



Original Article

Safranal Microencapsulation by Co-Precipitation Method with Gum Arabic and Investigation of Antimicrobial Activity

Iman Yousefi Javan^{*1}, Somayeh Sadat Eslami Shokuh², Mehdi Dadmehr³

1- Assistant Professor, Department of Plant Production, University of Torbat Heydariyeh, Torbat Heydariyeh, Iran.

2- M.Sc. Student, Department of Plant Production, University of Torbat Heydariyeh, Torbat Heydariyeh, Iran.

3- Associate Professor, Department of Biology, Payam Noor University, Tehran, Iran.

*Corresponding author Email: I.Javan@torbath.ac.ir

Received 18 February 2025; Accepted 23 April 2025

Extended Abstract

Introduction: Saffron, the most expensive spice in the world, is derived from the red stigmas of *Crocus sativus* L. (Iridaceae family). This valuable spice is important due to bioactive compounds like crocin, crocetin, and safranal. Among them, safranal is particularly noted for its antimicrobial and antioxidant properties. However, these compounds are unstable under environmental factors, limiting their application.

Encapsulation is an effective method for protecting bioactive compounds against environmental factors and achieving controlled release. It helps prevent evaporation and degradation by forming a protective layer, improving the stability of these compounds. This study explores the microencapsulation of safranal with Arabic gum and evaluates its antimicrobial activity.

Materials and Methods: This study aimed to microencapsulate safranal using Arabic gum as a biocompatible carrier. A 2.5% w/v Arabic gum solution was prepared with deionized water. Safranal was added at varying weight ratios (1:0, 1:1, 1:3, 1:5, 1:7, 1:9). The base solution was centrifuged at 600 rpm for 2 hours to remove impurities. After continuous stirring, safranal/Arabic gum microcapsules were formed by oven drying into a fine powder. The characteristics of the microcapsules, including particle size (DLS), structure (FTIR), crystallinity (XRD), encapsulation efficiency, and loading capacity, were evaluated.

Results and Discussion: Safranal microcapsules were produced using β -cyclodextrin (β -CD) as the wall material and gum arabic (GA) as the emulsifier in a co-precipitation method. At the optimized safranal to gum arabic ratio (1:3, w/w), the encapsulation efficiency reached 87.61%, and the average particle size was 8.20

µm. FTIR analysis confirmed the functional groups in safranal and gum arabic, indicating no new chemical reactions. These results show gum arabic acted as a carrier/emulsifier. DLS analysis confirmed uniform particle size, while XRD revealed a crystalline structure. Antimicrobial testing showed significant inhibitory effects against *Botryodiplodia theobromae* and *Colletotrichum gloeosporioides*. Additionally, loading capacity and encapsulation efficiency improved under optimized conditions.

Conclusion: This study showed that microencapsulation of safranal using Arabic gum as a biocompatible carrier effectively enhances its stability. The incorporation of Arabic gum improved particle stability and prevented oxidation and degradation of safranal. The produced microcapsules exhibited significant antimicrobial activity against fungal pathogens, suggesting their potential use in the pharmaceutical and food industries. Release profile evaluation demonstrated that Arabic gum as the encapsulation matrix allows precise control of the release rate under varying conditions. In conclusion, this research highlights the role of Arabic gum as a natural biopolymer in developing advanced microencapsulation systems, improving the therapeutic and protective properties of bioactive compounds like safranal for industrial applications.

Conflict of Interest: The authors declare no potential conflict of interest related to the work.

Keywords: Antimicrobial activity, Controlled release, Gum arabic, Microcapsule, Microencapsulation, Safranal.



نشریه پژوهش‌های زعفران (دو فصلنامه)

جلد دوازدهم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۴۰۳

شماره صفحه: ۳۴۵ - ۳۲۹

 <http://dx.doi.org/10.22077/jsr.2025.8982.1264>

مقاله پژوهشی

ریزپوشانی سافرانال به روش هم‌رسوبی با صمغ عربی و بررسی فعالیت ضد میکروبی

ایمان یوسفی جوان^{۱*}، سمیه سادات اسلامی شکوه^۲، مهدی دادمهر^۳

۱- استادیار، گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران.

۳- دانشیار، گروه زیست شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: Email: I.Javan@torbath.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳

چکیده

در این پژوهش، خواص ضد میکروبی سافرانال زعفران و کپسوله‌سازی آن با β -سیکلودکسترین (β -CD) به عنوان دیواره و صمغ عربی (GA) به عنوان امولسیفایر با روش رسوب همزمان بررسی شد. تأثیر صمغ عربی بر میزان کپسوله‌سازی، اندازه ذرات، سرعت رهاسازی و ویژگی‌های ساختاری میکروکپسول‌ها ارزیابی گردید. در نسبت بهینه سافرانال به صمغ عربی (۱:۳ w/w)، میزان کپسوله‌سازی ۸۷/۶۱ درصد و اندازه متوسط ذرات ۸/۲۰ میکرومتر به دست آمد. تحلیل FTIR نشان داد که صمغ عربی تنها نقش امولسیفایر دارد و بر ساختار شیمیایی β -CD تأثیر نمی‌گذارد. بررسی DLS توزیع یکنواخت ذرات و XRD حفظ ساختار بلوری سافرانال را تأیید کرد. فعالیت ضد میکروبی سافرانال و میکروکپسول‌های آن علیه *Botryodiplodia theobromae* و *Colletotrichum gloeosporioides* بررسی شد و نتایج نشان داد که کپسوله‌سازی موجب بهبود ظرفیت بارگذاری و راندمان کپسوله‌سازی می‌شود. این پژوهش نشان داد که استفاده از β -CD و صمغ عربی می‌تواند موجب تثبیت و حفظ خواص ضد میکروبی سافرانال شود و رهاسازی را کنترل کند. این ویژگی‌ها، کپسوله‌سازی سافرانال را برای کاربرد در صنایع دارویی و غذایی مناسب می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: رهاسازی کنترل‌شده، سافرانال، صمغ عربی، فعالیت ضد میکروبی، میکروکپسوله‌سازی.

مقدمه

زعفران، ادویه‌ای گران بها است که از کلاله‌های قرمز گل (*Crocus sativus* L.)، متعلق به خانواده (*Iridaceae*)، استخراج می‌شود. این ادویه، به‌عنوان ارزشمندترین و گران‌قیمت‌ترین ادویه در سطح جهانی شناخته شده است (Ghesm et al., 2021). این گیاه یک گونه چندساله و ژئوفیت-تریپلوئید است، که می‌تواند چرخه‌ی زندگی خود را بین ۸ تا ۱۴ سال ادامه دهد (koochaki et al., 2015). مطالعات فارماکولوژیکی نشان می‌دهند که عصاره زعفران دارای اثرات ضدتوموری، جمع‌آوری رادیکال‌های آزاد و کاهش دهنده چربی خون می‌باشد. در زعفران، حدود ۱۵۰ ترکیب فرار و غیرفرار و تقریباً ۵۰ ترکیب آلی شناسایی شده است. کاروتنوئیدهای محلول در آب به‌ویژه کروستین، از ویژگی‌های برجسته زعفران که باعث قرمزی زعفران می‌شود. همچنین، گلیکوزید پیکروکروستین مسئول تلخی آن بوده و سافرانال خواص عطر و بوی زعفران را فراهم می‌آورد (Hosseinzadeh et al., 2022). ترکیبات کلیدی زعفران شامل کروستین، کروستین، پیکروکروستین و سافرانال، به دلیل برخورداری از فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی چشمگیر، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند (Asimopoulou et al., 2005; Kanakis et al., 2007; Chen et al., 2008).

از سوی دیگر، سافرانال به دلیل ویژگی‌های برجسته ضد میکروبی، مورد توجه محققان قرار گرفته است. سافرانال با فرمول شیمیایی $(C_{10}H_{14}O)$ و نام کامل 2,6,6-Trimethylcyclohexa-1,3-diene-1-carbaldehydecaboxaldehyde، یک آلدئید حلقوی ترپنیک است که از هیدرولیز پیکروکروستین حاصل می‌شود. این ترکیب، علاوه بر حضور در زعفران (*Crocus sativus* L.)، در گونه‌های دیگری از خانواده گل‌گندم (*Centaurea*) نیز یافت می‌شود. پژوهش‌های گسترده نشان داده‌اند که سافرانال اثرات چند جانبه‌ای از جمله فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی، متابولیکی، ضد فشار خون، و بهبود سلامت جنسی و پوست را دارا است. این ترکیب که حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد اجزای فرار زعفران را تشکیل می‌دهد، عامل اصلی عطر و بوی متمایز این گیاه محسوب می‌شود. عطر زعفران عمدتاً در نتیجه فرایندهای تخریب آنزیمی و حرارتی که در طول نگهداری کلاله‌ها رخ می‌دهد، ایجاد می‌شود (Rezaee et al., 2013). مطالعات پیشین نشان داده است که عصاره‌های مختلف از بخش‌های مختلف گیاه زعفران دارای ترکیبات

فنلی و فلاونوئیدی با فعالیت‌های ضدباکتریایی قابل توجهی هستند (Modi et al., 2020).

تکنیک میکروکپسولاسیون، به‌عنوان یک فناوری پیشرفته در صنایع غذایی و دارویی، به‌منظور محافظت از آنزیم‌ها، حفظ طعم و کیفیت مواد کپسوله‌شده، و کنترل دقیق آزادسازی ترکیبات فعال مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از روش‌های مؤثر این فناوری، میکروکپسولاسیون به روش توده‌ای بوده که بر اساس تشکیل کمپلکس‌های بین پلیمرهای دارای بار مخالف صورت می‌پذیرد. در این روش، مواد اولیه‌ای نظیر ژلاتین و صمغ عربی کاربرد دارند (Alavi Talab, 2012). این فرآیند نه‌تنها پایداری هسته را بهبود می‌بخشد، بلکه دوام ترکیبات فعال را افزایش می‌دهد (Drusch et al., 2008). زعفران به‌عنوان یک گیاه دارویی معطر، حاوی ترکیبات زیست فعال ارزشمندی است که نسبت به عوامل محیطی حساس است. یکی از چالش‌های اصلی در بهره‌برداری از این ترکیبات، ناپایداری آن‌ها در شرایط محیطی است. از این رو میکروکپسولاسیون به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود پایداری این اجزا پیشنهاد شده است. در همین زمینه، (Hakimzadeh et al., 2023) نشان دادند که استفاده از تکنیک‌های خشک کردن مانند روش‌های انجمادی و پاششی، تأثیر قابل توجهی در کاهش رطوبت و فعالیت میکروبی عصاره‌ی زعفران دارد.

در کپسوله‌سازی ترکیبات زیستی زعفران، این تکنیک به کاهش تخریب حرارتی و جلوگیری از رهاسازی ناخواسته کمک می‌کند. عوامل کلیدی مانند ویژگی‌های ساختاری دیواره و هسته، پایداری ماتریس حامل، واکنش‌پذیری در برابر محیط و هزینه‌های فرآیند، تعیین‌کننده موفقیت این فناوری هستند (Ozkan et al., 2014; Galland, 2013).

صمغ عربی، یک پلی‌ساکارید پیچیده از نوع آرابینوگالاکتان با ساختاری شاخه‌ای است که به‌عنوان یک پلیمر زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر شناخته می‌شود. این ماده با حلالیت بالا تا غلظت ۵۰ درصد در آب، در محیط‌های با pH خنثی به راحتی تفکیک شده و تعداد قابل توجهی گروه‌هایی با بار منفی را آزاد می‌کند (Hosseini et al., 2015). علاوه بر این، صمغ عربی به‌عنوان یک پلی‌ساکارید مقرون به‌صرفه، غیرسمی، و زیست‌تجزیه‌پذیر، نقش کلیدی در تحقیقات دارویی و صنایع غذایی ایفا می‌کند (Jain et al., 2015).

تخریب کاهش می دهد (Díaz-Torres et al., 2021). تکنیک کپسولاسیون در سال های اخیر پیشرفت چشمگیری داشته و به طور گسترده در حوزه های مختلفی مانند صنایع دارویی و غذایی مورد استفاده قرار گرفته است (Ubbink and Krüger, 2006). این روش به منظور محافظت از ترکیبات زیست فعال به کار می رود و با ایجاد یک پوشش محافظ، از این ترکیبات در برابر شرایط نامساعد محیطی طی مراحل مختلف محافظت می کند. همچنین، کپسوله سازی امکان کنترل آزادسازی ترکیبات فعال را در محل های هدف، فراهم می سازد (Liu et al., 2021).

ریزپوشانی ترکیبات زیست فعال به عنوان روشی مؤثر برای حفظ و افزایش پایداری این ترکیبات در برابر عوامل محیطی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. سافرانال، یکی از ترکیبات اصلی زعفران، به دلیل خواص آنتی اکسیدانی، ضد التهابی و ضد میکروبی خود، در صنایع غذایی و دارویی کاربردهای بالقوه ای دارد. با این حال، ناپایداری سافرانال در شرایط محیطی نظیر نور، حرارت و اکسیژن، استفاده مستقیم از آن را محدود می کند. استفاده از صمغ عربی به عنوان حامل طبیعی در فرآیند میکروکپسول سازی، راهکاری مناسب برای محافظت از سافرانال و کنترل رهاسازی آن می باشد. این مطالعه با هدف بررسی ریزپوشانی سافرانال با صمغ عربی، و ارزیابی فعالیت ضد میکروبی آن انجام شده است.

مواد و روش ها

در این پژوهش، ترکیب سافرانال که به عنوان مولفه کلیدی زیست فعال زعفران شناخته می شود و در ایجاد رایحه منحصربه فرد و برخی خواص درمانی و آنتی اکسیدانی آن نقش دارد، از شرکت دانش بنیان فرآورده های زعفران ایرانی تأمین گردید. این ترکیب، مطابق با بالاترین استانداردهای شیمیایی و بیولوژیکی، نظیر استانداردهای سازمان دارویی ایالات متحده (USP)، استانداردهای کیفیت دارویی اروپا (EP)، و استانداردهای سازمان جهانی بهداشت (WHO) تأمین و تحت شرایط دقیق ایزوله سازی و کنترل محیطی نگهداری شد تا از انحراف در داده های جلوگیری شود.

برای طراحی یک حامل زیست سازگار و کارآمد، از صمغ عربی (*Acacia senegal*) به عنوان یک پلیمر طبیعی چندکاره استفاده گردید. این بیوپلیمر، به دلیل انحلال پذیری بالا، خواص رئولوژیکی مطلوب، و پایداری ساختاری در سیستم های آبی شناخته شده و از شرکت صمغ ایرانیان با

فناوری میکروکپسول سازی به طور گسترده ای در تولید منسوجات ضد میکروبی مورد استفاده قرار می گیرد، زیرا رهایش تدریجی و ویژگیهای جداسازی، امکان حفظ فعالیت ضد میکروبی را برای مدت طولانی فراهم می کند (Jyothi et al., 2010). از جمله تکنیک های رایج در تکمیل خواص ضد میکروبی می توان به روش اشباع (Prabhakar et al., 2022)، اصلاح فیبر (Zhou et al., 2021) و پوشش پارچه (Vishwakarma et al., 2022) اشاره کرد. در این میان، روش اشباع به دلیل سادگی و تأثیر کم بر ترکیبات فعال، به ویژه در فناوری ریزپوشانی اسانس ها، کاربرد گسترده ای دارد.

در نهایت، کپسوله سازی فرایندی است که در آن یک ترکیب فعال درون ماده ای دیگر به نام "مواد دیواری" محصور می شود. این فرایند با ایجاد یک لایه محافظ پیوسته، علاوه بر حفاظت از ماده فعال، امکان تولید ذراتی با اندازه های متنوع از چند نانومتر تا چند میلی متر را فراهم می کند (Dumitraşcu et al., 2021; Davidov-Pardo et al., 2015).

مواد مورد استفاده برای طراحی پوسته های محافظ، باید زیست تخریب پذیر و دارای درجه ایمنی غذایی و همچنین قادر به ایجاد سد موثری میان فاز داخلی و محیط اطراف آن باشند. پلی ساکاریدها، پروتئین ها و لیپیدها از جمله موادی هستند که برای کپسوله سازی به کار می روند (Fang and Bhandari, 2010).

از میان روش های کپسوله سازی، رسوب همزمان به دلیل انعطاف پذیری، پایداری و به ویژه اقتصادی بودن، به طور گسترده در صنایع مرتبط با متابولیت های ثانویه و آپوکارتونوئیدها استفاده می شود (Gouin, 2004). این فناوری می تواند تثبیت ترکیبات دارویی را افزایش داده و از آن ها در برابر عوامل محیطی نامطلوب محافظت کند.

تکنیک های کپسوله سازی به عنوان روشی مؤثر برای حفاظت از ترکیبات زیستی فعال در برابر فرایندهای نامطلوب و شرایط محیطی، و همچنین برای انتشار کنترل شده و پایدار در مکان های مؤثر به کار گرفته می شوند (Khazaei et al., 2016).

علاوه بر این، کپسوله سازی روشی کارآمد برای رفع مشکلات ناپایداری فیزیکی و شیمیایی ترکیبات می باشد. این فرآیند، علاوه بر جلوگیری از تبخیر ترکیبات، با ایجاد یک لایه محافظ، آنها را در برابر شرایط محیطی نامطلوب محافظت می کند و حساسیت ترکیبات زیست فعال و مواد گیاهی را به

محلول پایه ایجاد شود، به آرامی، همچنین به صورت تدریجی به سیستم افزوده شد. در ادامه، برای دستیابی به غلظت ۱ درصد وزنی-حجمی (w/v)، اتانول مطلق به محلول تزریق گردید سپس، سافرانال به صورت قطره‌قطره و در حین هم‌زدن در ۱۰۰۰ دور در دقیقه و در دمای ثابت ۴۰ درجه سانتی‌گراد اضافه گردید. این مرحله، که به مدت ۶ ساعت ادامه یافت، شرایط ایده‌آلی برای تولید سوسپانسیونی پایدار را فراهم آورد.

سپس، مخلوط‌های به‌دست‌آمده به دمای تعادل رسانده شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری گردید تا فرایند تشکیل کمپلکس‌ها و رسوب‌دهی به طور کامل انجام شود. در نهایت، محصول نهایی که شامل کمپلکس‌های پایدار سافرانال/صمغ عربی بود، با استفاده از فیلتراسیون تحت خلاء و غشاهای میکرولیتراسیون با منافذ ۰/۲۲ میکرون جداسازی گردید. عملیات شست‌وشو با اتانول به منظور افزایش خلوص و حذف ترکیبات اضافی انجام گرفت.

خشک‌سازی محصول در آون خلاء با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام پذیرفت، تا رطوبت به‌طور کامل حذف و پایداری محصول تضمین شود. محصول نهایی به‌صورت پودری ریزدانه و پایدار، با عنوان ریزکپسول سافرانال-صمغ عربی، برای تحلیل‌های تخصصی‌تر ذخیره‌سازی شد. حال این ریزکپسول‌ها هم‌زمان سافرانال را در کنار صمغ عربی دارند و می‌توان از خاصیت سافرانال به شکل مضاعف استفاده نمود (Khatibi et al., 2021).

برای بررسی رهایش سافرانال از میکروکپسول‌های حاوی صمغ عربی، نمونه‌هایی از میکروکپسول‌ها در محیط رهایش با PH ۷ قرار داده شدند. این محیط به‌منظور شبیه‌سازی شرایط فیزیولوژیکی و بررسی آزادسازی تدریجی ترکیب فعال انتخاب گردید. نمونه‌ها در دمای 37 ± 5 درجه سانتی‌گراد درون یک حمام ترموستاتیک نگهداری شدند و برای جلوگیری از ته‌نشینی، به آرامی روی همزن مغناطیسی با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه هم‌زده شدند.

در فواصل زمانی مشخص، در زمان‌های ۱، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۲، ۲۴ ساعت، مقدار ۱ میلی‌لیتر از محیط رهایش برداشته شد و بلافاصله با همان حجم محلول تازه جایگزین گردید تا شرایط آزمایش ثابت بماند. مقدار سافرانال آزادشده در هر مرحله با استفاده از اسپکتروفتومتر UV-Vis در طول موج ۳۳۰ نانومتر اندازه‌گیری شد.

کیفیت ممتاز تهیه گردید. ویژگی‌های برجسته این ماده، همچون توانایی ایجاد ماتریس پلیمری یکنواخت و حفظ ثبات ترکیبات حساس، آن را به یکی از مؤثرترین حامل‌های زیستی برای فرایند محصورسازی تبدیل نموده است. سایر مواد شیمیایی، شامل اتانول مطلق و آب دیونیزه با درجه خلوص بالا، از منابع معتبر داخلی تأمین گردیدند. تمامی مواد اولیه مطابق با پروتکل‌های دقیق ذخیره‌سازی، شامل حفاظت از آلودگی‌های محیطی، کنترل شرایط دمایی، و پیشگیری از واکنش‌های ناخواسته، آماده‌سازی شدند. این دقت علمی و فنی تضمین‌کننده اعتبار داده‌های پژوهشی و قابلیت بازتولید نتایج بهینه بوده است.

فرایند تولید میکروکپسول‌های سافرانال

فرایند تولید میکروکپسول‌های سافرانال، بر اساس طراحی علمی دقیق و بهره‌گیری از پروتکل‌های پیشرفته ریزپوشانی، با استفاده از روش‌های نوین چندمرحله‌ای انجام شد. در مرحله نخست این فرایند، محلول پلیمری اولیه با غلظت ۲/۵ درصد وزنی-حجمی (w/v) از صمغ عربی به عنوان فاز دیواره‌ای زیست‌سازگار و پایدار در محیط کاملاً کنترل‌شده و با استفاده از آب دیونیزه خالص تهیه گردید. این غلظت بر اساس نتایج پیش‌تست‌ها و همچنین پژوهش‌های پیشین که نشان‌دهنده کارایی بالای این غلظت در بهبود پایداری و رهایش تدریجی مواد فعال است، انتخاب گردید.

سافرانال در نسبت‌های وزنی متغیر (۱:۰، ۱:۱، ۱:۳، ۱:۵، ۱:۷، ۱:۹ و ۱:۱۰) به محلول پایه اضافه گردید. این فرایند تحت شرایط اختلاط پیوسته با کنترل دقیق متغیرهای فرآیندی، از جمله دما و سرعت برشی، انجام شد. توزیع یکنواخت ماده فعال در ماتریس پلیمری با هدف ارزیابی تأثیر نسبت‌های متفاوت ماده فعال به حامل، بر بازده فرآیند، پایداری میکروساختار و خواص رهایش کنترل‌شده انجام گردید. تمامی مراحل مطابق با الزامات استاندارد و با هدف تضمین کیفیت محصول نهایی و کاهش اثرات محیطی بر عملکرد نهایی، پیاده‌سازی شد. این فرایند با استفاده از رویکرد دقیق و چند مرحله‌ای جهت تولید سامانه‌های پایدار و یکنواخت صورت پذیرفت.

در مرحله اولیه، محلول پلیمری پایه به‌منظور جداسازی ناخالصی‌ها، به مدت دو ساعت تحت شرایط کاملاً کنترل‌شده با سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ گردید و در مرحله بعد، فاز روغنی که از پیش اضافه شد در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد پیش گرمایش شد تا سازگاری بهتری با

مهار رشد نسبت به نمونه کنترل محاسبه شد. برای تحلیل داده‌ها، مقادیر درصد مهار رشد با استفاده از فرمول استاندارد محاسبه شد و داده‌ها در نرم‌افزار Excel پردازش گردیدند. همچنین، انحراف معیار برای هر داده محاسبه و در نمودارها به صورت خطای استاندارد نمایش داده شد. تمامی آزمایش‌ها در سه تکرار مستقل انجام گرفت و داده‌ها به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش شدند.

آنالیز اندازه ذرات با استفاده از پراکندگی نور دینامیکی (DLS)

به منظور بررسی دقیق ویژگی‌های فیزیکی و اندازه ذرات میکروکپسول‌های سافرانال، از تکنیک پیشرفته پراکندگی نور دینامیکی (Dynamic Light Scattering, DLS) بهره‌برداری شد. این روش، که به عنوان یکی از دقیق‌ترین و معتبرترین ابزارها برای تحلیل ذرات در مقیاس نانومتری شناخته می‌شود، قادر است اطلاعات گسترده‌ای از ویژگی‌های فیزیکی ذرات معلق در محلول فراهم آورد و به ویژه برای تعیین اندازه ذرات، توزیع اندازه، و پتانسیل Zeta سیستم‌های کلئیدی به کار می‌رود.

در مرحله نخست، نمونه‌های پودری میکروکپسول‌ها به دقت در آب دیونیزه معلق شدند و تحت شرایط هم‌زدن ملایم قرار گرفتند تا یک سوسپانسیون همگن و پایدار ایجاد گردد. این فرآیند با هدف جلوگیری از هرگونه تجمع ذرات و اطمینان از یکنواختی سوسپانسیون انجام شد، به طوری که صحت داده‌های حاصل از آزمون را به حداکثر می‌رساند. سپس سوسپانسیون به دست آمده در کووت‌های مخصوص دستگاه DLS ریخته شد و تحت تابش یک پرتو لیزر با طول موج ۶۳۳ نانومتر قرار گرفت.

این پرتو، که به طور مستقیم با ذرات در حال حرکت براونی تعامل داشت، باعث پراکندگی نور شده. پراکندگی نور این ذرات، توسط آشکارسازهای حساس دستگاه، ثبت و اندازه‌گیری گردید. داده‌های ثبت شده توسط دستگاه از پراکندگی نور، برای تحلیل ویژگی‌های مختلف سوسپانسیون استفاده شد. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به میانگین اندازه ذرات (Z-average)، توزیع اندازه ذرات، و شاخص پلی‌دیسپرسیته (PDI) اشاره کرد. مقادیر PDI کمتر از ۰/۲ نشان‌دهنده یکنواختی بسیار بالا و کیفیت مطلوب میکروکپسول‌ها بوده. علاوه بر این، پتانسیل زتا (Potential Zeta) میکروکپسول‌ها اندازه‌گیری گردید تا اطلاعات جامعی

میزان رهايش بر اساس جذب نوري نمونه‌ها و با استفاده از معادله استاندارد کالبراسیون تعیین گردید. این روش در مطالعات پیشین برای بررسی سیستم‌های مشابه ریزپوشانی ترکیبات فرار مورد استفاده قرار گرفته است (Shahidi et al., 2020).

طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR)

برای بررسی دقیق ویژگی‌های شیمیایی و تحلیل تعاملات مولکولی در ساختار میکروکپسول‌های سافرانال، از روش طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR) بهره گرفته شد. این تکنیک، به دلیل دقت و قابلیت شناسایی گروه‌های عاملی در سطح مولکولی، به عنوان ابزاری پیشرفته برای تحلیل تغییرات ساختاری و شیمیایی مواد مختلف شناخته می‌شود. در این تحقیق، نمونه‌های پودری میکروکپسول‌ها با پتاسیم برمید (KBr) که به دلیل شفافیت بالا در محدوده فروسرخ کاربرد دارند، ترکیب شدند و تحت فشار بالا قرار گرفتند تا قرص‌های نازک و یکنواختی تهیه شوند. این قرص‌ها، که از توانایی بالایی در عبور امواج فروسرخ برخوردارند، در دستگاه FTIR قرار گرفتند و طیف‌گیری در بازه گسترده ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ سانتی‌متر معکوس انجام شد. این محدوده، توانایی شناسایی انواع پیوندهای شیمیایی و گروه‌های عاملی را فراهم می‌آورد. طیف‌های به دست آمده از این فرآیند با استفاده از نرم افزارهای تخصصی IR solution، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

فعالیت ضد میکروبی سافرانال

برای ارزیابی فعالیت ضد میکروبی، سافرانال به دو شکل آزاد و کپسوله شده با صمغ عربی در غلظت‌های ۵/۰، ۱ و ۱/۵ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر آماده شد. فعالیت ضد میکروبی این ترکیبات بر اساس مهار رشد دو گونه قارچی *Colletotrichum* و *Botryodiplodia theobromae* gloeosporioides ارزیابی گردید. برای این منظور، روش دیفیوژن دیسک مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا محیط کشت مناسب قارچ‌ها آماده شد و با ۱۰۰ میکرولیتر از سوسپانسیون قارچی در هر غلظت از سافرانال پوشش داده شد. سپس، دیسک‌های آغشته به سافرانال (آزاد و کپسوله شده) روی محیط کشت قرار گرفته و پلیت‌ها به مدت ۷ روز در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد انکوبه شدند. در پایان دوره انکوباسیون، قطر نواحی مهار رشد با کولیس دیجیتالی اندازه‌گیری و درصد

از پایداری الکترواستاتیکی آن‌ها در محیط آبی ارائه گردد.

آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)

به‌منظور تحلیل دقیق ساختار بلوری و ویژگی‌های کریستالوگرافی میکروکپسول‌های سافرانال، از روش پراش پرتو ایکس (X-Ray Diffraction, XRD) بهره‌برداری شد. این تکنیک، به‌عنوان ابزاری کارآمد و معتبر برای شناسایی فازهای بلوری و مطالعه تغییرات ساختاری در مواد مختلف، کاربرد فراوان دارد. این روش امکان شناسایی دقیق و بررسی ویژگی‌های کریستالی و آمورف مواد را فراهم می‌کند و در این تحقیق برای بررسی ساختار میکروکپسول‌ها استفاده شد. در ابتدا، پودر میکروکپسول‌های سافرانال به‌دقت آسیاب و همگن گردید تا از یکنواختی و عدم وجود ترک یا ناهم‌پوشی در سطح نمونه اطمینان حاصل گردد. سپس این پودر بر روی صفحه نمونه‌گیر قرار گرفت و به‌طور دقیق تثبیت شد. دستگاه XRD با استفاده از لوله مولد اشعه ایکس با ولتاژ و جریان مناسب (۴۰ کیلوولت و ۳۰ میلی‌آمپر) تابش اشعه ایکس با طول موج مشخص ($\text{Cu-K}\alpha$, $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) را بر روی نمونه اعمال کرد.

الگوی پراش در زاویه‌های 2θ ، بین ۵ تا ۸۰ درجه ثبت گردید. این بازه زاویه‌ای وسیع، امکان شناسایی فازهای مختلف بلوری و بررسی دقیق ساختار بلوری نمونه را فراهم کرد. سرعت اسکن به‌طور معمول بر اساس نیاز دقیق تحلیل و حساسیت مطلوب (اغلب ۲ درجه بر دقیقه) تنظیم می‌شود. داده‌های پراش به‌دست‌آمده به‌صورت پیک‌های پراش در الگوی XRD ظاهر می‌شوند که هر پیک نمایانگر صفحات بلوری با فاصله بین‌صفحه‌ای خاص (d-spacing) است. داده‌های حاصل از الگوی پراش با استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته‌ای مانند X'Pert HighScore یا Match تحلیل شدند. در این تحلیل، موقعیت، شدت و شکل پیک‌ها به‌دقت مورد بررسی قرار گرفت تا ساختار بلوری دقیق نمونه‌ها، اندازه بلورک‌ها (با استفاده از Scherrer equation) و احتمال حضور فازهای آمورف شناسایی شود.

راندمان کپسوله‌سازی (EE)، ظرفیت بارگذاری (LC)

راندمان کپسوله‌سازی (EE) به‌عنوان یک پارامتر کلیدی در ارزیابی کارایی فرآیند میکروکپسوله‌سازی، به نسبت مواد بارگذاری‌شده واقعی در میکروکپسول‌ها (NPs) اشاره دارد. در این تحقیق، میکروکپسول‌های بارگذاری‌شده با سافرانال

که با استفاده از تکنیک‌های دقیق آماده‌سازی تولید شده‌اند، تحت شرایط کنترل‌شده در سانتریفیوژ با سرعت ۹۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۳۵ دقیقه و در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد قرار گرفتند. این فرآیند به‌منظور جداسازی سافرانال آزاد که در مایع رویی قرار دارد، انجام شد. برای تحلیل دقیق‌تر، مایع رویی که شامل سافرانال آزاد بود، با استفاده از اسپکتروفتومتری UV-vis آنالیز گردید. سپس، محاسبات راندمان کپسوله‌سازی (EE) و ظرفیت بارگذاری (LC) با استفاده از معادلات مربوطه انجام شد. این فرآیند علاوه بر ارزیابی راندمان کپسوله‌سازی و میزان کارایی فرآیند تولید، توانایی فرآیند در تثبیت و بارگذاری مؤثر مواد بیولوژیکی را نیز تحلیل می‌کند. در این محاسبات:

Polyphenol Protection Efficiency PPE نشان دهنده شاخص توانایی پلی فنول‌ها در برابر تخریب و تبخیر جهت فرایند انکپسوله‌سازی

EE نشان‌دهنده نسبت ترکیب فعال PPE است که در میکروکپسول‌ها محصور شده.

Initial amount of PPE مقدار کل ترکیب فعال PPE است که به سیستم اضافه شده است (واحد: میلی گرم یا گرم).

Free PPE مقدار ترکیب فعال PPE است که محصور نشده و در فاز مایع باقی مانده است.

LC ظرفیت بارگذاری است که به میزان ترکیب فعال PPE موجود در نانوذرات اشاره دارد.

(Mass of carrier CSNPs) وزن کل صمغ عربی استفاده‌شده برای ساخت نانوذرات حامل است که ترکیب فعال در آن محصور می‌شود.

(۱)

$$EE = \frac{\text{Initial amount of PPE} - \text{Free PPE}}{\text{Initial amount of PPE}} \times 100$$

(۲)

$$LC = \frac{\text{Initial amount of PPE} - \text{Free PPE}}{\text{Mass of carrier (CSNPs)}} \times 100$$

نتایج و بحث

در این تحقیق، میکروکپسول‌های سافرانال با به‌کارگیری β -سیکلودکسترین به‌عنوان ماده دیواره‌ای و صمغ عربی به‌عنوان امولسیفایر از طریق روش رسوب همزمان سنتز گردیدند. اثر صمغ عربی بر پارامترهای مختلفی نظیر راندمان کپسوله‌سازی، اندازه ذرات با دقت و جزئیات فراوان مورد ارزیابی قرار گرفت. این بررسی‌ها با هدف درک بهتر از تعاملات میان مواد مختلف در فرآیند میکروکپسوله‌سازی و تأثیر آن‌ها بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی میکروکپسول‌ها انجام شد.

میزان کپسوله‌سازی و اندازه ذرات

نتایج حاصل از مطالعه نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه نسبت‌های مختلف سافرانال به صمغ عربی بر پارامترهای اصلی مانند میزان کپسوله‌سازی و اندازه ذرات میکروکپسول‌ها است. به‌طور خاص، بیشترین راندمان کپسوله‌سازی معادل $78/61$ درصد در نسبت وزنی $1:3$ سافرانال به صمغ عربی مشاهده شد که بالاترین مقدار در میان تمامی نسبت‌های آزمایش شده بود. این نتایج تأکید دارند که انتخاب نسبت بهینه می‌تواند تأثیر قابل توجهی در بهبود فرآیند کپسوله‌سازی داشته باشد. در ادامه، اندازه متوسط میکروکپسول‌ها در این نسبت $8/20$ میکرومتر به‌دست آمد که این مقیاس در محدوده میکرو قرار دارد و نشان‌دهنده موفقیت در کنترل اندازه ذرات با استفاده از صمغ عربی به‌عنوان امولسیفایر است. این اندازه ذرات کوچک‌تر می‌تواند به بهبود پایداری کلوئیدی میکروکپسول‌ها و افزایش کارایی سیستم کپسوله شده کمک کند. علاوه بر این، ویژگی‌های سطحی صاف و هموار میکروکپسول‌ها در حضور صمغ عربی به‌طور مستقیم بر بهبود خواص فیزیکی و پایداری سیستم کپسوله‌شده تأثیر می‌گذارد.

این تحقیق با پژوهش‌های پیشین که از اهمیت امولسیفایرهای طبیعی مانند صمغ عربی در بهبود فرآیند کپسوله‌سازی و کاهش اندازه ذرات حمایت می‌کنند، همخوانی دارد. استفاده از صمغ عربی به‌عنوان امولسیفایر به‌طور چشمگیری می‌تواند فرآیند کپسوله‌سازی را بهبود بخشد و موجب کاهش اندازه ذرات و افزایش پایداری سیستم‌های کپسوله‌شده گردد. این ویژگی‌ها نه تنها به حفظ مؤثرتر ترکیبات فعال کمک می‌کنند، بلکه موجب افزایش پایداری میکروکپسول‌ها نیز می‌شوند.

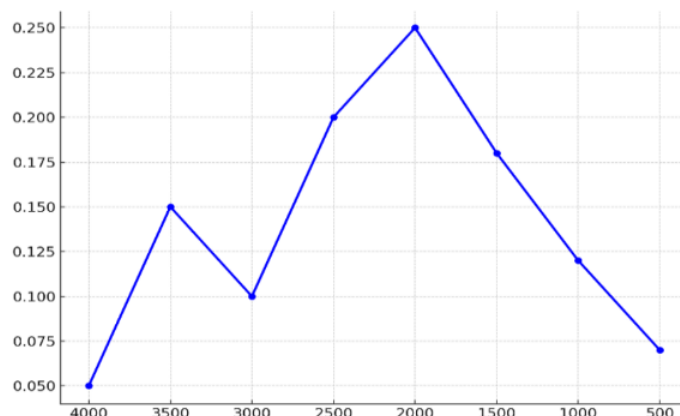
سرعت رهاسازی سافرانال

سرعت رهاسازی سافرانال از ساختارهای میکروکپسوله‌شده به‌طور معناداری تحت تأثیر نوع امولسیفایر مورد استفاده قرار گرفت. میکروکپسول‌های حاوی صمغ عربی ویژگی رهاسازی آهسته‌تری را در مراحل آغازین نشان دادند، که این امر به عنوان عاملی کلیدی در بهینه‌سازی نرخ آزادسازی و حفاظت از خواص زیستی ماده فعال تلقی می‌شود. کاهش سرعت رهاسازی سافرانال در حضور صمغ عربی دلالت بر کارایی این امولسیفایر در ایجاد ساختارهای پایدارتر دارد که می‌تواند مانع از تخریب زودهنگام ماده مؤثره گردد. این خاصیت منحصربه‌فرد، نقش قابل توجهی در تضمین پایداری و کارآمدی خواص بیولوژیکی سافرانال، به‌ویژه اثرات ضد میکروبی آن، ایفا می‌کند. از این رو، چنین سیستم‌های کپسوله‌شده امکان ارائه ترکیبات زیست‌فعال با کارایی طولانی‌مدت و بازدهی بالاتر را فراهم می‌سازند. نتایج آنالیز اماری نشان داد که تفاوت مشاهده شده در سرعت رهاسازی سافرانال بین میکروکپسول‌های حاوی صمغ عربی و دیگر امولسیفایرها از نظر اماری معنادار است ($p > 0.05$) و رند رهایش سافرانال از میکروکپسول‌ها در (شکل ۵) آورده شده است.

طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR)

نتایج طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR)، همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، حاکی از عدم وقوع واکنش شیمیایی میان سافرانال و صمغ عربی در فرآیند کپسوله‌سازی است. حضور باندهای جذبی شاخص مربوط به گروه‌های عاملی OH (هیدروکسیل) و C=O (کربونیل) در طیف نمونه‌ها، بیانگر این است که صمغ عربی به‌عنوان یک امولسیفایر و تثبیت‌کننده عمل کرده است.

این باندها تأیید می‌کنند که صمغ عربی هیچ واکنش شیمیایی قابل ملاحظه‌ای با سافرانال برقرار نکرده و صرفاً از طریق برهم‌کنش‌های فیزیکی ساختار میکروکپسول‌ها را بهبود بخشیده است. مطالعات پیشین نیز نتایج مشابهی ارائه داده‌اند. به عنوان مثال، پژوهش (Teixé-Roig et al., 2023) نشان داد که استفاده از امولسیفایرهای طبیعی، به‌ویژه صمغ عربی، در فرآیند کپسوله‌سازی منجر به پایداری ساختاری و حفظ ترکیبات فعال زیستی بدون تغییر شیمیایی در آن‌ها می‌شود.



شکل ۱. طیف FTIR میکروکپسول‌های سافرانال تهیه‌شده با صمغ عربی
Figure1. FTIR spectrum of safranal microcapsules prepared with arabic gum

سافرانال کپسوله‌شده تأثیر ضدقارچی قوی‌تری نسبت به سافرانال آزاد داشته است که نشان دهنده بهبود کارایی این ترکیب پس از کپسوله‌سازی است.

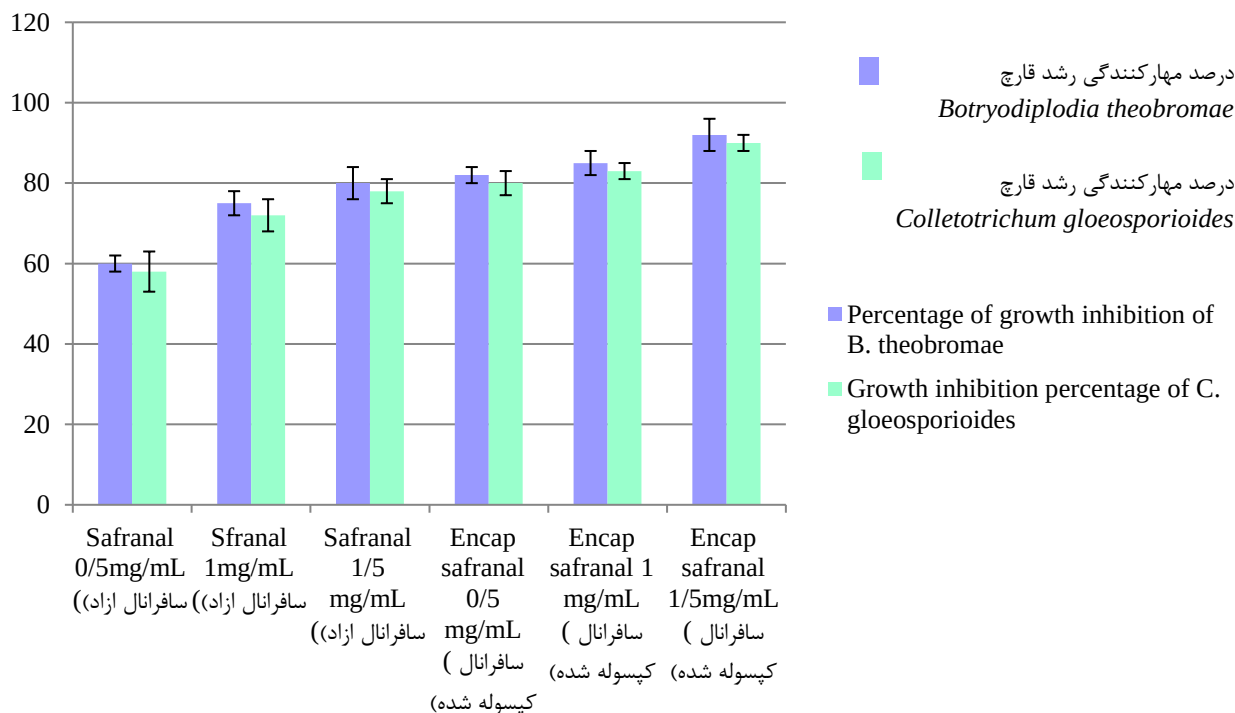
در غلظت ۰/۵ میلی گرم در میلی لیتر، سافرانال آزاد 58 ± 3 درصد رشد *B. theobromae* و 52 ± 4 درصد رشد *C. gloeosporioides* را مهار کرده است. در حالی که سافرانال کپسوله شده در همین غلظت به ترتیب 72 ± 4 درصد و 70 ± 3 درصد مهار رشد را نشان داده است. این تفاوت نشان می‌دهد که کپسوله سازی سافرانال می‌تواند باعث افزایش اثربخشی آن در کنترل رشد قارچ شود. در غلظت ۱ میلی گرم در میلی لیتر، میزان مهار رشد افزایش یافته است. سافرانال آزاد به ترتیب 70 ± 4 درصد برای *B. theobromae* و 67 ± 5 درصد برای *C. gloeosporioides* مهار رشد نشان داده است. در مقابل، سافرانال کپسوله‌شده در همین غلظت درصدهای 84 ± 3 درصد و 81 ± 4 درصد را ثبت کرده است که همچنان برتری آن نسبت به فرم آزاد را تأیید می‌کند. در غلظت ۱.۵ mg/mL، سافرانال آزاد 78 ± 5 درصد رشد *B. theobromae* و 75 ± 4 درصد رشد *C. gloeosporioides* را مهار کرده است. در حالی که سافرانال کپسوله شده در همین غلظت توانسته است درصدهای 90 ± 3 درصد و 88 ± 4 درصد را به ترتیب برای این دو قارچ به ثبت برساند.

در مقایسه با این مطالعات، نتایج پژوهش حاضر نیز تأییدکننده این است که صمغ عربی عمدتاً از طریق تعاملات فیزیکی (مانند نیروهای بین مولکولی) باعث تثبیت و حفظ ترکیبات فعال شده و در فرآیند کپسوله سازی نقش کلیدی ایفا می‌کند. این ویژگی به‌ویژه برای حفظ خواص حساس ترکیبات زیست‌فعال، مانند سافرانال، بسیار حائز اهمیت است.

فعالیت ضد میکروبی

بررسی‌های انجام‌شده در زمینه فعالیت ضد میکروبی نشان داد که سافرانال، به‌صورت آزاد و در قالب میکروکپسول‌های تولیدشده با صمغ عربی، توانایی مهار رشد دو گونه قارچی *Botryodiplodia theobromae* و *Colletotrichum gloeosporioides* را دارد. نتایج به‌وضوح نشان‌دهنده فعالیت قابل توجه زیست فعال سافرانال است. در این پژوهش، رهاسازی کنترل‌شده از میکروکپسول‌ها منجر به حفظ اثرگذاری ضد میکروبی در بازه زمانی طولانی‌تر گردید، که خود نقطه قوت این سیستم محسوب می‌شود.

شکل (۲) درصد مهار رشد قارچ‌های *B. theobromae* و *C. gloeosporioides* را در حضور سافرانال آزاد و سافرانال کپسوله شده در غلظت‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی گرم در میلی لیتر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش غلظت سافرانال (آزاد و کپسوله‌شده) باعث افزایش درصد مهار رشد قارچ شده است. علاوه بر این، در تمامی غلظت‌ها،



شکل ۲. مقایسه فعالیت ضد میکروبی سافرانال آزاد و سافرانال کپسوله شده در برابر قارچ
Fig 2. Comparison of antimicrobial activity of free safranal and encapsulated safranal against fungi.

تطابق بالایی با فرآیندهای پیشرفته‌ای چون امولسیون‌سازی و خشک کردن اسپری نشان می‌دهد که در کپسوله‌سازی‌های صنعتی به‌طور گسترده به کار گرفته می‌شوند. پیک اصلی باریک، بیانگر توزیع یکنواخت و همگن ذرات بوده و نقش برجسته صمغ عربی را در ایجاد پایداری و نظم ساختاری میکروکپسول‌ها برجسته می‌سازد. این امر، نتیجه توانایی استثنایی صمغ عربی در امولسیون‌کنندگی و تثبیت سیستم‌های کلوئیدی بوده. علاوه بر این، شاخص پراکندگی پایین ($PDI < 0.3$) گواه روشنی بر موفقیت فرآیند کپسوله‌سازی در تولید ذراتی هم‌اندازه و بهینه برای کاربردهای تخصصی دارویی و غذایی است. ذرات با اندازه غالب در حدود ۳۰۰ نانومتر، به دلیل تأمین پایداری کلوئیدی و امکان آزادسازی تدریجی و کنترل‌شده، از اولویت بالایی در فناوری‌های پیشرفته برخوردارند. وجود پیک واحد در شکل (۳) نیز بیانگر غیاب ذرات بزرگ‌تر یا کلوخه‌شده‌ای است که می‌توانند عملکرد آزادسازی مواد زیست‌فعال را مختل سازند.

مقایسه با پلیمرهای مصنوعی، نظیر پلی‌اتیلن گلیکول (PEG) و پلی‌وینیل الکل (PVA)، نشان می‌دهد که توزیع

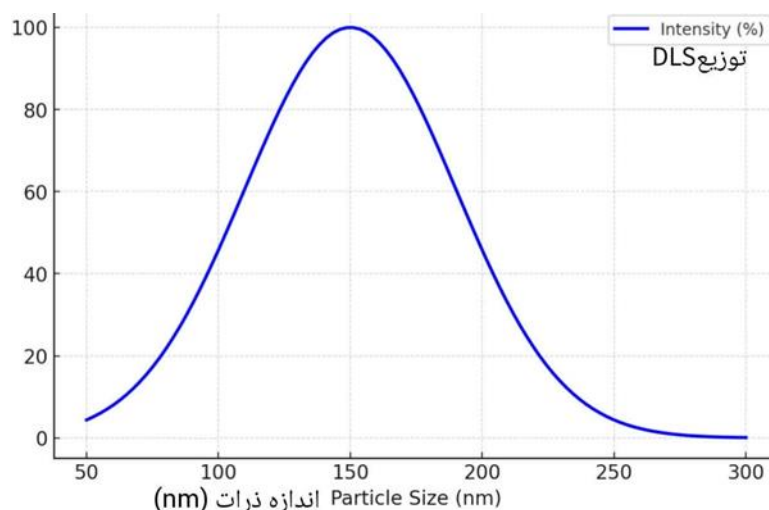
این داده‌ها نشان می‌دهد که در بالاترین غلظت نیز سافرانال کپسوله‌شده عملکرد بهتری داشته و اثربخشی بیشتری از خود نشان داده است. میزان پراکندگی داده‌ها که با انحراف معیار نشان داده شده است، حاکی از الگوی پایدار تغییرات در آزاد و کپسوله‌شده است. همچنین، این نتایج با مطالعات پیشین، از جمله تحقیقات (Zabot et al., 2022) و (Gulin-Sarfraz et al., 2022)، که تأثیر کپسوله‌سازی بر افزایش فعالیت زیستی ترکیبات ضد میکروبی را تأیید کرده‌اند، مطابقت دارد. به طور کلی، این داده‌ها نشان می‌دهند که کپسوله‌سازی سافرانال باعث افزایش اثرات ضدقارچی و کاهش نوسانات عملکردی آن شده است. این ویژگی می‌تواند در بهبود پایداری و کارایی این ترکیب در کاربردهای صنعتی، دارویی و کشاورزی نقش مهمی ایفا کند.

نتایج آنالیز DLS

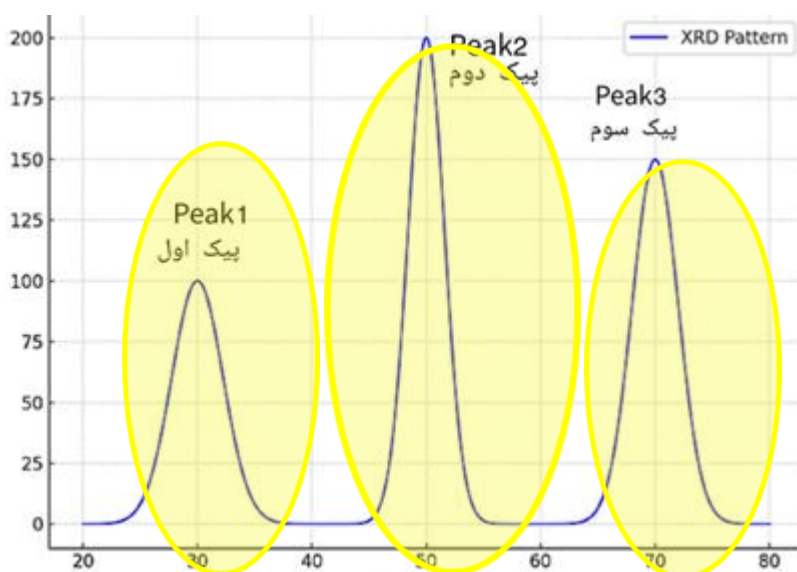
در شکل (۳)، توزیع اندازه ذرات میکروکپسول‌های حاوی سافرانال و صمغ عربی به نمایش درآمده است که پیک اصلی در محدوده حدود ۳۰۰ نانومتر قرار دارد. این اندازه غالب،

و زیست‌سازگاری ارائه می‌دهند. این پژوهش‌ها بر نقش کلیدی صمغ عربی در جلوگیری از تخریب ترکیبات زیست‌فعال در برابر شرایط محیطی و تسهیل آزادسازی تدریجی و کنترل‌شده آن‌ها تأکید دارند. به همین دلیل، صمغ عربی نه تنها می‌تواند به عنوان یک جایگزین مطلوب برای پلیمرهای مصنوعی باشد، بلکه در فناوری‌های نوین کپسوله‌سازی، به‌ویژه در صنایع دارویی و غذایی، یک گزینه ی برتر محسوب می‌شود.

اندازه ذرات حاصل از بکارگیری صمغ عربی، یکنواخت‌تر و باریک‌تر است. پلیمرهای مصنوعی، هرچند در برخی موارد به‌عنوان مواد کپسوله‌کننده کاربرد دارند، ولی اغلب به دلیل ایجاد توزیع اندازه گسترده‌تر و حضور پیک‌های ثانویه، فاقد کارایی لازم برای تضمین پایداری بلندمدت سیستم‌های زیستی هستند. در مقابل، صمغ عربی با برخورداری از خاصیت امولسیون‌کنندگی برجسته و توانایی ایجاد ساختارهای پایدار، مزیت‌های منحصر به فردی از نظر کارایی



شکل ۳. طیف DLS میکروکپسول‌های سافرانال تهیه‌شده با صمغ عربی
Fig 3. DLS spectrum of safranal microcapsules prepared with gum arabic



شکل ۴. الگوی پراش اشعه ایکس XRD
Fig 4. XRD X-ray diffraction pattern

آنالیز پراش اشعه ایکس XRD

در شکل (۴)، سه پیک برجسته در زوایای مختلف (2θ) نشان‌دهنده بازتاب از صفحات کریستالی مشخصی در ساختار ماده هستند که هر یک اطلاعات ارزشمندی در مورد نظم و ویژگی‌های کریستالی ارائه می‌دهند. پیک نخست که در زاویه 30° درجه ظاهر شده است، بازتابی از یک صفحه کریستالی با شدت نسبتاً پایین را نشان می‌دهد. این شدت پایین احتمالاً به دلیل درصد کمتر ذرات کریستالی یا بازتاب از صفحاتی با نظم ساختاری محدود است. چنین بازتاب‌هایی معمولاً در موادی با ساختارهای چندفازی یا نیمه‌کریستالی مشاهده می‌شود، که می‌تواند ناشی از تأثیر پارامترهای سنتز بر نظم کریستالی باشد. پیک دوم، در زاویه 50° درجه، بلندترین پیک نمودار است و به‌عنوان بازتاب اصلی‌ترین صفحه کریستالی ماده شناخته می‌شود. شدت بالای این پیک به سهم غالب این صفحه در پراکندگی پرتو X اشاره دارد و نشان‌دهنده نظم بالای ساختاری در این راستا بوده.

حضور چنین پیکی معمولاً به ساختارهای کریستالی با کیفیت بالا و شرایط بهینه سنتز نسبت داده می‌شود. پیک سوم، در زاویه 70° درجه، بازتاب صفحات کریستالی فرعی با شدت متوسط را، نشان می‌دهد. این پیک می‌تواند مربوط به صفحات ثانویه‌ای باشد که سهم کمتری در ساختار کلی ماده دارند. گستردگی این پیک می‌تواند نشان‌دهنده اندازه کوچک‌تر کریستالیت‌های مشابه باشد که در نتیجه شرایط ویژه فرآیندی ایجاد شده است.

الگوی XRD به‌دست‌آمده در شکل (۴)، به‌وضوح ساختاری کریستالی و منظم را نشان می‌دهد. تفاوت در شدت و موقعیت پیک‌ها نه‌تنها حضور صفحات مختلف کریستالی را تأیید می‌کند، بلکه احتمال وجود فازهای ثانویه را نیز مطرح می‌سازد. علاوه بر این، تحلیل گستردگی پیک‌ها اطلاعات مهمی درباره اندازه کریستالیت‌ها فراهم می‌کند؛ به‌طوری‌که پیک‌های باریک‌تر به کریستالیت‌های بزرگ‌تر و پیک‌های پهن‌تر به کریستالیت‌های کوچک‌تر دلالت دارند. محاسبات مبتنی بر معادله شرر (Scherrer equation) نیز امکان تعیین اندازه دقیق کریستالیت‌ها را فراهم می‌کند و تحلیل دقیق‌تری از فرآیندهای تشکیل ماده ارائه می‌دهد. این نتایج با مطالعات پیشین سازگاری بالایی دارد. به‌عنوان نمونه، در مطالعه‌ای توسط (Wang et al., 2020)، ماده‌ای با ساختار مشابه بررسی شده و پیک‌های برجسته در زوایای 30° ، 50° و 70° درجه گزارش شده و نشان داده، شدت و موقعیت این

پیک‌ها به شکل دقیق با داده‌های این پژوهش همخوانی دارد.

راندمان کپسولاسیون (EE) و ظرفیت بارگذاری (LC)
با افزایش نسبت PPE به صمغ عربی، راندمان کپسولاسیون به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد. در نسبت $1:0.5$ ، راندمان کپسولاسیون به $55/8$ درصد کاهش می‌یابد، که این کاهش را می‌توان به محدودیت‌های فیزیکی در ساختار نانوذرات نسبت داد. این روند ادامه می‌یابد تا در نسبت $1:0.8$ ، راندمان کپسولاسیون به $30/2$ درصد می‌رسد. در مورد ظرفیت بارگذاری (LC)، نتایج نشان‌دهنده افزایش ظرفیت افزایش PPE است. به‌طوری‌که در نسبت $1:0.70$ ، ظرفیت بارگذاری به بیشترین مقدار $22/9$ درصد می‌رسد. این افزایش به دلیل افزایش تعاملات بین گروه‌های عاملی صمغ عربی و PPE برقرار می‌باشد که موجب افزایش جذب و بارگذاری مواد فعال در نانوذرات می‌شود. با توجه به داده‌ها و مقایسه با مطالعات قبلی، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش غلظت PPE در نانوذرات صمغ عربی موجب افزایش ظرفیت بارگذاری (LC) می‌شود، اما در غلظت‌های بالاتر، راندمان کپسولاسیون (EE) کاهش می‌یابد. این یافته با نتایج گزارش شده توسط (Herdiana et al., 2022) و (Homs et al., 2018) مطابقت دارد که در آن‌ها نیز افزایش PPE به بهبود LC و لی کاهش EE منجر شده است.

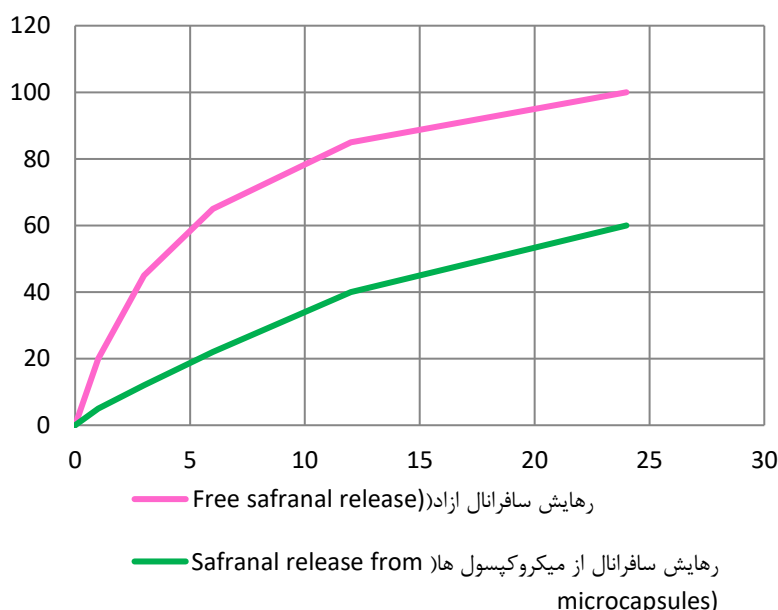
رهایش سافرانال از میکروکپسول‌ها

در شکل (۵)، درصد رهایش سافرانال از میکروکپسول‌ها در محیط PBS در زمان‌های مختلف نمایش داده شده است. رهایش سافرانال ازاد با سرعت بیشتری انجام می‌شود، در حالی‌که سافرانال میکروکپسوله شده به دلیل پوشش محافظ میکروکپسول‌ها، رهایش آهسته‌تری را نشان می‌دهد. این شکل (۵) تغییرات درصد رهایش سافرانال از میکروکپسول‌ها را در زمان‌های مختلف در محیط PBS نمایش می‌دهد و روند آزادسازی این ترکیب را با توجه به زمان و ویژگی‌های میکروکپسول‌ها به طور دقیق ترسیم می‌کند.

جدول ۱. راندمان کیسولاسیون (EE) و ظرفیت بارگذاری (LC)

Table 1. Encapsulation efficiency (EE) and loading capacity (LC)

صمغ عربی به PPE Chitosan to PPE ratio	راندمان کیسولاسیون (EE) % Encapsulation efficiency % (EE)	ظرفیت بارگذاری (LC) % Loading capacity % (LC)
1:0.3	72.4	15.6
1:0.50	55.8	18.2
1:0.60	45.3	20.1
1:0.70	38.1	22.9
1:0.80	30.2	21.5



شکل ۵. روند رهائش سافرانال از میکروکپسول‌ها
Fig 5. Safranal release process from microcapsules

مقابل، رهائش سافرانال میکروکپسوله‌شده به‌طور تدریجی و با سرعت کمتری انجام می‌شود. این کاهش سرعت ناشی از وجود پوشش میکروکپسول‌هایی است که به عنوان یک سد کنترل‌شده عمل کرده و از انتشار سریع سافرانال جلوگیری می‌کند. پوشش‌های میکروکپسول، که عمدتاً از مواد زیست‌سازگار و پلیمری تشکیل شده‌اند، ویژگی‌هایی مانند خاصیت مرطوب‌پذیری و نفوذپذیری آهسته دارند. این پوشش‌ها از رهائش ناگهانی سافرانال جلوگیری کرده و به‌طور تدریجی و کنترل‌شده، سافرانال را در محیط آزاد می‌کنند.

در نمودار روند رهائش سافرانال از میکروکپسول‌ها در محیط PBS، همانطور که مشاهده می‌شود، رهائش سافرانال آزاد در ابتدا سریع‌تر بوده، زیرا سافرانال در حالت آزاد بدون هیچ پوششی به راحتی در محیط منتشر می‌شود. این آزادسازی سریع نشان‌دهنده قابلیت بالای ترکیب برای حرکت به سمت محیط بیرونی می‌باشد. دلیل اصلی این سرعت، حضور مولکول‌های سافرانال در حالت آزاد بوده که هیچ‌گونه محدودیتی برای نفوذ به محیط اطراف ندارند و به محض قرار گرفتن در محیط، به سرعت به بیرون انتشار می‌یابند. در

مطلوب انجام گیرد. چنین کنترلی در رهائش می‌تواند کاربردهای متعددی در صنایع مختلف، به‌ویژه در زمینه‌های داروسازی و غذایی، تسهیل نماید.

تحقیقات انجام‌شده نشان داد که استفاده از صمغ عربی در فرمولاسیون میکروکپسول‌ها نه تنها پایداری ذرات را بهبود می‌بخشد، بلکه به‌طور مؤثری از اکسیداسیون و تخریب سافرانال جلوگیری می‌کند. این ویژگی برای حفظ کیفیت و خواص زیستی سافرانال در مدت شش ماه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. علاوه بر این، میکروکپسول‌های تولیدشده در این مطالعه توانستند فعالیت ضد میکروبی قابل توجهی در برابر پاتوژن‌های قارچی نشان دهند. این خاصیت برجسته، پتانسیل بالای این سامانه‌های کپسوله‌سازی را برای استفاده به‌عنوان عوامل ضد میکروبی در صنایع دارویی و غذایی نمایان می‌سازد.

ارزیابی ویژگی‌های رهائش سافرانال نیز نشان داد که استفاده از صمغ عربی به‌عنوان ماتریس کپسوله‌سازی می‌تواند نرخ رهائش را به‌دقت با توجه به شرایط محیطی تنظیم کند. این خصوصیت امکان عملکرد مطلوب میکروکپسول‌ها در شرایط مختلف مانند تغییرات pH و دما را فراهم می‌آورد. در نتیجه، این ویژگی، کاربرد این میکروکپسول‌ها را به‌عنوان سیستم‌های رهائش کنترل‌شده در محصولات دارویی، غذایی و حتی آرایشی گسترش می‌دهد. در نهایت، یافته‌های این تحقیق بر اهمیت صمغ عربی به‌عنوان یک بیوپلیمر طبیعی در طراحی سامانه‌های میکروکپسوله‌سازی با ویژگی‌های پیشرفته تأکید دارد. این سامانه‌ها با افزایش کارایی و بهبود خواص درمانی و حفاظتی ترکیبات فعال طبیعی مانند سافرانال، می‌توانند جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف پیدا کنند. علاوه بر این، نتایج این تحقیق چشم‌اندازهای جدیدی را برای استفاده از سامانه‌های میکروکپسوله‌سازی در بهبود خواص زیستی، پایداری و قابلیت کاربرد ترکیبات فعال زیستی در حوزه‌های داروسازی، غذایی و آرایشی-بهداشتی باز می‌کند. استمرار در انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه می‌تواند به توسعه فناوری‌های پیشرفته‌تری برای بهبود و گسترش این سامانه‌ها منجر شود و به ارتقای بهره‌برداری از این ترکیبات طبیعی در کاربردهای صنعتی کمک نماید.

بنابراین، به دلیل این محدودیت‌ها، رهائش سافرانال میکروکپسوله‌شده به‌طور قابل توجهی کندتر از سافرانال آزاد صورت می‌گیرد. این تفاوت‌ها در سرعت رهائش ناشی از ساختار فیزیکی و شیمیایی سیستم‌های دارویی مختلف است. در حالی که سیستم‌های آزادسازی سریع اثر گذاری فوری دارند، سیستم‌های میکروکپسوله‌شده با رهائش کنترل‌شده تأثیری پایداری‌تر داشته و با افزایش پایداری، مدت زمان فعالیت دارو در محیط طولانی‌تر می‌کنند.

مطالعه (Dima et al., 2016) به‌دنبال تولید میکروکپسول‌هایی حاوی اسانس گشنیز با استفاده از کیتوزان، آلژینات و اینولین از روش اسپری درآینگ بوده است. در این تحقیق، رهائش اسانس گشنیز از میکروکپسول‌ها به‌طور تدریجی و تحت کنترل فرآیند تورم-انتشار صورت گرفت. نتایج نشان داد که میکروکپسول‌های حاوی کیتوزان، آلژینات و اینولین به‌دلیل ویژگی‌های پلیمری و نفوذپذیری خود می‌توانند رهائش تدریجی و کنترل‌شده‌ای را تضمین کنند. در این مطالعه نیز مشابه مطالعه شما، تأثیر تغییرات pH و دما بر رهائش میکروکپسول‌ها بررسی شده و مشاهده شد که میکروکپسول‌های کیتوزان و آلژینات در pH‌های مختلف رهائش‌های متفاوتی دارند. به‌طور کلی، هر دو مطالعه به‌طور مشابه بر روند رهائش سریع‌تر ترکیب‌های آزاد و کندتر بودن رهائش میکروکپسوله‌شده تأکید دارند. همچنین، در هر دو تحقیق تأثیر ویژگی‌های پلیمری پوشش‌های میکروکپسول و تغییرات شرایط محیطی (pH و دما) بر رهائش مورد بررسی قرار گرفته است.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق به‌وضوح نشان می‌دهد که صمغ عربی به‌عنوان یک امولسیفایر طبیعی و مؤثر در بهبود پایداری و عملکرد میکروکپسول‌های حاوی سافرانال، نقش فعالی ایفا می‌کند. به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد صمغ عربی در امولسیون‌کنندگی و توانایی تشکیل ماتریس‌های پایدار، این ماده قادر است ساختار میکروکپسول‌ها را تقویت کرده و در نتیجه، پایداری فیزیکی و شیمیایی آن‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. این ویژگی‌ها موجب می‌شود که فرآیند رهائش تدریجی سافرانال تحت شرایط مختلف به‌طور کنترل‌شده و

منابع

- Assimopoulou, A. N., Sinakos, Z., & Papageorgiou, V. (2005). Radical scavenging activity of *Crocus sativus* L. extract and its bioactive constituents. *Phytotherapy Research: An International Journal Devoted to Pharmacological and Toxicological Evaluation of Natural Product Derivatives*, 19(11), 997-1000.
- Alavi Talab, H. (2012). Production of omega-3's microcapsules by coacervation method. *Medical Science Journal of Islamic Azad University-Tehran Medical Branch*, 22(3), 205-210. [in Persian].
- Chen, Y., Zhang, H., Tian, X., Zhao, C., Cai, L., Liu, Y., ... & Chen, C. (2008). Antioxidant potential of crocins and ethanol extracts of *Gardenia jasminoides* ELLIS and *Crocus sativus* L.: A relationship investigation between antioxidant activity and crocin contents. *Food Chemistry*, 109(3), 484-492.
- Drusch, S., Benedetti, S., Scampicchio, M. M., & Mannino, S. (2008). Stabilisation of omega-3 fatty acids by microencapsulation. *Agro Food industry hi-tech*, 19(4), 31-32.
- Drusch, S., Benedetti, S., Scampicchio, M. M., & Mannino, S. (2008). Stabilisation of omega-3 fatty acids by microencapsulation. *Agro Food industry hi-tech*, 19(4), 31-32.
- Díaz-Torres, R. D. C., Alonso-Castro, A. J., Carrillo-Inungaray, M. L., & Carranza-Alvarez, C. (2021). Bioactive compounds obtained from plants, their pharmacological applications and encapsulation. In *Phytomedicine* (pp. 181-205). Academic Press.
- Dumitraşcu, L., Stănciuc, N., Borda, D., Neagu, C., Enachi, E., Barbu, V., & Aprodu, I. (2021). Microencapsulation of bioactive compounds from cornelian cherry fruits using different biopolymers with soy proteins. *Food bioscience*, 41, 101032.
- Dima, C., Pătraşcu, L., Cantaragiu, A., Alexe, P., & Dima, Ş. (2016). The kinetics of the swelling process and the release mechanisms of *Coriandrum sativum* L. essential oil from chitosan/alginate/inulin microcapsules. *Food chemistry*, 195, 39-48.
- Galland, L. (2013). *Functional foods: Health effects and clinical applications encyclopedia of human nutrition*, 366-371.
- Fang, Z., & Bhandari, B. (2010). Encapsulation of polyphenols—a review. *Trends in food science & technology*, 21(10), 510-523.
- Gheshm, R., & Brown, R. N. (2021). Growing saffron *Crocus* in the northeastern United States: effects of winter protection and planting density. *HortTechnology*, 31(4), 524-531.
- Gulin-Sarfraz, T., Kalantzopoulos, G. N., Haugen, J. E., Axelsson, L., Raanaas Kolstad, H., & Sarfraz, J. (2022). Controlled release of volatile antimicrobial compounds from mesoporous silica nanocarriers for active food packaging applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(13), 7032.
- Gouin, S. (2004). Microencapsulation: industrial appraisal of existing technologies and trends. *Trends in food science & technology*, 15(7-8), 330-347.
- Hosseinzadeh, M. S., & Modi. (2022). A review on the active compounds of saffron and its therapeutic effects on neurodegenerative diseases. *Saffron Research*, 10(2), 258-275.
- Hosseini, A., Jafari, S. M., Mirzaei, H., Asghari, A., & Akhavan, S. (2015). Application of image processing to assess emulsion stability and emulsification properties of Arabic gum. *Carbohydrate polymers*, 126, 1-8.
- Herdiana, Y., Wathoni, N., Shamsuddin, S., & Muchtaridi, M. (2022). Drug release study of the chitosan-based nanoparticles. *Heliyon*, 8(1).
- Homs, M., Calderó, G., Monge, M., Morales, D., & Solans, C. (2018). Influence of polymer concentration on the properties of nano-emulsions and nanoparticles obtained by a low-energy method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 536, 204-212.
- Hakimzadeh, Vahid, & Rahnama. (2023). Microencapsulation of aqueous saffron extract by two methods: spray drying and freeze drying with the aim of application in beverages. *Saffron Research*, 11(2), 236-249. [in Persian].
- Jain, A., Thakur, D., Ghoshal, G., Katore, O. P., & Shivhare, U. S. (2015). Microencapsulation by complex coacervation using whey protein isolates and gum acacia: An approach to preserve the functionality and controlled release of β -carotene. *Food and Bioprocess Technology*, 8, 1635-1644.
- Jyothi, N. V. N., Prasanna, P. M., Sakarkar, S. N., Prabha, K. S., Ramaiah, P. S., & Srawan, G. Y. (2010). Microencapsulation techniques, factors influencing encapsulation efficiency. *Journal of microencapsulation*, 27(3), 187-197.
- Koochaki, A., & Seydi, M. (2015). Phenology and the process of daughter corm formation in saffron (*Crocus sativus* L.) during the growth period. *Journal of Saffron Research*, 3(2), 134-154. [In Persian].
- Kanakakis, C. D., Tarantilis, P. A., Tajmir-Riahi, H. A., & Polissiou, M. G. (2007). Crocetin, dimethylcrocetin, and safranal bind human serum albumin: stability and antioxidative properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(3), 970-977.
- Khazaei, K. M., Jafari, S. M., Ghorbani, M., Kakhki, A. H., & Sarfarazi, M. (2016). Optimization of anthocyanin extraction from saffron petals with response surface methodology. *Food Analytical Methods*, 9, 1993-2001.

- Khatibi, S. A., Ehsani, A., Nemati, M., & Javadi, A. (2021). Microencapsulation of Zataria multiflora Boiss. essential oil by complex coacervation using gelatin and gum arabic: Characterization, release profile, antimicrobial and antioxidant activities. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(10), e15823.
- Liu, B., Jiao, L., Chai, J., Bao, C., Jiang, P., & Li, Y. (2021). Encapsulation and targeted release. *Food Hydrocolloids: Functionalities and Applications*, 369-407.
- Modi, Ziviar, Navid, Bagherzadeh, & Ghodsieh. (2020). Identification of phenolic and flavonoid compounds and antibacterial properties in the plant (*Crocus pallasii* subsp. *haussknechtii* (Boiss. & Reut. ex Maw) B. Mathew. *Saffron Research*, 8(1), 127-140. [in Persian].
- Özkan, G., & Bilek, S. E. (2014). Microencapsulation of natural food colourants. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, 3(3), 145-156.
- Prabhakar, P., Sen, R. K., Patel, M., Dwivedi, N., Singh, S., Kumar, P., ... & Dhand, C. (2022). Development of copper impregnated bio-inspired hydrophobic antibacterial nanocoatings for textiles. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 220, 112913.
- Rezaee, R., & Hosseinzadeh, H. (2013). Safranin: from an aromatic natural product to a rewarding pharmacological agent. *Iranian journal of basic medical sciences*, 16(1), 12.
- Shahidi Noghabi, M., & Molaveisi, M. (2020). Microencapsulation optimization of cinnamon essential oil in the matrices of gum Arabic, maltodextrin, and inulin by spray-drying using mixture design. *Journal of Food Process Engineering*, 43(2), e13341.
- Vishwakarma, A., Singh, M., Weclawski, B., Reddy, V. J., Kandola, B. K., Manik, G., ... & Chattopadhyay, S. (2022). Construction of hydrophobic fire retardant coating on cotton fabric using a layer-by-layer spray coating method. *International journal of biological macromolecules*, 223, 1653-1666.
- Wang, C., Pan, R., Wan, X., Tan, Y., Xu, L., McIntyre, R. S., ... & Ho, C. (2020). A longitudinal study on the mental health of general population during the COVID-19 epidemic in China. *Brain, behavior, and immunity*, 87, 40-48.
- Zhou, J., Wang, Y., Pan, W., Xiang, H., Li, P., Zhou, Z., & Zhu, M. (2021). High thermal stability Cu₂O@OZrP micro-nano hybrids for melt-spun excellent antibacterial activity polyester fibers. *Journal of Materials Science & Technology*, 81, 58-66.
- Zabot, G. L., Schaefer Rodrigues, F., Polano Ody, L., Vinícius Tres, M., Herrera, E., Palacin, H., ... & Olivera-Montenegro, L. (2022). Encapsulation of bioactive compounds for food and agricultural applications. *Polymers*, 14(19), 4194.
- Teixé-Roig, J., Oms-Oliu, G., Odriozola-Serrano, I., & Martín-Belloso, O. (2023). Emulsion-based delivery systems to enhance the functionality of bioactive compounds: towards the use of ingredients from natural, sustainable sources. *Foods*, 12(7), 1502.
- Ubbink, J., & Krüger, J. (2006). Physical approaches for the delivery of active ingredients in foods. *Trends in Food Science & Technology*, 17(5), 244-254.

COPYRIGHTS

© 2024- 2025 by the authors. Published by University of Birjand – Saffron Research Group. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

