خاصیت بازدارندگی اسانس باشد. درواقع در بیشترین غلظت اسانس و کمترین غلظت‌های مواد دیواره‌ای بالاترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی مشاهده شد.

بر اساس پژوهش‌های پیشین، گزارش شده است که اسانس میخک درون‌پوشانی‌شده دارای فعالیت مهار رادیکال آزاد کمتری نسبت به اسانس‌های غیردرون‌پوشانی شده است [۴۴] که می‌تواند در اثر تماس آنتی‌اکسیدان‌ها با عوامل اکسیدکننده باشد. درواقع، هنگامی‌که آنتی‌اکسیدان‌ها در تماس مستقیم با عوامل اکسیدکننده باشند، فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالاتری را می‌توان ایجاد کرد. با این حال، آزادبودن و محصورنشدن آنتی‌اکسیدان‌ها را در معرض تعامل با مواد اکسیدکننده قرار می‌دهد که می‌تواند امکان نگهداری آنها را کاهش دهد. درون‌پوشانی می‌تواند ترکیبات آنتی‌اکسیدانی را پوشانده و آنها را از تخریب یا اکسیداسیون حفظ کند. سیستم خشک‌کن بستر شناور که در مطالعه حاضر استفاده شده است، به‌دلیل استفاده از دمای پایین در مقایسه با دماهای به‌کاررفته استفاده در سیستم خشک‌کن پاششی، اسانس لیموترش را به‌خوبی حفظ کرد که با نتایج سایر پژوهش‌گران مطابقت داشت [۳۱، ۳۳، ۳۰، ۲۸]. همچنین از مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب‌پنیر به‌عنوان عامل پوشش‌دهنده برای تولید ریزپوشینه‌ها استفاده شد. مالتودکسترین ابتدا در سیستم خشک‌کن بستر شناور تزیق شد و ذرات تشکیل‌شده توسط میکروکریستالین سلولز را پوشش داد. ذرات تولیدشده از میکروکریستالین سلولز، اسانس به‌دام‌افتاده و مالتودکسترین به‌عنوان دیواره، تشکیل شده بودند. پس از آن، کنسانتره پروتئین آب‌پنیر در غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ (درصد وزنی/وزنی) ذرات تولیدشده را پوشانده و به‌دلیل ترکیبات تشکیل‌دهنده آن (بتالاکتوگلوبولین، آلفالاکتالبومین و آلبومین سرم گاوی) یک فعالیت آنتی‌اکسیدانی قوی ارائه می‌دهد [۲۱، ۴۷]. این بخش‌های پروتئینی دارای اسیدهای آمینه با پتانسیل

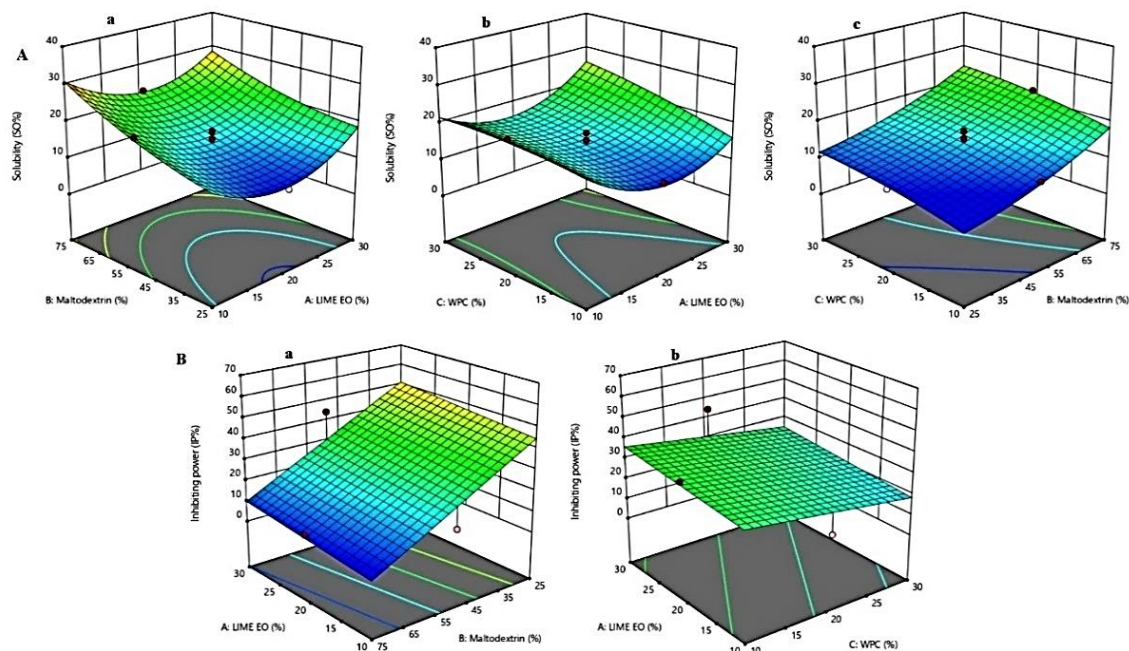
حلالیت آخرین مرحله انحلال ذرات و عاملی مهم در تعیین کیفیت پودر است. نقص در انحلال پودرهای محلول می‌تواند موجب بروز مشکلات فراوری و زیان اقتصادی شود [۵۰، ۵۱]. همان‌طور که در شکل A-۵ (c,b,a) نشان داده شده است، مدل درجه دوم برای برازش داده‌های تجربی پیشنهاد شد ($p < 0.05$). این مدل، اثر مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب‌پنیر اثر معناداری نشان دادند ($p < 0.05$). بر اساس شکل A-۵ (a)، حلالیت با افزایش غلظت مالتودکسترین افزایش یافت. از طرفی اثر متقابل اسانس و مالتودکسترین و نیز اثر متقابل مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب‌پنیر و اثر درجه دوم اسانس بر مقادیر حلالیت معنادار بود ($p < 0.05$). طبق جدول ۱، بالاترین میزان حلالیت (۳۳/۴٪) برای نمونه ۱۶ به‌دست آمد، درحالی‌که کمترین مقدار (۹٪) برای نمونه ۵ به‌دست آمد. بر اساس شکل A-۵ (c) اثر متقابل افزایش مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب‌پنیر منجر به افزایش حلالیت شد. حلالیت تحت‌تأثیر مواد دیواره‌ای و خواص سطحی ذرات متغیر است. اگرچه اسانس لیمو در آب نامحلول بود ولی مواد دیواره‌ای مورد استفاده برای محصورکردن اسانس، حلالیت آن را بهبود بخشید که مطابق با نتایج پژوهش Kaurar و همکاران (۲۰۲۱) بود [۵۰]. حلالیت بالای پودرهای حاصل‌شده می‌تواند با اجزای آب‌دوست مواد دیواره مرتبط باشد [۴۹، ۵۲]. هنگامی‌که مالتودکسترین در غلظت بالا حضور داشته باشد، به‌دلیل وجود بخش‌های آب‌دوست بیشتر، حلالیت به‌شدت تحت‌تأثیر این گروه‌های عملکردی قرار می‌گیرد [۲۱، ۴۹، ۵۳].

۱۳.۳. قدرت بازدارندگی

همان‌طور که در شکل B-۵ (a و b) نشان داده شده است، یک مدل خطی برای برازش داده‌های تجربی مهار رادیکال آزاد، پیشنهاد شد ($p < 0.05$). متغیرهای مستقل ازجمله مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب‌پنیر تأثیر معناداری بر مقادیر قدرت بازدارندگی داشتند ($p < 0.05$). با افزایش غلظت کنسانتره پروتئین آب‌پنیر (۱۰ تا ۳۰٪) و مالتودکسترین (۲۵ تا ۷۵٪) قدرت بازدارندگی کاهش یافت ($p < 0.05$). با توجه به جدول ۱، بیشترین مقدار بازدارندگی (۶۳/۶۴٪) برای نمونه ۱۸

[۵۴-۵۶]. می توان اعلام کرد که حرارت دیدن پلی ساکاریدها و پروتئین ها می تواند آنها را از طریق واکنش میلارد که به تولید ترکیبات آنتی اکسیدانی معروف است، به هم متصل کند [۶۰-۵۷].

آنتی اکسیدانی قوی هستند [۵۴]، بنابراین حضور کنسانتره پروتئین آب پنیر در فرایند پوشش دهی نهایی، فعالیت آنتی اکسیدانی اسانس به دام افتاده را حفظ کرد. پروتئین ها و توالی اسید آمینه آن ها به عنوان آنتی اکسیدان قوی شناخته شده اند



شکل ۵. نمودارهای کانتور سطحی سه بعدی RSM برای ارزیابی متغیرهای مستقل (غلظت اسانس لیموترش، مالتودکسترین و WPC؛ درصد) و تأثیر آنها بر متغیر وابسته حلالیت (SO) و قدرت بازدارندگی (IP)

Fig 5. 3D surface contour plots of RSM for evaluation of independent variables (Lime EO concentration, maltodextrin, and WPC; %) effects on the dependent variable Solubility (SO) and Inhibiting power (IP)

معنادار بود ($p < 0.05$). زمانی که غلظت مالتودکسترین افزایش یافت، مقدار رهاسازی کاهش معناداری داشت ($p < 0.05$). مقدار رهایش با افزایش غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر نسبت مستقیم و افزایش معناداری داشت ($p < 0.05$). طبق جدول ۱، کمترین میزان رهایش (۲۹٪/۵۶) برای نمونه ۱ و بیشترین میزان رهایش (۸۵٪/۴۸) برای نمونه ۹ (۱۰٪ اسانس، ۲۵٪ مالتودکسترین و ۳۰٪ پروتئین آب پنیر) به دست آمد. چنان که در مورد مقادیر راندمان درون پوشانی و ظرفیت بارگذاری ذکر شد، مقدار مواد دیواره ای برای پوشش و محصور کردن اسانس ها بسیار قابل توجه است و می تواند بر میزان به دام افتادن و بارگذاری تأثیر بگذارد [۳۳]. علاوه بر این، از آنجایی که لایه ها

۱۴.۳. رهایش

آزادسازی اسانس های ریزدرون پوشانی شده در دو شرایط مختلف (شرایط بافر و بزاق) ارزیابی شد.

۱.۱۴.۳. رهایش در محیط بافر

همان طور که در شکل ۶-۳ (a, b, c) پیداست، یک مدل درجه دوم برای برازش داده های تجربی پیشنهاد شد ($p < 0.05$). هر سه متغیر مستقل اثرات معناداری بر رهاسازی در محیط بافر داشتند ($p < 0.05$). اثر متقابل مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب پنیر و نیز اثر درجه دوم کنسانتره پروتئین آب پنیر بر رهایش در محیط بافر

در طول فرایند خشک کردن در سیستم خشک کن بستر شناور تشکیل شده اند، مقدار مواد دیواره می تواند بر آزادسازی اسانس های به دام افتاده یا غیرمحصور تأثیر بگذارد.

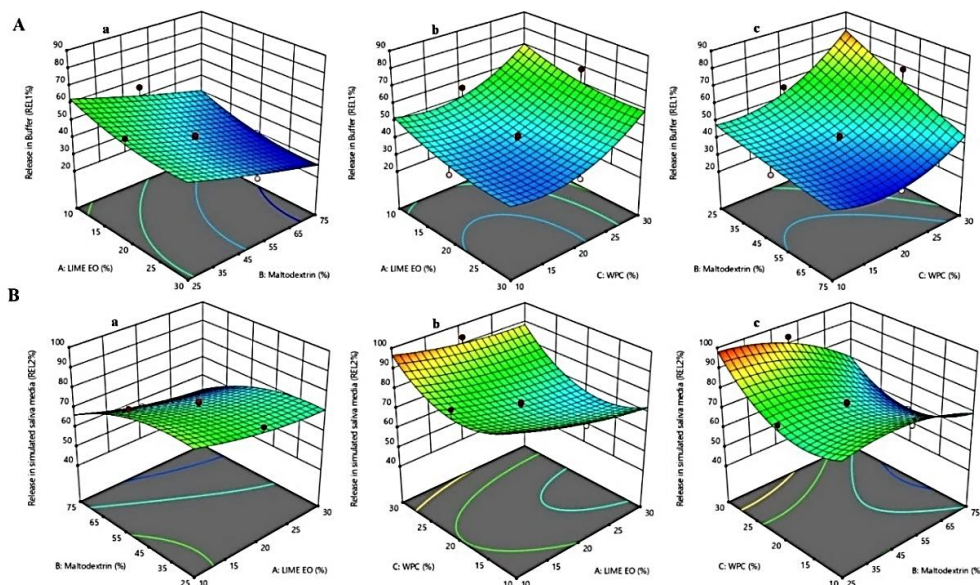
میکرو کریستالین سلولز به عنوان دیواره داخلی ساکن به کار رفته در بستر سیستم خشک کن بستر شناور، ثابت، سپس غلظت مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب پنیر می تواند بر مقدار رهائش تأثیر بگذارد [۳۳]. بر اساس گزارش ها، پارامترهای مختلفی از جمله مواد درون- پوشانی کننده، ماده درون پوشانی شده، هندسه و مورفولوژی درون پوشینه، شرایط رهائش (حلال، pH، قدرت یونی و دما) و تکنیک تولید ریز درون پوشینه، همگی بر مکانیسم های رهاسازی اثرگذار است [۴۵]. رهاسازی دو مرحله دارد، شامل رهاسازی انفجاری (مرحله اول) و رهاسازی آهسته (مرحله دوم) [۵۲]. گزارش شده است که در مورد بافر فسفات سالی (pH= ۷/۴)، انتشار اولیه در ۱۲ ساعت اول مشاهده شده است و اسانس نعناع فلفلی و اسانس چای به ترتیب تا ۳۵/۸ و ۵۷/۴٪ آزاد شدند [۵۲]. انتشار آهسته اسانس نعناع فلفلی و اسانس چای به ترتیب تا ۵۰/۷ و ۶۲/۹٪ در مرحله دوم به مدت ۷۲ ساعت بود [۵۲]. همان طور که پیش تر گزارش شد، نرخ رهائش در شرایط آزمایشگاهی پلی فنول های عصاره هسته انگور از ریز پوشینه های کنسانتره پروتئین آب پنیر: صمغ عربی به طور قابل توجهی کمتر از مالتودکسترین: کنسانتره پروتئین آب پنیر تحت مایع معده شبیه سازی شده در pH= ۱/۸ پس از ۱۲۰ دقیقه بود [۶۱]. اسانس های درون پوشانی نشده بر سطح ریز پوشینه ممکن است منبع فاز رهاسازی سریع و شاید ناشی از رشد پلیمرها باشند. پلیمرهای آب گریز در تماس با مایعات آبی شروع به هیدراته شدن می کنند. عناصر فعالی که نه از نظر شیمیایی و نه از نظر فیزیکی به ماتریس پیوند ندارند، می توانند به راحتی آزاد شوند، زیرا زنجیره پلیمری ناشی از این شرایط شل شده است [۱۴]. گزارش شده است که ریز پوشینه های صمغ عربی: کنسانتره پروتئین آب پنیر: مالتودکسترین بالاترین نرخ رهائش (۵۹٪) را داشتند و پس از آن ریز پوشینه های صمغ عربی: کنسانتره پروتئین آب پنیر (۴۴٪/۵۵) قرار داشتند [۱۴]. ریز پوشینه های پروتئین

آب پنیر: مالتودکسترین کمترین میزان رهاسازی (۱۷/۷۲٪) را داشتند. بر اساس گزارش ها، سرعت رهائش تحت تأثیر اندازه ذرات است. ترکیب پروتئین آب پنیر: مالتودکسترین به عنوان دیواره، ذراتی تولید کرد که کوچک تر بودند و سرعت رهائش کمتری داشتند؛ علاوه بر این، اشاره شد که با افزایش نسبت مالتودکسترین در فرمولاسیون مواد دیواره، سرعت رهائش مواد فعال کاهش داشت [۱۴].

۳.۱۴.۲. رهائش در محیط های شبیه سازی شده بزاق

همان طور که در شکل B-۶ (c,b,a) نشان داده شده است، یک مدل درجه دوم برای برازش داده های تجربی پیشنهاد شد ($p < 0.05$). هر سه متغیر مستقل تأثیر معناداری بر رهائش داشتند ($p < 0.05$). کنسانتره پروتئین آب پنیر و مالتودکسترین تأثیر قابل توجهی بر رهائش در شرایط شبیه سازی شده بزاق داشتند. همچنین، برهم کنش توأمان کنسانتره پروتئین آب پنیر و مالتودکسترین اثر معناداری داشت ($p < 0.05$). اثر درجه دوم کنسانتره پروتئین آب پنیر بر رهائش معنادار بود ($p < 0.05$). بر اساس شکل B-۶ (a)، با افزایش غلظت مالتودکسترین و اسانس، رهائش کاهش یافت. افزایش غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر اثر افزایشی بر رهاسازی داشت. طبق جدول ۱، کمترین مقدار رهائش در بزاق (۵۶/۸۹٪) برای نمونه ۱ و بیشترین مقدار آن (۱۰۰٪) برای نمونه ۹ به دست آمد.

مقادیر رهائش بیشتر می تواند به دلیل جذب اسانس بر سطوح ریز پوشینه به صورت درون پوشانی نشده، باشد. رهائش کمتر، به دنبال انتشار ترکیبات هسته از طریق لایه های پوشش سطحی، اجزای لایه هیدروکربنی و منافذ روی سطح است. فعل و انفعالات بین اسانس و همچنین مواد دیواره ای باید در نظر گرفته شود [۶۲]. از مزایای کنسانتره پروتئین - آب پنیر این است که می تواند نرخ رهاسازی مولکول های با اختلاف pH را از طریق گروه های کربوکسیل یا آمونیوم در زنجیره های پروتئینی تعیین کند که چگالی پروتون آنها را به اسیدیته و محیط خنثی تغییر می دهد [۶۳].



شکل ۶. نمودارهای کانتور سطحی سه بعدی RSM برای ارزیابی متغیرهای مستقل (غلظت اسانس لیموترش، مالتودکسترین و WPC؛ درصد) و تأثیر آنها بر متغیر وابسته رهایش در بافر (REL1) و رهایش در بزاق شبیه سازی شده (REL2).

Fig 6. RSM 3D surface contour plots to evaluate the independent variables (concentration of lemon essential oil, maltodextrin, and WPC; %) and their effect on the dependent variable of Release in buffer (REL1) and Release in simulated saliva media (REL2)

مناسب آنها و با نیمنگاهی به استانداردهای موجود و سایر منابع معتبر علمی و بررسی مجدد تمامی نتایج حاصله، بهینه یابی انجام شد. درنهایت مشخصات زیر با سطح مطلوبیت ۰/۴۹۲ برای دستیابی به نمونه بهینه معرفی شد. نمونه پیشنهادی در جدول ۲ خلاصه شده است:

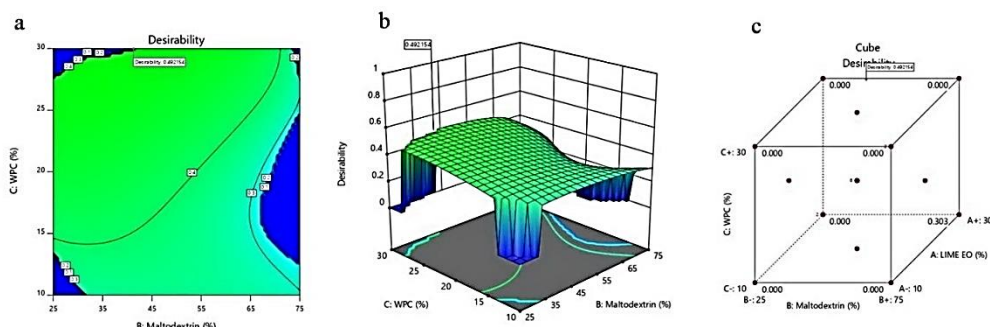
۱۵.۳. بهینه یابی

در این پژوهش، ۲۰ تیمار با توجه به ۳ متغیر مستقل با سه سطح متفاوت طراحی شده و با در نظر گرفتن اهداف تحقیق، نمونه بهینه ارزیابی شد. با توجه به پارامترهای مختلف و حد

جدول ۲. مشخصات نمونه بهینه

Table 2. Optimized sample specifications

Variables	Value
Lime EO%	29.68
Maltodextrin%	41.28
WPC%	30.00
Moisture content%	1.83
Hygroscopicity%	1.80
Encapsulation efficiency%	76.70
Encapsulation yield%	66.46
Loading capacity%	64.70
Bulk density (g/cm ³)	0.39
Tapped density (g/cm ³)	0.43
Particle density (g/cm ³)	1.28
Flowability index	7.98
Cohesiveness	1.08
Porosity	66.94
Solubility%	23.81
Inhibition power%	32.23
Release in buffer %	65.40
Release in simulated saliva%	92.74
Desirability	0.492



شکل ۷. نمودارهای کانتور سطحی سه بعدی RSM نمونه بهینه

Fig 7. RSM surface contour diagrams of the optimized sample 3D

منحصر به فردی برای تولید پودرهای ریزپوشینه‌شده حاوی مواد فرآور مثل اسانس‌ها باشد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

تشکر و قدردانی

از سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران (IROST) بابت ارائه امکانات آزمایشگاهی و از شرکت پارس اکسیر سبز آرون برای حمایت مالی و اهدای اسانس لیموترش سپاس‌گزاری می‌شود.

مراجع

- [1] Gaff, M., Esteban-Decloux, M., & Giampaoli, P. (2020). Bitter orange peel essential oil: A review of the different factors and chemical reactions influencing its composition. *Flavour Fragr. J.*, 35(3), 247–269.
<https://doi.org/10.1002/ffj.3570>
- [2] Karimirad, R., Behnamian, M., & Dezhsetan, S. (2020). Bitter orange oil incorporated into chitosan nanoparticles: Preparation, characterization and their potential application on antioxidant and antimicrobial characteristics of white button mushroom. *Food Hydrocolloid*, 100, 105387.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105387>
- [3] Zema, D. A., Calabrò, P. S., Folino, A., Tamburino, V., Zappia, G., & Zimbone, S. M. (2018). Valorisation of citrus processing waste: A review. *Waste Manag.*, 80, 252–273.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.024>

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از تکنیک خشک‌کن بستر شناور، تهیه پودر درون‌پوشانی‌شده اسانس لیموترش ایرانی، با استفاده از کنسانتره پروتئین آب‌پنیر و مالتودکسترین، به‌عنوان دیواره بهینه‌سازی شد. بهترین نتایج پارامترهای مورد ارزیابی زمانی به‌دست آمد که غلظت اسانس، مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب‌پنیر به‌ترتیب ۲۹/۶۸٪، ۴۱/۲۸٪ و ۳۰٪ در نظر گرفته شدند. نتایج نشان دادند که استفاده از مواد مناسب به‌عنوان دیواره ریزپوشینه‌ها همراه با روش خشک‌کردن بستر شناور می‌تواند روش

- [4] Gavahian, M., Chu, Y. H., & Mousavi Khaneghah, A. (2019). Recent advances in orange oil extraction: an opportunity for the valorisation of orange peel waste a review. *In J Food Sci Technol*, 54(4), 925–932.
<https://doi.org/10.1111/ijfs.13987>
- [5] Sahraoui, N., Vian, M. A., El Maataoui, M., Boutekedjiret, C., & Chemat, F. (2011). Valorization of citrus by-products using Microwave Steam Distillation (MSD). *Innov Food Sci Emerg Technol*, 12(2), 163–170.
<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.02.002>
- [6] Li, Y., Liu, S., Zhao, C., Zhang, Z., Nie, D., Tang, W., & Li, Y. (2022). The Chemical Composition and Antibacterial and Antioxidant Activities of Five Citrus Essential Oils. *Molecules*, 27(20), 7044
<https://doi.org/10.3390/molecules27207044>
- [7] Farahmandfar, R., Tirgarian, B., Dehghan, B., & Nemat, A. (2020). Comparison of different

drying methods on bitter orange (*Citrus aurantium* L.) peel waste: changes in physical (density and color) and essential oil (yield, composition, antioxidant and antibacterial) properties of powders. *J Food Meas Charact*, 14(2), 862-875. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00334-x>

[8] Taherimanesh, F., Hojjati, M., Barzegar, H., Mehrnia, M. A., & Alizadeh Behbahani, B. (2024). Investigating the chemical properties of *Mentha spicata* L. essential oil and the possibility of its using in mayonnaise as a natural antioxidant. *Food Processing and Preservation Journal*, 16(3), 79–99. [In Persian] <https://doi.org/10.22069/FPPJ.2024.22555.1817>

[9] Rahmati-Joneidabad, M. (2024). Identification of chemical compounds of *Ocimum basilicum* essential oil and its effect on inhibiting the growth of fungi causing postharvest rots in apple. *Research in Plant Metabolites*, 1(3), 5–20. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/JRPSM.2023.158874>

[10] Andrade, M. A., Barbosa, C. H., Shah, M. A., Ahmad, N., Vilarinho, F., Khwaldia, K., Silva, A. S., & Ramos, F. (2022). Citrus By-Products: Valuable Source of Bioactive Compounds for Food Applications. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 12(1), 38. <https://doi.org/10.3390/antiox12010038>

[11] Padilla-de la Rosa, J. D., Manzano-Alfaro, M. D., Gómez-Huerta, J. R., Arriola-Guevara, E., Guatemala-Morales, G., Cardador-Martínez, A., & Estarrón-Espinosa, M. (2021). Innovation in a Continuous System of Distillation by Steam to Obtain Essential Oil from Persian Lime Juice (*Citrus latifolia* Tanaka). *Molecules*, 26(14), 4172. <https://doi.org/10.3390/molecules26144172>

[12] Kaur, S., Panesar, P. S., & Chopra, H. K. (2023). Citrus processing by-products: an overlooked repository of bioactive compounds. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 63(1), 67–86. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1943647>

[13] Balakrishnan, M., Gayathiri, S., Preetha, P., Pandiselvam, R., Jeevarathinam, G., Delfiya, D. S. A., & Kothakota, A. (2021). Microencapsulation of bixin pigment by spray drying: Evaluation of characteristics. *LWT*, 145, 111343. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111343>

[14] Van, C. K., Nguyen, P. T. N., Nguyen, T. T. T., & Bach, L. G. (2024). Microencapsulation of *Citrus latifolia* peel essential oil by spray-drying

using maltodextrin: Characterization, antimicrobial activities, and release profile. *LWT*, 197, 115825. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115825>

[15] Ghasemi, S., Jafari, S. M., Assadpour, E., & Khomeiri, M. (2018). Nanoencapsulation of D-limonene within nanocarriers produced by pectin-whey protein complexes. *Food Hydrocolloid.*, 77, 152-162. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.09.030>

[16] Azhdarzadeh, F., & Hojjati, M. (2016). Chemical Composition and Antimicrobial Activity of Leaf, Ripe and Unripe Peel of Bitter Orange (*Citrus aurantium*) Essential Oils. *Nutr Food Sci Res.*, 3(1), 43–50. <https://doi.org/10.18869/acadpub.nfsr.3.1.43>

[17] Akhavan-Mahdavi, S., Sadeghi, R., Faridi Esfanjani, A., Hedayati, S., Shaddel, R., Dima, C., Malekjani, N., Boostani, S., & Jafari, S. M. (2022). Nanodelivery systems for d-limonene; techniques and applications. *Food Chem.*, 384, 132479. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132479>

[18] Rezvankhah, A., Emam-Djomeh, Z., & Askari, G. (2020). Encapsulation and delivery of bioactive compounds using spray and freeze-drying techniques: A review. *Dry Technol.*, 38, 235-258. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1653906>

[19] Campelo, P. H., Sanches, E. A., Fernandes, R. V. de B., Botrel, D. A., & Borges, S. V. (2018). Stability of lime essential oil microparticles produced with protein-carbohydrate blends. *Food Res Int.*, 105, 936-944. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.034>

[20] Ghasemi, S., Assadpour, E., Kharazmi, M. S., Jafarzadeh, S., Zargar, M., & Jafari, S. M. (2023). Encapsulation of Orange Peel Oil in Biopolymeric Nanocomposites to Control Its Release under Different Conditions. *Foods*, 12(4), 831. <https://doi.org/10.3390/foods12040831>

[21] Haas, K., Dohnal, T., Andreu, P., Zehetner, E., Kiesslich, A., Volkert, M., Fryer, P., & Jaeger, H. (2020). Particle engineering for improved stability and handling properties of carrot concentrate powders using fluidized bed granulation and agglomeration. *Powder Technol.*, 370, 104-115. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.065>

[22] Zaghari, L., Basiri, A., & Rahimi, S. (2020). Preparation and characterization of double coated probiotic bacteria via a fluid-bed process: A case

- study on *Lactobacillus reuteri*. *Int J Food Eng.*, 16(9), 20190384.
<https://doi.org/doi.org/10.1515/ijfe-2019-0384>
- [23] Velázquez-Contreras, C., Osorio-Revilla, G., & Gallardo-Velázquez, T. (2014). Encapsulation of Orange Essential Oil in a Spout-Fluid Bed Dryer with a Draft Tube on a Bed of Inert Solids. *Dry Technol.*, 32(14), 1718–1726.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2014.924525>
- [24] Razola-Díaz, M. del C., Guerra-Hernández, E. J., García-Villanova, B., & Verardo, V. (2021). Recent developments in extraction and encapsulation techniques of orange essential oil. *Food Chem.*, 354, 129575.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129575>
- [25] Benelli, L., & Oliveira, W. P. (2019). Fluidized bed coating of inert cores with a lipid-based system loaded with a polyphenol-rich *Rosmarinus officinalis* extract. *Food Bioprod Process.*, 114, 216–226.
<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.01.004>
- [26] Arem, Y. G., Morais, M. S., Oliveira, W. P. (2024). Optimized spouted bed production of antioxidant dried powder from green tea. *Dry Technol.* 42(5), 795–811.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2318437>
- [27] Jayatunga, G. K., Amarasinghe, B. M. W. P. K. (2023). Influence of Draft Tube on Drying Behaviour of Black Pepper in Spouted Bed. *Moratuwa Eng Res Conf MERCon.* 183–8.
- [28] Souza, C. R. F., Fregonesi, F., Oliveira, W. P. (2025). Bioactive dry extract production from *Hymenaea courbaril* L. bark via spouted bed drying. *Can J Chem Eng.*, 103(4), 1562–1581.
<https://doi.org/10.1002/cjce.25286>
- [29] Sharifpour, A., Javanmard Dakheli, M. J., Rahimi, S., Bassiri, A. (2025). Optimization of bitter orange (*Citrus aurantium* L.) essential oil microencapsulation through spout fluidized bed drying. *J Food Meas Charact.*, 19, 89–107.
<https://doi.org/10.1007/s11694-024-02948-2>
- [30] Álvarez-Henao, M. V., Saavedra, N., Medina, S., Jiménez Cartagena, C., Alzate, L. M., & Londoño-Londoño, J. (2018). Microencapsulation of lutein by spray-drying: Characterization and stability analyses to promote its use as a functional ingredient. *Food Chem.*, 256, 181–187.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.059>
- [31] Jafari, S. M., Assadpoor, E., He, Y., & Bhandari, B. (2008). Encapsulation efficiency of food flavours and oils during spray drying. *Dry Technol.*, 26 (7), 816–835.
<https://doi.org/10.1080/07373930802135972>
- [32] Bringas-Lantigua, M., Expósito-Molina, I., Reineccius, G. A., López-Hernández, O., & Pino, J. A. (2011). Influence of Spray-Dryer Air Temperatures on Encapsulated Mandarin Oil. *Dry Technol.*, 29(5), 520–526.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2010.513780>
- [33] Rezende, Y. R. R. S., Nogueira, J. P., & Narain, N. (2018). Microencapsulation of extracts of bioactive compounds obtained from acerola (*Malpighia emarginata* DC) pulp and residue by spray and freeze drying: Chemical, morphological and chemometric characterization. *Food Chem.*, 254, 281–291.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.026>
- [34] Santhalakshmy, S., Don Bosco, S. J., Francis, S., & Sabeena, M. (2015). Effect of inlet temperature on physicochemical properties of spray-dried jamun fruit juice powder. *Powder Technol.*, 274, 37–43.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.01.016>
- [35] Radünz, M., da Trindade, M. L. M., Camargo, T. M., Radünz, A. L., Borges, C. D., Gandra, E. A., & Helbig, E. (2019). Antimicrobial and antioxidant activity of unencapsulated and encapsulated clove (*Syzygium aromaticum*, L.) essential oil. *Food Chem.*, 276, 180–186.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.173>
- [36] Dima, C., Pătrașcu, L., Cantaragiu, A., Alexe, P., & Dima, Ș. (2016). The kinetics of the swelling process and the release mechanisms of *Coriandrum sativum* L. essential oil from chitosan/alginate/inulin microcapsules. *Food Chem.*, 195, 39–48.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.044>
- [37] Chen, L., Wang, Z., Liao, P., Li, A., Zhang, Y., Li, H., & Sun, J. (2021). The effect of saliva on the aroma release of esters in simulated baijiu under the impact of high ethanol concentration. *J Food Compos Anal.*, 104, 104134.
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104134>
- [38] Rezvankhah, A., Emam-Djomeh, Z., Safari, M., Salami, M., & Askari, G. (2022). Investigating the effects of maltodextrin, gum arabic, and whey protein concentrate on the microencapsulation efficiency and oxidation stability of hemp seed oil. *J Food Process Preserv.*, 46(6), e16554.
<https://doi.org/10.1111/jfpp.16554>

- [39] Carneiro, H. C. F., Tonon, R. V., Grosso, C. R. F., & Hubinger, M. D. (2013). Encapsulation efficiency and oxidative stability of flaxseed oil microencapsulated by spray drying using different combinations of wall materials. *J Food Eng.*, 115(4), 443-451.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.033>
- [40] Thuong Nhan, N. P., Thanh, V. T., Cang, M. H., Lam, T. D., Huong, N. C., Hong Nhan, L. T., Truc, T. T., Tran, Q. T., & Bach, L. G. (2020). Microencapsulation of lemongrass (cymbopogon citratus) essential oil via spray drying: Effects of feed emulsion parameters. *Process.*, 8(1), 40
<https://doi.org/10.3390/pr8010040>
- [41] Ozdemir, N., Bayrak, A., Tat, T., Altay, F., Kiralan, M., & Kurt, A. (2021). Microencapsulation of basil essential oil: utilization of gum arabic/whey protein isolate/maltodextrin combinations for encapsulation efficiency and in vitro release. *J Food Meas Charact.*, 15(2), 1865-1876.
<https://doi.org/10.1007/s11694-020-00771-z>
- [42] De Araújo, J. S. F., de Souza, E. L., Oliveira, J. R., Gomes, A. C. A., Kotzebue, L. R. V., da Silva Agostini, D. L., de Oliveira, D. L. V., Mazzetto, S. E., da Silva, A. L., & Cavalcanti, M. T. (2020a). Microencapsulation of sweet orange essential oil (Citrus aurantium var. dulcis) by liophylation using maltodextrin and maltodextrin/gelatin mixtures: Preparation, characterization, antimicrobial and antioxidant activities. *Int J Biol Macromol.*, 15(143), 991-999.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.09.160>
- [43] De Barros Fernandes, R. V., Marques, G. R., Borges, S. V., & Botrel, D. A. (2014). Effect of solids content and oil load on the microencapsulation process of rosemary essential oil. *Ind Crop Prod.*, 58, 173-181.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.04.025>
- [44] Aksoylu Özbek, Z., & Günç Ergönül, P. (2020). Optimisation of wall material composition of freeze-dried pumpkin seed oil microcapsules: Interaction effects of whey protein, maltodextrin, and gum Arabic by D-optimal mixture design approach. *Food Hydrocolloid.*, 107, 105909.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105909>
- [45] Fernandes, R. V. de B., Borges, S. V., Silva, E. K., da Silva, Y. F., de Souza, H. J. B., do Carmo, E. L., de Oliveira, C. R., Yoshida, M. I., & Botrel, D. A. (2016). Study of ultrasound-assisted emulsions on microencapsulation of ginger essential oil by spray drying. *Ind Crop Prod.*, 94, 413-423.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.010>
- [46] Fernandes, R. V. D. B., Borges, S. V., & Botrel, D. A. (2014). Gum arabic/starch/maltodextrin/inulin as wall materials on the microencapsulation of rosemary essential oil. *Carbohydr Polym.*, 101(1), 524-532.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.09.083>
- [47] Bajac, J., Nikolovski, B., Lončarević, I., Petrović, J., Bajac, B., Đurović, S., & Petrović, L. (2022). Microencapsulation of juniper berry essential oil (Juniperus communis L.) by spray drying: microcapsule characterization and release kinetics of the oil. *Food Hydrocolloid.*, 125, 107430.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107430>
- [48] De Araújo, J. S. F., de Souza, E. L., Oliveira, J. R., A. C. Gomes, A., Kotzebue, L. R. V., da Silva Agostini, D. L., de Oliveira, D. L. V., Mazzetto, S. E., da Silva, A. L., & Cavalcanti, M. T. (2020b). Microencapsulation of sweet orange essential oil (Citrus aurantium var. dulcis) by liophylation using maltodextrin and maltodextrin/gelatin mixtures: preparation, characterization, antimicrobial and antioxidant activities. *Int. J. Biol. Macromol.*, 143, 991-999.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.09.160>
- [49] Baysan, U., Elmas, F., & Koç, M. (2019). The effect of spray drying conditions on physicochemical properties of encapsulated propolis powder. *J Food Process Eng.*, 42(4), e13024.
<https://doi.org/10.1111/jfpe.13024>
- [50] Karrar, E., Mahdi, A. A., Sheth, S., Mohamed Ahmed, I. A., Manzoor, M. F., Wei, W., & Wang, X. (2021). Effect of maltodextrin combination with gum arabic and whey protein isolate on the microencapsulation of gurum seed oil using a spray-drying method. *Int J Biol Macromol.*, 171, 208-216.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.045>
- [51] Santos, N. C., Almeida, R. L. J., de Brito, A. C. O., Silva, V. M. de A., de Lima, T. L. B., Nogueira, L. P. da S., de Sousa, F. M., dos Santos, F. S., Filho, M. T. L., de Moraes, M. S., de Oliveira, A. P., Silva, S. do N., Dias, R. A. de L., & de Santana, M. de F. S. (2024). Encapsulation of avocado oil with modified rice starch: thermal and functional properties and gastrointestinal release. *J Food Meas Charact.*, 18(6), 4665-4677.

<https://doi.org/10.1007/s11694-024-02522-w>

[52] Shetta, A., Kegere, J., & Mamdouh, W. (2019). Comparative study of encapsulated peppermint and green tea essential oils in chitosan nanoparticles: Encapsulation, thermal stability, in-vitro release, antioxidant and antibacterial activities. *Int J Biol Macromol.*, 126, 731-742.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.161>

[53] Noghabi, M. S., Molaveisi, M., & Dehnad, D. (2023). Development of Persian gum-based microcapsules to speed up the release of cinnamon essential oil in the simulated saliva conditions. *LWT*, 183, 114802.

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114802>

[54] Rezvankhah, A., Yarmand, M. S., Ghanbarzadeh, B., & Mirzaee, H. (2023). Development of lentil peptides with potent antioxidant, antihypertensive, and antidiabetic activities along with umami taste. *Food Sci Nutr.*, 11(6), 2974-2989.

<https://doi.org/10.1002/fsn3.3279>

[55] Mirzaee, H., Ahmadi Gavlighi, H., Nikoo, M., Udenigwe, C. C., & Khodaiyan, F. (2023). Relation of amino acid composition, hydrophobicity, and molecular weight with antidiabetic, antihypertensive, and antioxidant properties of mixtures of corn gluten and soy protein hydrolysates. *Food Sci Nutr.*, 11(3), 1257-1271.

<https://doi.org/10.1002/fsn3.3160>

[56] Rezvankhah, A., Yarmand, M. S., Ghanbarzadeh, B., & Mirzaee, H. (2021). Characterization of bioactive peptides produced from green lentil (*Lens culinaris*) seed protein concentrate using Alcalase and Flavourzyme in single and sequential hydrolysis. *J Food Process Preserv.*, 45(11), 1-16.

<https://doi.org/10.1111/jfpp.15932>

[57] Rezvankhah, A., Ghanbarzadeh, B., Mirzaee, H., Ahmadi Hassan Abad, A., Tavakkoli, A., & Yarmand, A. (2024). Conjugation of gum Arabic and lentil protein hydrolysates through Maillard reaction: Antioxidant activity, volatile compounds, functional and sensory properties. *Food Sci Nutr.*, 12(4), 2855-2873.

<https://doi.org/10.1002/fsn3.3966>

[58] Ni, Z. J., Liu, X., Xia, B., Hu, L. T., Thakur, K., & Wei, Z. J. (2021). Effects of sugars on the flavor and antioxidant properties of the Maillard reaction products of camellia seed meals. *Food Chem.: X*, 11, 100127.

<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2021.100127>

[59] Ferrari, C. C., Marconi Germer, S. P., Alvim, I. D., & de Aguirre, J. M. (2013). Storage Stability of Spray-Dried Blackberry Powder Produced with Maltodextrin or Gum Arabic. *Dry Technol.*, 31(4), 470-478.

<https://doi.org/10.1080/07373937.2012.742103>

[60] Zhang, Z., Wang, B., & Adhikari, B. (2022). Maillard reaction between pea protein isolate and maltodextrin via wet-heating route for emulsion stabilisation. *Future Food.*, 6, 100193.

<https://doi.org/10.1016/j.fufo.2022.100193>

[61] Yadav, K., Bajaj, R. K., Mandal, S., & Mann, B. (2020). Encapsulation of grape seed extract phenolics using whey protein concentrate, maltodextrin and gum arabica blends. *J Food Sci Technol.*, 57(2), 426-434.

<https://doi.org/10.1007/s13197-019-04070-4>

[62] Hasani, S., Ojagh, S. M., & Ghorbani, M. (2018). Nanoencapsulation of lemon essential oil in Chitosan-Hicap system. Part 1: Study on its physical and structural characteristics. *Int J Biol Macromol.*, 115, 143-151.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.038>

[63] Bannikova, A., Zyainitdinov, D., Evteev, A., Drevko, Y., & Evdokimov, I. (2020). Microencapsulation of polyphenols and xylooligosaccharides from oat bran in whey protein-maltodextrin complex coacervates: In-vitro evaluation and controlled release. *Bioact Carbohydr Diet Fibre*, 23, 100236.

<https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2020.100236>