



Encapsulation of Saffron Extract Using Starch Extracted From its Corm

Raziye Alipoor¹, Reza Karazhyan² and Hojjat Karazhiyan^{3*}

Article type:

Research Article

Article history:

Submitted: 27 August 2025

Revised: 14 October 2025

Accepted: 28 October 2025

Available Online 28 October 2025

How to cite this article:

Alipoor, R., Karazhyan, R., Karazhiyan, H. 2025. Encapsulation of Saffron Extract Using Starch Extracted From its Corm. *Saffron Agronomy & Technology*, 13(2), 152-169

DOI: 10.22048/jsat.2025.534167.1568

Abstract

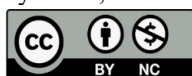
Saffron has been utilized since antiquity in culinary applications and traditional medicine, and is recognized as a rich source of bioactive compounds. Microencapsulation is a technique employed to entrap active substances within carrier materials to facilitate controlled release at desired times and locations, thereby enhancing the stability of sensitive compounds. Spray drying is one of the most commonly applied methods in microencapsulation processes. In current research, bioactive constituents of saffron were encapsulated via spray drying using starch extracted from saffron corms as the wall material, applied at concentrations of 5%, 10%, and 20%. The physicochemical properties of the resulting powders, including water activity, particle size, and polydispersity index, were analyzed. In addition, the main bioactive components of saffron (crocin, safranal, and picrocrocin) were quantified. Scanning electron microscopy (SEM) was employed to examine the particle morphology and evaluate the encapsulation performance. The results indicated that the sample containing 20% starch as the wall material exhibited superior microcapsule morphology, characterized by a more spherical and uniform structure. Increasing the concentration of the wall material led to reduced water activity and smaller particle size, thereby enhancing microcapsule stability and minimizing aggregation during the drying process. Positive zeta potential values, which increased with higher wall material concentrations, further supported improved stability of the encapsulation system. All samples exhibited high microencapsulation efficiency, approximately 96%. The presence of 5% wall material provided optimal protection for saffron's color-related compounds. These findings indicate that starch extracted from saffron corms is an effective encapsulating agent, capable of maintaining the integrity and stability of saffron's bioactive components during processing.

Keywords: Saffron corm, Particle size distribution, Encapsulation, Crocin, Wall material, Scanning electron microscopy

1 – MSc. Graduated, Department of Food Science and Technology, ToH.C., Islamic Azad University, Torbat Heydarieh, Iran

2 – Assistant Prof., Research Institute for industrial biotechnology, department of industrial microbial biotechnology, Mashhad, Iran

3 – Associate Professor, Department of Food Science and Technology, ToH.C., Islamic Azad University, Torbat Heydarieh, Iran



Corresponding author email: hojjat.karazhiyan@iau.ac.ir

© 2022, University of Torbat Heydarieh. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (CC BY NC 4.0) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>).

مقاله پژوهشی

ریزپوشانی عصاره زعفران با استفاده از نشاسته حاصل از بنه آن

راضیه علیپور^۱، رضا کاراژیان^۲ و حجت کاراژیان^{۳*}

تاریخ دریافت: ۵ شهریور ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۲۲ مهر ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۶ آبان ۱۴۰۴

علیپور، ر.، کاراژیان، ر. و کاراژیان، ح. ۱۴۰۴. ریزپوشانی عصاره زعفران با استفاده از نشاسته حاصل از بنه آن. زراعت و فناوری زعفران، ۱۳(۲)، ۱۵۲-۱۶۹.

چکیده

زعفران گران‌ترین ادویه‌ی جهان است که علاوه بر مصارف خوراکی، در طب سنتی و دارویی کاربرد داشته و جزو ارزشمندترین منابع به دلیل وجود ترکیبات زیست فعال می‌باشد. ریزپوشانی فرایندی برای به دام انداختن ترکیبات فعال و مؤثر در داخل ذرات به منظور آزاد سازی آنها در زمان و مکان مناسب می‌باشد؛ این تکنولوژی می‌تواند باعث افزایش پایداری ترکیبات مؤثر شود. استفاده از خشک کن پاششی یکی از تکنیک‌های متداول در فرایند ریزپوشانی به شمار می‌آید. در این پژوهش ترکیبات زیست فعال زعفران در پوشش دیواره‌ای نشاسته استخراجی از بنه آن در سطوح ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد توسط خشک کن پاششی، ریزپوشانی شدند. فعالیت آبی پودر تولیدی، اندازه ذرات و پراکندگی ذرات و میزان مواد مؤثر عصاره زعفران (کروسین، سافرانال و پیکروکروسین) اندازه گیری شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی به منظور نحوه به دام انداختن ترکیبات مؤثر هسته مورد ارزیابی قرار گرفت و نشان داد که نمونه با ماده دیواره ای ۲۰ درصد نشاسته، از نظر ریخت شناسی میکروکپسول نسبت به سایر نمونه‌ها بهتر و به دلیل کرویت نسبت به مابقی نمونه‌ها ارجحیت داشت. همچنین با افزایش سطح مواد دیواره‌ای، فعالیت آبی نمونه‌های تولیدی کاهش یافت (۰/۱۷۳). کاهش اندازه ذرات به ۸۸/۷ نانومتر با افزایش غلظت مواد دیواره ای منجر به تشکیل میکروکپسول پایدار شد، که مانع از بهم پیوستگی و تجمع ترکیبات در طول فرایند ریزپوشانی گردید. مقادیر مثبت پتانسیل زتا که با افزایش سطوح دیواره، افزایش نشان داد (۲۵ mV)، دلیل دیگری بر پایداری بیشتر سیستم بود. راندمان ریزپوشانی تمام نمونه ها ۹۶ درصد بدست آمد. حضور ۵ درصد ترکیبات دیواره‌ای نقش حفاظتی بیشتری در برابر ترکیبات رنگی ریزپوشانی شده زعفران داشت (۰/۵۶ نانومتر). بنابراین ریزپوشانی عصاره زعفران با استفاده از نشاسته استخراجی از بنه آن می‌تواند ترکیبات مؤثر زعفران را حفظ کند.

کلمات کلیدی: بنه زعفران، توزیع اندازه ذرات، ریزپوشانی، کروسین، مواد دیواره، میکروسکوپ الکترونی.

۱ - دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد تربیت حیدریه، دانشگاه آزاد اسلامی، تربت حیدریه، ایران.
۲ - استادیار، جهاد دانشگاهی مشهد، پژوهشکده بیوتکنولوژی صنعتی، گروه پژوهشی بیوتکنولوژی صنعتی میکروارگانیسم‌ها، مشهد، ایران
۳ - دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد تربت حیدریه، دانشگاه آزاد اسلامی، تربت حیدریه، ایران
* - نویسنده مسئول: hojjat.karazhiyan@iau.ac.ir

مقدمه

ریزپوشانی تکنیکی است که به وسیله آن مواد فعال جامد، مایع یا گاز در یک ماده دوم بسته بندی می‌شوند تا از ماده فعال در برابر محیط اطراف محافظت شود. بنابراین ماده فعال به عنوان ماده اصلی (مواد داخلی میکروکپسول به عنوان هسته یا فاز داخلی) در حالی که مواد اطراف پوسته (دیواره یا فاز خارجی) آن را تشکیل می‌دهند. با استفاده از این روش، ضمن جلوگیری از هدر رفتن ترکیبات فرار و حساس به شرایط محیطی، می‌توان آنها را تحت شرایط کنترل شده‌ای رها نمود. از این رو، ترکیبات فعال، حساس یا فرار نظیر ویتامین‌ها، ترکیبات عطر و طعم‌زا، عصاره‌های گیاهی، اسانس‌ها و غیره می‌توانند با استفاده از روش ریزپوشانی، به شکل پایدار تبدیل شوند (Zuidam & Nedovic, 2010). ترکیبات مختلفی را می‌توان به عنوان پوشش یا دیواره در فرایند ریزپوشانی استفاده کرد. پلی ساکاریدهایی مانند مالتودکسترین، نشاسته، صمغ عربی و اینولین به دلیل تنوع، هزینه پایین و کاربردهای فراوان در صنایع غذایی، بیش از سایر گونه‌ها در پوشش ترکیبات زیست فعال مورد استفاده قرار می‌گیرند (de Barros Fernandes, & Botrel, 2014). گیاه زعفران با نام علمی *Crocus sativus L.* از خانواده *Iridaceae*، زیر خانواده *Crocoideae* که بنام زعفران معروف است و از کلاله قرمز رنگ بدست می‌آید؛ گیاهی است چند ساله، ژئوفیت، گلدار، پاییزی و علفی که کلاله آن عمدتاً به عنوان چاشنی، رنگ خوراکی و یا برای اهداف دارویی بکار برده می‌شود. این گیاه اتو تریپلوئید بوده و بنابراین به تولید بذر نمی‌انجامد، بنابراین تولید مثل آن از طریق اندام رویشی بنام بانه صورت می‌گیرد، بر این اساس امکان تلقیح زعفران وجود ندارد. این گیاه شامل ۲۰۰ جنس و ۱۷۵۰ گونه می‌باشد که در طول چند سال گذشته ۵۰ گونه جدید از این گیاه معرفی شده است که خاستگاه بیشتر آنها بومی مناطق آلپ، جنوب اروپا و منطقه مدیترانه

می‌باشد. زعفران به عنوان ارزشمندترین محصول کشاورزی دارویی جهان و چاشنی غذایی، جایگاه ویژه‌ای در جهان داشته و بیش از ۹۰ درصد تولید جهانی این محصول گران‌بها به ایران اختصاص دارد و مطابق آمارهای جدید این رقم به ۹۴ درصد افزایش یافته است و عمدتاً در جنوب استان خراسان تولید می‌گردد. کشت زعفران در ایران سابقه‌ی تاریخی دارد که برخی از محققین منشأ این گیاه را به ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ سال قبل از میلاد مسیح نسبت داده‌اند و احتمالاً از ایران به آسیای صغیر، هندوستان، چین، یونان و همچنین یونان گسترش یافته است (Kazemi-Shahandashti et al., 2022).

ترکیبات شیمیایی شامل تقریباً ۶۳-۵۰ درصد قند (حاوی دکسترین، نشاسته، پکتین، صمغ و پنتوزان)، ۱۲-۱۳ درصد پروتئین، ۱۲-۱۰ درصد رطوبت، ۸-۵ درصد چربی، ۷-۵ درصد مواد معدنی و ۱۰-۵ درصد فیبر خام می‌باشد. به علاوه مقادیر کمی تیمین، ریبوفلاوین و اسیدهای چربی مانند پالمیتیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولنیک اسید دارد. ترکیبات فعال زیستی این گیاه شامل پیکروکروسین (دارای طعم تلخ زعفران)، سافرانال (ترکیب اصلی فرار و رایحه اصلی زعفران) و کروسین (رنگ زعفران) است (Fahim et al., 2012). به طور کلی ترکیبات زیست فعال زعفران نسبتاً ناپایدار بوده و تحت تأثیر دمای خشک فرآیند خشک کنی، دمای ذخیره سازی، pH، نور، اکسیژن، آنزیم‌ها، پروتئین‌ها و یون‌های فلزی قرار دارند (Esfanjani et al., 2015). بانه زعفران از نوع توپر و تقریباً کروی شکل با قطر ۳-۵ سانتی‌متر و پوشش قهوه‌ای رنگ می‌باشد، که در زیر خاک قرار می‌گیرد. یکی از ضایعات تولید زعفران، بانه‌های ریز است که که قابلیت کشت مجدد را ندارند، و حاوی مواد مفیدی می‌باشد. نشاسته حدود ۸۰ درصد وزن بانه زعفران (پیاز زعفران) را تشکیل می‌دهد لذا یکی از مهمترین کاربردهای بانه زعفران تولید نشاسته است (Esmaeliani et al., 2023). رهنما و

دیواره در ریزپوشانی ترکیبات مؤثر زعفران صورت نگرفته است؛ لذا هدف از پژوهش حاضر میکروکپسولاسیون عصاره زعفران با نشاسته بنه زعفران است.

مواد و روش‌ها

مواد لازم

کلیه مواد شیمیایی مورد استفاده در این مطالعه با درجه آزمایشگاهی از شرکت مرک آلمان، بنه زعفران از بازار محلی شهرستان تربت حیدریه خریداری شد. بعد از خریداری بنه زعفران، نمونه‌ها تمیز شده و پوسته‌های بیرونی آنها جدا و سپس با آب مقطر شستشو داده شدند و به قطعات کوچک خرد و سپس در آون (Binder drying oven-wtc، آلمان) با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. نمونه خشک شده با آسیاب خانگی (KMM-۳۱۳ مولینکس، چین) به پودر تبدیل گردید و سپس از الک شماره ۳۵ عبور داده شد.

استخراج نشاسته از بنه زعفران

به نمونه‌های خشک شده بنه زعفران، به میزان سه برابر وزن پودر آب مقطر اضافه گردید و توسط هم زن مغناطیسی (Hidorph-mrHEI) به مدت دو ساعت، هم زده و مجدداً از صافی عبور داده شد. عملیات صاف کردن محلول در دو مرحله به منظور استخراج بهتر انجام گردید و در نهایت به کمک سانتریفیوژ (Sigma-16p.2، آلمان) با میزان دور ۴۰۰۰rpm به منظور جداسازی کامل گرانول‌های نشاسته‌ی موجود در آب استفاده و مجدد در آون خشک شد و در نهایت با الک شماره ۳۵ و سپس پودر بسیار ریز و نرمی بدست آمد (Esmaelian et al., 2023).

عصاره‌گیری زعفران

عصاره‌گیری از زعفران مطابق استاندارد ملی ایران (به شماره

حکیم زاده (Rahnama & Hakimzadeh, 2023)، ریزپوشانی عصاره آبی زعفران به دو روش خشک کردن پاششی و انجمادی با هدف کاربرد در نوشیدنی را مورد بررسی قرار دادند. کرمی پور اصفهانی و همکاران (Karamipour Esfahani et al., 2021)، اثر حلال اتانول-آب بر استخراج کروسین به روش فراصوت از زعفران را مورد بررسی قرار دادند. اسماعیلیان و همکاران (Esmaelian et al., 2023) به بررسی تأثیر شرایط استخراج بر میزان ترکیبات زیست فعال عصاره پیاز زعفران پرداختند. همچنین تأثیر نوع و غلظت مواد دیواره بر ریزپوشانی ترکیبات رنگی عصاره زعفران با استفاده از خشک‌کن انجمادی را مورد بررسی قرار دادند. مهدوی خزاعی و همکاران (Mahdavee Khazaei et al., 2014) به بررسی ریزپوشانی عصاره گلبرگ زعفران و بررسی پایداری آن پرداختند. آنها شرایط استخراج آنتوسیانین از گلبرگ زعفران در دو روش استخراج سنتی با حلال و استخراج به کمک مایکروویو و به کمک روش سطح پاسخ را بهینه‌سازی کردند. احمد و همکاران (Ahmad et al., 2018)، عصاره گلبرگ زعفران را با استفاده از پلیمرهای بتا سیکلودکسترین و بتاگلوکان میکروکپسول شده تهیه کردند و رهایش در محیط شبیه سازی شده دستگاه گوارش را بررسی کردند.

نظر به این که هر سلله مقدار زیادی بنه زعفران به عنوان ضایعات تولید می‌گردد، استحصال مواد ارزشمند آن و کاربردی کردن آن در صنایع مختلف می‌تواند از نظر اقتصادی قابل توجه باشد. تاکنون پژوهش‌های متعددی در خصوص استفاده از ضایعات و فرآورده‌های جانبی میوه‌ها و سبزیجات به منظور بهبود و یا بهینه‌سازی فرمولاسیون مواد غذایی و ریزپوشانی مواد مؤثر گیاهی صورت گرفته است. با توجه به استراتژی بودن زعفران، از ترکیبات بسیاری به عنوان مواد دیواره استفاده شده است، و به دلیل ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی موجود در بنه زعفران؛ تاکنون پژوهشی در زمینه استفاده از نشاسته بنه زعفران بعنوان ماده

۴۰، ۸۰ و ۱۰۰ وزنی/وزنی با میزانی از عصاره آبی تغلیظ شده (طبق جدول ۱) توسط همزن مغناطیسی مخلوط گردید؛ در این فاصله pH نمونه‌ها توسط هیدروکسید سدیم ۰/۱ نرمال در حد ۷ تنظیم شد تا از تغییرات pH بر روی کروسین و آنتوسیانین جلوگیری شود. محلول‌های تهیه شد در خشک کن پاششی (Dorsa14171-19، ایران) با دمای ورودی ۱۸۰ درجه سانتیگراد، سرعت پمپ خوراک ۱۰ میلی‌لیتر بر دقیقه و دمای خروجی ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد (Hesarinejad et al., 2021) قابل ذکر است که نمونه شاهد نمونه عصاره زعفران فاقد پوشش فقط با خشک کن پاششی خشک گردید.

(Iran Institute of) و به روش خیساندن انجام گرفت (Standards and Industrial Research, 2001). بدین منظور ۰/۵ گرم پودر زعفران در ۸۰ میلی‌لیتر آب سرد (حلال) به نسبت حلال به زعفران ۲۰ درصد ($w.v^{-1}$)، حل شد و به کمک کاغذ صاف شماره ۱، نمونه‌ها صاف گردید در نهایت محلول تغلیظ شده در روتاری اوپراتور (Rotavapor شرکت بوچی، سوئیس) توسط خشک کن انجمادی (Operan، کره) خشک و پودر عصاره زعفران بدست آمد (Najafi et al., 2022).

تهیه میکروکپسول

در ابتدا سه سطح از نشاسته حاصل از بنه زعفران به میزان

جدول ۱- تیمارهای مورد بررسی جهت ریزپوشانی عصاره زعفران با ماده دیوار بنه زعفران

Table 1- The studied treatments for encapsulation of extracted saffron using saffron corm as wall material

تیمار Treatment	سطح مورد بررسی Studied level (%)	میزان آب Water amount (ml)	میزان نشاسته Starch amount (g)	میزان عصاره زعفران Extracted saffron amount (g)
1	5%	800	40	2
2	10%	800	80	2
3	20%	500	100	1.25

آزمون‌های مورد بررسی

تعیین میزان فعالیت آبی

جهت تعیین میزان فعالیت آبی پودرهای تولید شده از دستگاه سنجش فعالیت آبی (WaterLab-FDU-8606، ایتالیا) در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد استفاده گردید.

تعیین پتانسیل زتا

برای تعیین پتانسیل زتا نمونه‌ها از دستگاه زتاسایزر (CAD، فرانسه) استفاده شد. لازم به ذکر است دمای اندازه‌گیری این شاخص ۲۵ درجه سانتیگراد، $pH=7$ و محلول‌های حاصل ۱۰۰ برابر رقیق گردید (Hadavi et al., 2020).

تعیین میزان آنتوسیانین

به منظور تعیین میزان آنتوسیانین‌های موجود در عصاره تام زعفران یا میکروکپسول‌های ساخته شده از روش pH افتراقی به کمک رقیق سازی نمونه در بافرهای ۱ و ۴/۵ و قرائت جذب آن در طول موج‌های ۷۰۰ و ۵۲۰ نانومتر با استفاده از دستگاه طیف سنج فرا بنفش - مرئی (Shimadzu-1900iuv-vis،

تعیین میانگین اندازه ذرات و پراکندگی ذرات

اندازه ذرات و توزیع اندازه ذرات نمونه‌ها با استفاده از دستگاه پارتیکل سائز آنالیزر (Cordouan، فرانسه) اندازه‌گیری شد. برای این منظور نمونه بر روی دستگاه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و بعد از عبور نور از نمونه، در طول موج ۶۵۰ نانومتر میزان متوسط اندازه ذرات بدست آمد (Azizanbari, Ghanbarzadeh, Hamishehkar, & Hosseini, 2013).

ژاپن) استفاده گردید (Lee et al., 2008).

$$A = (A_{Y_{vis-max}} - A_{Y_{700nm}}) pH1 - (A_{Y_{vis-max}} - A_{Y_{700nm}}) pH4.5 \quad (1)$$

A: مقدار جذب نمونه، $A_{Y_{vis-max}}$: بیشترین جذب بدست آمده

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

جهت تعیین ساختار میکروسکوپی پودر تولیدی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (Cambridge, England) استفاده شد. نمونه‌ها به وسیله‌ی دستگاه پوشش دهنده تحت پوشش طلا-پادمیوم قرار گرفتند. سپس از سطح خارجی نمونه‌های آماده شده با بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰ برابر تصویر تهیه شد.

تعیین مواد مؤثر عصاره زعفران

مقدار کروسین، سافرانال و پیکروکروسین بر مبنای ثبت تغییرات حاصل از چگالی نوری در طول موج ۲۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر تعیین گردید. مقادیر کروسین، سافرانال و پیکروکروسین بر اساس استاندارد ایران ۲۵۹ به ترتیب در طول موج‌های ۴۴۰، ۳۳۰ و ۲۵۷ نانومتر محاسبه شدند (Iran Institute of Standards and Industrial Research, 2001).

نتایج و بحث

فعالیت آبی

به طور کلی فعالیت آبی شاخص مهم برای پودرهای خشک شده است. زیرا که عمر نگهداری پودرهای تولیدی را تحت تأثیر قرار خواهد داد. با توجه به جدول ۲، بین نمونه‌های تولید از نظر میزان فعالیت آبی اختلاف آماری معنا داری وجود داشت ($p < 0.05$). میزان فعالیت آبی محاسباتی در محدوده ۰/۱-۰/۳ بود که نشان دهنده پایداری کپسول تولیدی و قابلیت نگهداری در طول دوره نگهداری است. همچنین به لحاظ پایین بودن فعالیت آبی به کمتر از ۰/۶، از لحاظ میکروبی پایدار می‌باشد. با

توجه به جدول ۲، با افزایش میزان نشاسته موجود در فرمولاسیون حاصله، میزان فعالیت آبی در سطح مورد بررسی کاهش یافت، احتمالاً با افزایش غلظت نشاسته موجود، از یک طرف مقدار مواد جامد افزایش یافته و از سوی دیگر نشاسته با آب موجود در سیستم اتصالات قوی از نوع هیدروژنی و کووالانسی برقرار کرده و از این طریق منجر به کاهش میزان آب آزاد موجود در سیستم گشته و بنابراین با افزایش سطح نشاسته از میزان فعالیت آبی کاسته شد (Nikjoo et al., 2019)؛ همچنین می‌توان کاهش فعالیت آبی را به میزان دمای خشک کن نسبت داد، با افزایش دمای ورودی به خشک کن، سرعت انتقال جرم و حرارت ذرات پاششی در محفظه افزایش یافته که این امر منجر به کاهش میزان آب آزاد در سیستم شده است و در نتیجه آب بیشتری از سیستم تخییر می‌گردد به همین دلیل با کاهش میزان آب آزاد، از میزان فعالیت آبی نیز کاسته شده است (Nikjoo et al., 2019). بر این اساس، کمترین میزان فعالیت آبی مربوط به نمونه ۲۰ درصد (نمونه حاوی ۱۰۰ گرم نشاسته حاصل از بنه زعفران) تعلق داشت (۰/۱۷۳).

نتایج این بررسی با نتایج نیک و همکاران (Nikjoo et al., 2019)، مالکی زاده و همکاران (Malekizadeh et al., 2018) هم‌خوانی داشت. این نتایج با گزارشات زنده بودی و همکاران (Zendeboodi et al., 2018)، که به بررسی تولید پودر نوشیدنی کربوهیدراتی-پروتئینی حاوی شیر خرمای به روش خشک کن پاششی پرداختند هم‌خوانی داشت. در این مطالعه آنها بیان داشتند با افزایش غلظت مالتودکسترین و صمغ عربی از میزان فعالیت آبی نمونه‌ها کاسته شد و بالاترین میزان فعالیت آبی به نمونه شاهد تعلق داشت. حصاری نژاد و همکاران (Hesarinejad et al., 2021)، در بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و آنتی‌اکسیدانی پودر عصاره آبی ریز پوشانی شده خرفه با روش خشک کن پاششی بیان داشتند که با افزایش

میکروکپسول پایدار شده است و در این حالت مانع از بهم پیوستگی و تجمع ترکیبات در طول فرایند ریزپوشانی شده است (Jafari et al., 2007). همچنین می توان بیان داشت که احتمالاً نشاسته موجود در دیواره به علت نسبت سطح به حجم بالا، غشای بهتری را در سطح ترکیبات ریزپوشانی شده ایجاد کرده است و همین امر ممکن است باعث انعطاف پذیری بیشتر نشاسته در زنجیره پلیمری آن گردد و در نهایت منجر به کاهش اندازه ذرات گردید. از سوی دیگر احتمالاً سرعت خشک کن پاششی را بتوان بر کاهش اندازه ذره نسبت داد؛ چرا که با افزایش سرعت خشک کن و افزایش غلظت مواد دیواره‌ای، مواد دیواره فرصت کامل برای شکل گیری پیدا نمی‌کنند و این امر منجر به کاهش فاصله بین ذرات گردیده (کاهش اندازه ذرات) و در نتیجه تسهیل نفوذ رطوبت به ساختار پودر را باعث می‌گردد (Moradi et al., 2021).

غلظت مالتودکسترین به دلیل جذب آب آزاد از سیستم، از میزان فعالیت آبی کاسته شد که با نتایج این بررسی همخوانی داشت.

اندازه ذره و منحنی اندازه ذرات

اندازه ذرات یکی از مهم‌ترین خواص فیزیکی پودر است که بر رنگ، حلالیت، چگالی و خواص حسی تأثیر می‌گذارد (Saberian & Pasban Noghabi, 2023). توزیع اندازه ذرات برای پودرهای کپسوله شده در جدول ۳، نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود ریز ذرات به دست آمده پس از خشک کردن پاششی، قطر ذرات متفاوتی داشتند. به طوریکه با افزایش غلظت مواد دیواره از ۵ به ۲۰ درصد، اندازه ذرات کاهش یافت. یعنی افزایش غلظت مواد دیواره منجر به کاهش معنی داری در اندازه ذرات گردید ($p < 0.05$). کاهش اندازه ذرات با افزایش غلظت مواد دیواره طبیعتاً منجر به تشکیل یک

جدول ۲- فعالیت آبی عصاره زعفران و نمونه های ریزپوشانی شده با ماده دیواره بنه زعفران

Table 2- Water activity of saffron extract and encapsulated samples containing saffron corm as wall material

نمونه	فعالیت آبی
Sample	Water activity
Control شاهد	0.37±0.04 ^c
5%	0.289±0.035 ^b
10%	0.198±0.003 ^{ab}
20%	0.173±0.01 ^a

* حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی دار بین نمونه‌ها می‌باشد ($p \leq 0.05$).

*Different letters the indicator significant difference It is between samples ($p \geq 0.05$).

جدول ۳- اندازه ذرات عصاره زعفران حاصل از میکروکپسولاسیون

Table 3- Particle size of encapsulated saffron

ویژگی ذرات / تیمار	شاخص بس پاشیدگی	اندازه ذرات	پتانسیل زتا
Treatment/ Particles properties	PDI	Size (nm)	Z average (mv)
5%	0.395±0.05 ^b	137.7± 9.78 ^a	10± 0.11 ^b
10%	0.368±0.01 ^c	124.5± 18.15 ^b	18± 0.8 ^{ab}
20%	0.454±0.06 ^a	88.7± 21.45 ^c	25± 1.45 ^a

* حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی دار بین نمونه‌ها می‌باشد ($p \leq 0.05$).

*Different letters the indicator significant difference It is between samples ($p \geq 0.05$).

افزایش تعداد ذرات می‌شود و با افزودن پلیمرهای زیستی باعث افزایش اندازه ذرات شد، بنابراین به طور طبیعی تعداد قطرات

اوج توزیع اندازه قطرات در نمونه میکروکپسوله شده حاوی ۲۰ درصد مواد دیواره ای بود، زیرا کاهش اندازه قطرات منجر به

بیان داشتند با افزایش غلظت مواد دیواره‌ای پایداری افزایش یافته و نمونه‌ها با اندازه ذرات کمتر، منحنی توزیع باریک‌تر و تیزتری نسبت به مواد دیواره‌ای با غلظت کم داشتند. نتایج تحقیق کورسیان و همکاران (Kursian et al., 2015) در خصوص شاخص پراکندگی میکروکپسول‌های عصاره آنتوسیانین تمشک سیاه وحشی نشان داد که نسبت بالاتر ماده دیواره منجر به افزایش شاخص پراکندگی شد، که با نتایج این بررسی هم خوانی داشت. با توجه به شکل (۲ الف-ج)، بر اساس تعداد ذرات، نمونه حاوی ۵ درصد مواد دیواره‌ای، اکثر ذرات دارای سایز ۱۲۴ نانومتر، نمونه حاوی ۱۰ درصد مواد دیواره‌ای، دارای اندازه ذره حدود ۸۵/۸ نانومتر و در نمونه حاوی ۲۰ درصد مواد دیواره‌ای، اکثر ذرات دارای سایز حدود ۳۰/۲ نانومتر هستند ($p < 0/05$);

توزیع اندازه ذره (PDI)^۱

تعیین توزیع اندازه ذرات با استفاده از شاخص بس پراکندگی بدون بعد یا PDI تعیین میشود و معیاری برای همگنی دیسپرسیون است. اگر مقدار PDI کمتر از ۰/۰۵ باشد، ذرات دارای توزیع یکنواخت و عالی هستند؛ اگر مقدار PDI بیشتر از ۰/۷ باشد نشان می‌دهد که نمونه دارای توزیع اندازه بسیار گسترده‌ای بوده، و به طور کلی اگر اندازه این شاخص بین ۰/۵-۰/۱ باشد ذرات دارای توزیع یکنواختی هستند؛ همچنین اگر این شاخص عدد محاسباتی صفر را نشان دهد بیانگر همگن بودن پراکندگی اندازه ذرات است (Singh et al., 2014). نتایج نشان داد که میزان PDI در کلیه تیمارها بایکدیگر اختلاف آماری معناداری نداشته است ($p < 0/05$); با توجه به جدول ۳، با وجود کوچک بودن اندازه ذرات در نمونه حاوی ۲۰ درصد از ترکیبات نشاسته بنه و عصاره زعفران، نسبت به دو تیمار دیگر این ذره دارای پراکندگی بیشتر و وسیعتری می‌باشد ($p < 0/05$); با وجود

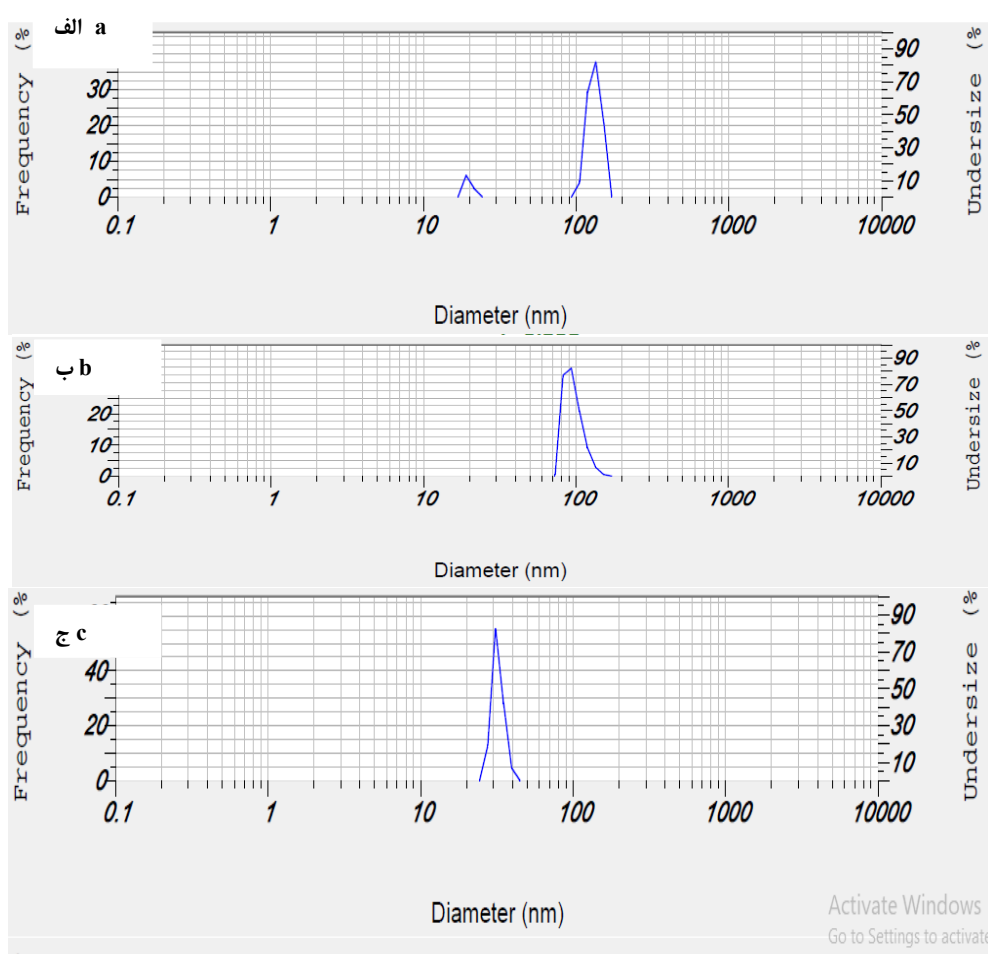
کاهش می‌یابد (Moradi et al., 2021).

صابریان و پاسبان نوقایی (Saberian & Pasban, 2023) در بررسی تثبیت حرارتی عصاره آنتوسیانین گلبرگ زعفران بیان داشتند که تولید ذرات ریز کپسول می‌تواند ناشی از برهمکنش مناسب نیروهای کششی بین مواد دیوار باشد، که با نتایج این مطالعه هم خوانی داشت. همچنین بیان کردند که ترکیب متفاوت مواد دیواره باعث تغییرات متفاوتی در اندازه ذرات شده است که این تغییرات به شرایط تولید، نوع مواد دیواره و ترکیب مواد دیواره بستگی دارد. به نظر می‌رسد که واکنشی (مانند پیوند هیدروژنی) بین مواد دیواره رخ داده است که منجر به کاهش اندازه ذرات شده است.

منحنی توزیع اندازه ذرات در شکل (۲ الف-ج)، ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمام نمونه‌ها یک مشاهده می‌شود که بیانگر این مطلب است که ذرات حامل در محلول بصورت پراکنده قرار گرفته‌اند و بر روی هم دیگر تجمع یا آگلومریزه نشده‌اند. به عبارتی تک قله بودن ذرات نشان دهنده یکنواختی توزیع اندازه ذرات در تمامی نمونه‌هاست. اما کشیدگی آنها یکنواخت نیست و با یکدیگر تفاوت دارد؛ با افزایش غلظت مواد دیواره تمایل به کاهش اندازه ذره افزایش یافته و دارای تغییرات کمتری هستند. بنابراین با توجه به شکل (۲ ج)، نمونه دیواره تشکیل شده با ۲۰ درصد نشاسته، دارای توزیع محدودتر، باریک‌تر و کشیده‌تر از جهت طولی می‌باشد؛ به عبارتی هر چه پهنای منحنی کمتر باشد، دامنه تغییرات قطر ذرات کمتر و نزدیکی اندازه آنها به یکدیگر بیشتر است (Ghadeer et al., 2014). این نتایج با گزارشات حسین‌زاده و همکاران (Hosseinzadeh et al., 2016); نجف نجفی و کدخدایی (Najaf Najafi & Kadkhodae, 2011); قهرمانی فر و همکاران (Ghahramanifar et al., 2010) و مرادی و همکاران (Moradi et al., 2021) هم خوانی داشت، محققین به اتفاق

تبع آن توزیع اندازه ذرات کاهش یافت و برعکس آن اتفاق افتاد. حسین زاده و همکاران (Hosseinzadeh et al., 2016)، در بررسی ریزپوشانی روغن نعناع به روش خشک کردن پاششی بیان داشتند با افزایش غلظت مواد دیواره‌ای اندازه ذرات کاهش و شاخص بس پاشیدگی افزایش یافت که با نتایج این بررسی همخوانی داشت.

اینکه میزان ترکیبات در ساخت میکروکپسولاسیون برابر و در حد ثابتی می‌باشد اما به دلیل کاهش اندازه ذرات در نمونه ۲۰ درصد در حجم مشابه و تعداد ذرات بیشتر به دلیل برقراری پیوندهای قوی از نوع هیدروژنی و کووالانسی پراکندگی بیشتر شده است. حضور یون‌های موجود در آب مانند اکسیژن و هیدروژن در غلظت کم دیواره به خاطر برقراری پیوندها اندازه ذره بیشتر و به



شکل ۲- اندازه ذرات میکروکپسولاسیون عصاره آبی زعفران حاوی نشاسته بانه

(الف) نمونه حاوی ۵ درصد ماده دیواره‌ای، (ب) نمونه حاوی ۱۰ درصد ماده دیواره‌ای، (ج) نمونه حاوی ۲۰ درصد ماده دیواره‌ای.

Figure 2-Particle size of saffron extract containing corm starch samples.

a) Sample containing 5 % wall material, b) Sample containing 10% wall material, c) Sample containing 20 % wall material.

پتانسیل زتا بیانگر بزرگی بار الکتریکی و واکنش الکترواستاتیک بین ذرات و تعلیق آنهاست هر چه پتانسیل زتا بیشتر باشد نشانگر وجود نیروی دافعه بیشتر بین قطرات و تمایل

پتانسیل زتا

تجمع ذرات در سیستم ریزپوشانی، با پتانسیل زتای بالا به دلیل دافعه الکتریکی بیشتر ذرات کمتر رخ می‌دهد و با کاهش پتانسیل الکتریکی، پایداری فیزیکی کاهش می‌یابد (Mao et

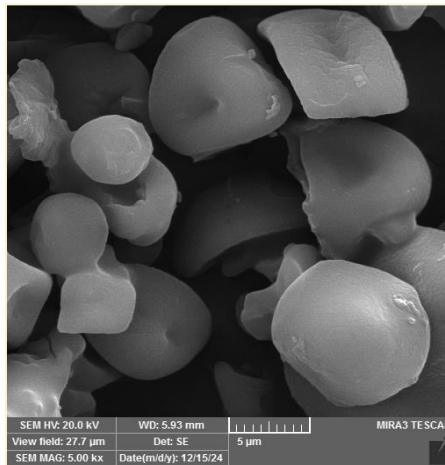
مناسب و پوشش یکنواخت دیواره در اطراف کپسول‌ها به خوبی دیده می‌شود. همان طور که ملاحظه می‌گردد در برخی از تصاویر در سطح میکرو ذرات فرورفتگی‌هایی دیده می‌شود که ممکن است به دلیل عدم بارگذاری مناسب و کامل در داخل میکروکپسول باشد؛ اما با توجه به بارگذاری مناسب و مورد انتظار در نمونه ۲۰ درصد همان گونه که ملاحظه می‌شود ذرات کاملاً کروی شکل می‌باشند. اگر سرعت انتقال مواد زیاد باشد، در تصاویر الکترونی یک کره با مرکز پر رویت می‌شود، در حالی که اگر سرعت تبخیر حلال بالا باشد امکان انتقال مواد به هسته میسر نبوده و کره‌ای با مرکز تو خالی ایجاد می‌شود که در این صورت با اشکال بی نظم و ناهمگونی مواجه می‌شد (Moradi et al., 2021). ساختار نانو کپسول‌ها کروی بوده و سطحی صاف دارند اما برخی دارای سطوح ترک خورده هستند. تشکیل سطوح دندانه‌دار می‌تواند به دلیل انقباض ذرات با دمای بالا در طی فرآیند خشک کردن باشد (Esfanjani et al., 2015; Moradi et al., 2021). نمونه ۲۰ درصد از نظر صافی و کروی بودن بهترین سطح را داشت. نتایج هاندره و همکاران (Hundre et al., 2015) نشان داد که ترکیب‌های مختلف دیواره و تکنیک‌های ریزپوشش هر دو به طور قابل توجهی بر اندازه، شکل و ساختار کلی میکروکپسول‌ها تأثیر می‌گذارند. عدم وجود ترک بر روی سطح میکروکپسول‌ها نشان دهنده نفوذناپذیری دیواره و در نتیجه حذف ناخوشایند ترکیبات هسته است. همچنین سطح ذرات به دلیل تبخیر سریع آب در حین روش خشک کردن پاششی چروکیده می‌شود؛ که این مورد به وضوح در بخش میزان ابقای آنتوسیانین در میکروکپسوله‌های تولیدی دیده شد. عدم وجود حفره در کپسول تولیدی یک امر مثبت تلقی می‌شود چرا که باعث حفظ و نگهداری ماده مؤثر کپسول شده می‌گردد، و از این طریق منجر به افزایش پایداری و حفاظت ماده مؤثر هسته می‌گردد. هرچه میزان نفوذ پذیری مواد دیواره‌ای بیشتر باشد حذف ماده مؤثر بیشتر خواهد بود و میزان پایداری مواد مؤثر

کمتر آنها در بهم چسبیدن می‌باشد که در این حالت ذرات همدیگر را دفع می‌کنند و منجر به پایدار ماندن سامانه می‌شوند (Fan et al., 2014). در این مطالعه میزان پتانسیل زتای محاسباتی در حد مثبت می‌باشد (جدول ۳) که نشان دهنده حضور بارهای دافعه و الکترواستاتیک بیشتر که مانع از آگلومریزه شدن می‌گردند می‌باشد و با افزایش غلظت ترکیبات دیواره افزایش یافته که این امر نشان دهنده پایداری بیشتر سیستم می‌باشد. بین نمونه‌های مورد بررسی اختلاف آماری معناداری وجود دارد به طوری که کمترین و بیشترین میزان پتانسیل زتا به ترتیب مربوط به نمونه ۵ درصد و ۲۰ درصد بود (۱۰ و ۲۵ میلی ولت) ($p < 0.05$). کاهش واکنش‌های ولندروالسی و هیدروژنی بین مولکول‌های آب و نشاسته بنه زعفران که در دیواره قرار گرفته اند منجر به آن شد که از استقرار مولکول‌ها در سطح جلوگیری کند و در نتیجه حفاظت کمتر دیواره را بدنبال داشته باشد (Mohammadzadeh et al., 2022). این نتایج با گزارشات مقصودی و همکاران (Maghsoudi et al., 2019)؛ کولاس و همکاران (Colas et al., 2007)؛ سبالی و همکاران (Sebaaly et al., 2016) هم راستا بود.

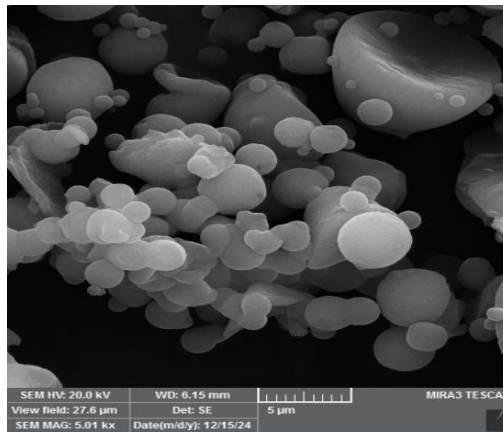
تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

هر چه ساختار کپسول کروی‌تر و شکاف در سطح آن کمتر باشد مطلوب‌تر است. این مزیت نشان می‌دهد نفوذ گازها و رطوبت به درون کپسول کمتر بوده و ترکیبات مؤثر آن در برابر عوامل محیطی از جمله اکسیداسیون و غیره بهتر حفظ می‌گردد (Onsaard et al., 2018). اشکال ۳ تا ۵، تصویر نمونه‌های مختلف را با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود، شکل ۵ از نظر ریخت شناسی میکروکپسول نمونه ۲۰ درصد، نسبت به نمونه ۵ و ۱۰ درصد بهتر و به دلیل کروییت نسبت به مابقی نمونه‌ها ارجحیت دارد، که تأییدی در به دام انداختن ترکیبات مؤثر هسته می‌باشد. شبکه

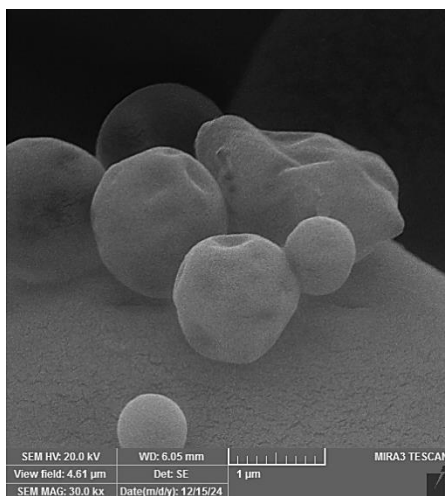
موجود در هسته کاهش خواهد یافت.



شکل ۳- تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه حاوی عصاره کیسوله شده حاوی ۵ درصد مواد دیواره
Figure 3- SEM image of sample containing 5 % wall material.



شکل ۴- تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه حاوی عصاره کیسوله شده حاوی ۱۰ درصد مواد دیواره
Figure 4- SEM image of sample containing 10 % wall material.



شکل ۵- تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه حاوی عصاره کیسوله شده حاوی ۲۰ درصد مواد دیواره
Figure 5- SEM image of sample containing 20 % wall material.

ایجاد سطحی کروی با ساختار یکنواخت ناشی از خشک کن پاششی در مطالعات متعددی بررسی شده است که با نتایج این مطالعه هم راستا بود (Karthik & Anandharamakrishnan, 2013; Dolly et al., 2011; Tonon et al., 2009)، مورفولوژی مشابهی از ناوکپسول عصاره آبی خربزه در پوشش مالتودکسترین و صمغ عربی مشاهده کردند. کارنیرو و همکاران (Carneiro et al., 2013)، استفاده از روش خشک کن پاششی را جهت تولید کپسول یک روش مناسب و ارجح معرفی کرده‌اند و بیان داشتند که استفاده از این روش منجر به تولید کپسول‌هایی با ساختاری صاف و پوسته‌ای بدون حفره می‌گردد.

راندمان ریزپوشانی

راندمان ریزپوشانی به پتانسیل مواد دیواره در حفظ مواد هسته در داخل میکروکپسول‌ها اشاره دارد. کارایی ریزپوشش نیز به دوام مواد محصور شده در داخل دیوار مربوط می‌شود. ریزپوشانی موفق منجر به تولید میکروکپسول‌هایی با حداقل مواد سطحی روی ذرات میکروکپسول و حداکثر ماندگاری مواد هسته می‌شود (Saberian & Pasban Noghabi, 2023). راندمان ریزپوشانی تمام دیوارها بیش از ۹۶ درصد بود (جدول ۴) و تفاوت معنی‌داری بین میکروکپسول‌های تهیه‌شده با مواد دیواره‌ای مختلف وجود نداشت ($p > 0.05$).

جدول ۴- میزان راندمان نمونه‌های میکروکپسول عصاره زعفران حاوی نشاسته بنه زعفران
Table 4- Encapsulation efficiency of encapsulated samples containing saffron corm starch

نمونه Sample	راندمان ریزپوشانی Encapsulation efficiency (EE%)
5%	96±0.01 ^a
10%	96±0.01 ^a
20%	96±0.02 ^a

پایداری آنتوسیانین‌ها

پایداری آنتوسیانین‌ها در پودرهای ریز کپسوله خشک شده با خشک کن پاششی تحت شرایط دمایی ثابت ارزیابی شد. از آنجایی که این رنگدانه‌ها بسیار حساس به حرارت هستند، همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش دمای خشک کن، میزان آنتوسیانین کاهش یابد؛ که این پدیده به وضوح اتفاق افتاد. تأثیر منفی دما بر پایداری آنتوسیانین توسط بسیاری از محققان مشاهده شده است (Tonon et al., 2009). تجزیه سریعتر آنتوسیانین در دمای بالاتر نیز ممکن است به وجود قندها همراه با پروتئین مربوط باشد که می‌تواند منجر به واکنش میلارد (قهوه‌ای شدن غیر آنزیمی) شود، وجود قندها یا محصولات حاصل از تجزیه آنها می‌تواند تجزیه آنتوسیانین را تسریع کند،

زیرا این سرعت واکنش از سرعت تبدیل قندها به فورفورال پیروی می‌کند (Mirhojati et al., 2017). مطابق جدول ۵، بیشترین میزان آنتوسیانین در میکروکپسول مربوط به نمونه شاهد بود و تفاوت معنی‌داری بین مواد دیواره‌ای از نظر میزان آنتوسیانین وجود داشت ($p < 0.05$). کمترین مقدار آنتوسیانین کل مربوط به میکروکپسول‌های حاوی ۲۰ درصد مواد دیواره‌ای بود. استفاده از مواد دیواره در نسبت مناسب برای ریزپوشش ترکیبات فعال می‌تواند از آنها محافظت کرده و کارایی آنها را حفظ کند (Cruz et al., 2010). تحقیقات تونون و همکاران (Tonon et al., 2009)، نشان داد در میکروکپسول‌های حاوی درصد بالایی صمغ عربی، به دلیل کاهش چگالی جرمی، فضای

نیز افزایش می‌یابد که باعث افزایش تحرک مولکولی و افزایش نفوذ اکسیژن و افزایش واکنش‌های اکسیداسیون و در نتیجه کاهش میزان آنتوسیانین‌ها می‌شود.

خالی بین ذرات افزایش می‌یابد و واکنش‌های اکسیداسیون به دلیل افزایش اکسیژن بین ذرات افزایش می‌یابد، که در نهایت منجر به کاهش مقدار آنتوسیانین می‌شود. همچنین در مکانیسم دیگری با افزایش میزان صمغ عربی در میکروکپسول‌ها، رطوبت

جدول ۵- میزان آنتوسیانین و میزان قدرت رنگی موجود (کروسین، سافرانال و پیکروکروسین) موجود در میکروکپسول‌های عصاره زعفران
Table 5- Anthocyanin content and Color intensity amount (Crocin, Safranal and Picrocrocine) in encapsulated saffron extract

نمونه	آنتوسیانین	کروسین	سافرانال	پیکروکروسین
Sample	Anthocyanin content (mg.lit ⁻¹)	Crocin (g.100 ml ⁻¹)	Safranal (g.100 ml ⁻¹)	Picrocrocine (g.100 ml ⁻¹)
Control شاهد	350.00±28.28 ^a	1.075±0.1 ^a	0.239±0.09 ^b	0.53±0.085 ^a
5%	266.00±19.79 ^b	0.56±0.05 ^b	0.066±0.016 ^b	0.159±0.006 ^b
10%	187.00±29.09 ^c	0.049±0.008 ^{bc}	0.051±0.011 ^{bc}	0.105±0.005 ^b
20%	146.00±36.76 ^{cd}	0.032±0.006 ^c	0.033±0.014 ^c	0.065±0.018 ^c

* حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین نمونه‌ها می‌باشد ($p \leq 0.05$).

*Different letters the indicator significant difference It is between samples ($p \geq 0.05$).

کروسین، پیکروکروسین و سافرانال کاسته شد ($p < 0.05$) (جدول ۵). در بین نمونه‌های مورد بررسی بیشترین و کمترین میزان ترکیبات مؤثر به ترتیب مربوط به نمونه شاهد و نمونه حاوی ۲۰ درصد ترکیبات دیواره‌ای تعلق داشت (به ترتیب ۱/۰۷۵ و ۰/۰۳۲). همچنین در بین نمونه‌های ریزپوشانی شده بیشترین و کمترین قدرت رنگی (ترکیبات مؤثر یا رنگی ریزپوشانی شده موجود در زعفران) مربوط به نمونه ۵ درصد و ۲۰ درصد بود، که نشان‌دهنده این امر است که حضور ۵ درصد ترکیبات دیواره‌ای نقش حفاظتی بیشتری در برابر ترکیبات رنگی ریزپوشانی شده زعفران (مواد مؤثر موجود در زعفران) داشتند. مولکول‌های موجود در نشاسته بنه زعفران در طول ریزپوشانی به دلیل خاصیت ویسکوالاستیک پایین و عدم تحمل تنش ناشی از دمای بالای فرایند خشک کردن، به یکدیگر پیوندند و از این طریق شرایط محیطی را برای کاهش مواد مؤثر کروسین، پیکروکروسین و سافرانال مهیا می‌سازند و ترکیبات فوق به راحتی از سیستم جدا می‌شود (Kaushik & Roos, 2007). همچنین در مطالعه مشابهی که توسط شرایی و همکاران (Sharayei et al., 2014) بر روی تأثیر مواد دیواره‌ای بر ریزپوشانی ترکیبات رنگی

کرانیوتی و همکاران (Chranioti et al., 2015)، بیان کرد که مالتودکسترین بیشترین محافظت را از آنتوسیانین‌های زعفران در طی چند هفته نگهداری و به دنبال آن صمغ عربی ارائه کرد. فراری و همکاران (Ferrari et al., 2013) دریافتند که استفاده از مالتودکسترین یا صمغ عربی پایداری آنتوسیانین تولید شده به روش خشک کردن پاششی در حین نگهداری در دمای ۲۵ و ۳۵ درجه سانتیگراد را افزایش می‌دهد. همچنین در میکروکپسول‌های حاوی درصد زیادی از مالتودکسترین به دلیل کوچکتر بودن اندازه ذرات در مقایسه با میکروکپسول‌های با صمغ عربی بیشتر، سطح تماس با اکسیژن افزایش می‌یابد و اکسیداسیون آنتوسیانین‌ها افزایش می‌یابد، در نتیجه میکروکپسول‌های حاوی مالتودکسترین نسبت به میکروکپسول‌های حاوی نسبت بالایی از صمغ عربی، آنتوسیانین کمتری دارند (Mahdavee Khazaei et al., 2014).

بررسی تأثیر مواد دیواره بر میزان ترکیبات موجود در زعفران

با افزایش ترکیبات دیواره از صفر تا ۲۰ درصد، از میزان

بررسی تک پیک، با یک قله نازک و تیز بودند که نشان دهنده پخش پذیری یکنواخت ترکیبات و عدم رسوب و آگلومریزه بودن آنها می باشد و با توجه به شاخص بس پاشیدگی، میزان این اندیس بین ۰/۴-۰/۳ بدست آمد که نشانگر پراکندگی یکنواخت ذرات در امولسیون اولیه می باشد. با توجه به اندازه ذرات می توان بیان کرد که در مواد دیواره ای حاوی ۵ درصد از ترکیبات، اکثر ذرات دارای اندازه ذره ای معادل ۸۵/۸ نانومتر، در میکروکپسول حاوی ۱۰ درصد مواد دیواره ای، اکثر ذرات دارای اندازه ذره ای معادل ۱۸/۲ نانومتر و در میکروکپسول حاوی ۲۰ درصد مواد دیواره ای، اکثر ذرات دارای اندازه ذره ای معادل ۳۲/۲ نانومتر داشتند. همچنین با افزایش مواد دیواره از ۵ درصد تا ۲۰ درصد از قدرت رنگی و میزان آنتوسیانین موجود کاسته شد. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده می توان بیان داشت ریزپوشانی عصاره زعفران در خشک کن پاششی بوسیله نشاسته حاصل از بنه زعفران می تواند تا حدودی خواص فیزیکی (از نظر بررسی اندازه، شاخص بس پاشیدگی و مورفولوژی ذره) نمونه ریزپوشانی شده را بهبود بخشد.

عصاره زعفران با استفاده از خشک کن انجمادی انجام شد نیز بیان داشتند که با افزایش غلظت مواد دیواره ای به دلیل آبیگری و افزایش چگالی توده ای ترکیبات مؤثر موجود در زعفران (کروسین و پیکروکروسین) کاهش یافت، که با نتایج این بررسی هم راستا بود.

نتیجه گیری

نتایج ریزپوشانی عصاره زعفران با بکارگیری نشاسته حاصل از بنه آن بعنوان ماده دیواره با استفاده از خشک کن پاششی حاکی از آن بود که میزان فعالیت آبی با افزایش مواد دیواره ای کاهش معناداری یافت به طوری که با افزایش مواد دیواره ای از صفر (نمونه شاهد) تا ۲۰ درصد از میزان فعالیت آب به میزان چشمگیری کاسته شد. از نظر راندمان بین نمونه های تولیدی اختلاف معناداری وجود نداشت ($p > 0.05$)؛ اما با افزایش درصد مواد دیواره از مقدار ترکیبات مؤثر (آنتوسیانین) کاسته شد؛ که در این بین نمونه حاوی ۵ درصد ماده دیواره نسبت به ۲۰ درصد دارای بیشترین میزان آنتوسیانین بود. از نظر بررسی اندازه و مورفولوژی ذرات می توان بیان داشت که کلیه نمونه های مورد

منابع

- Ahmad, M., Ashraf, B., Gani, A., & Gani, A. (2018). Microencapsulation of saffron anthocyanins using β glucan and β cyclodextrin: Microcapsule characterization, release behaviour & antioxidant potential during in-vitro digestion. *International Journal of Biological Macromolecules*, 109, 435-442. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.122>
- Azizanbari, C., Ghanbarzadeh, B., Hamishehkar, H., & Hosseini, M. (2013). Gellan-Caseinate nanocomplexes as a carrier of Omega-3 fatty acids: Study of particle size, Rheological properties and Encapsulation efficiency. *Food Processing & Preservation Journal*, 5, 19-42. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24233544.1392.5.2.2.2>
- Carneiro, H. C., Tonon, R. V., Grosso, C. R., & Hubinger, M. D. (2013) Encapsulation efficiency and oxidative stability of flaxseed oil microencapsulated by spray drying using different combinations of wall materials. *Journal of Food Engineering*, 115, 443-451.

- <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2012.03.033>.
- Chranioti, C., Nikoloudaki, A., & Tzia, C. (2015). Saffron and beetroot extracts encapsulated in maltodextrin, gum Arabic, modified starch and chitosan: Incorporation in a chewing gum system. *Carbohydrate Polymers*, *127*, 252-263. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.03.049>.
- Colas, J. C., Shi, W., Rao, V. M., Omri, A., Mozafari, M. R., & Singh, H. (2007). Microscopical investigations of nisin-loaded nanoliposomes prepared by Mozafari method and their bacterial targeting. *Micron*, *38*, 841-847. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2007.06.013>
- Cruz, L., Bras, N. F., Teixeira, N., Mateus, N., Ramos, M. J., Dangles, O., & De Freitas, V. (2010). Vinylcatechin dimers are much better copigments for anthocyanins than catechin dimer procyanidin B3. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, *58*, 3159-3166. <https://doi.org/10.1021/jf9037419>
- De Barros Fernandes, R. V., Borges, S. V., & Botrel, D. A. (2014). Gum arabic/starch/maltodextrin/inulin as wall materials on the microencapsulation of rosemary essential oil. *Carbohydrate Polymers*, *101*, 524-532. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.09.083>
- Dolly, P., Anishparvin, A., Joseph, G., & Anandharamakrishnan, C. (2011). Microencapsulation of *Lactobacillus plantarum* (mtcc 5422) by spray-freeze-drying method and evaluation of survival in simulated gastrointestinal conditions. *Journal of Microencapsulation*, *28*, 568-574. <https://doi.org/10.3109/02652048.2011.599435>
- Esfanjani, A. F., Jafari, S. M., Assadpoor, E., & Mohammadi, A. (2015). Nano-encapsulation of saffron extract through double-layered multiple emulsions of pectin and whey protein concentrate. *Journal of Food Engineering*, *165*, 149-155. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.06.022>
- Esmaelian, M., Jahani, M., Feizy, J., & Einafshar, S. (2023). Physicochemical and Functional Characteristics of Saffron (*Crocus sativus* L.) Corm Starch: Gelling and Film-Forming Properties. *Food Biophysics*, *18*, 82-94. <https://doi.org/10.1007/s11483-022-09753-8>
- Fahim, N. K., Janati, S. F., & Feizy, J. (2012). Chemical composition of agriproduct saffron (*Crocus sativus* L.) petals and its considerations as animal feed. *GIDA-Journal of Food*, *37*, 197-201.
- Fan, H., Liu, G., Huang, Y., Li, Y. & Xia, Q. (2014). Development of a nanostructured lipid carrier formulation for increasing photo-stability and water solubility of Phenylethyl Resorcinol. *Applied Surface Science*, *288*, 193-200. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.10.006>
- 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. *Drying Technology*, *31*, 470-478. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.742103>
- Ghadeer, F. M., Al-Isamil, K. M., Al-Ghizzawi, H. A. M. & Holley, R. A. (2014). Stability of cardamom (*Elettaria Cardamomum*) essential oil in microcapsules made of whey protein isolate, guar gum, and carrageenan. *Journal of Food Science*, *79*, C1939-C1949. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12652>.
- Ghahramanifar, A., Mohamadi Sani, A., Najaf Najafi, M., & Ghahramanifar, M. (2010). The effect of emulsion properties on the powder characteristics produced with encapsulation process. *Innovation In Food Science & Technology (Journal Of Food Science & Technology)*, *2*, 45-54 .
- Hadavi, R., Jafari, S. M., & Katouzian, I. (2020). Nanoliposomal encapsulation of saffron bioactive compounds; characterization and optimization. *International Journal of Biological Macromolecules*, *164*, 4046-4053.

- <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.028>. Hesarinejad, M. A., Abdollahi Moghaddam, M. R., Jafarzadeh, M., & Rezaee Oghazi, M. (2021). The study of physicochemical and antioxidant properties of encapsulated *Portulaca oleracea* aqueous extract prepared by spray drying method. *Innovative Food Technologies*, 8, 325-335. <https://doi.org/10.22104/jift.2021.4655.2025>
- Hosseinzadeh, S., Bostan, A., Hadad Khodaparast, M., & Mohebbi, M. (2016). Microencapsulation of spearmint (*Mentha spicata*) oil by modified starch. *Iranian Food Science & Technology Research Journal*, 12(5), 639-651. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v12i5.52033>.
- Hundre, S. Y., Karthik, P., & Anandharamakrishnan, C. (2015). Effect of whey protein isolate and β -cyclodextrin wall systems on stability of microencapsulated vanillin by spray-freeze drying method. *Food Chemistry*, 174, 16-24. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.016>
- Iran Institute of Standards and Industrial Research (2001). Total criteria of saffron and test methods national standards, Standard no 259.
- Jafari, S. M., Yinghe, H., & Bhandari, B. (2007). Effectiveness of encapsulating biopolymers to produce sub-micron emulsions by high energy emulsification techniques. *Food Research International*, 40, 862-873. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.02.002>
- Karamipour Esfahani, M., Abedi, M., & Bahreini, Z. (2021). The effect of ethanol-water mixture on ultrasonic extraction of crocin from saffron. *Saffron Agronomy & Technology*, 9, 285-293. (In persian with English Abstract) <https://doi.org/https10.22048/jsat.2021.49280.1146>
- Karthik, P., & Anandharamakrishnan, C. (2013). Microencapsulation of docosahexaenoic acid by spray-freeze-drying method and comparison of its stability with spray-drying and freeze-drying methods. *Food & Bioprocess Technology*, 6, 2780-2790. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-1024-1>
- Kaushik, V., & Roos, Y. H. (2007). Limonene encapsulation in freeze-drying of gum Arabic-sucrose-gelatin systems. *LWT-Food Science & Technology*, 40, 1381-1391. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.10.008>
- Kazemi-Shahandashti, S. S., Mann, L., El-nagish, A., Harpke, D., Nemati, Z., Usadel, B., & Heitkam, T. (2022). Ancient artworks and crocus genetics both support saffron's origin in early Greece. *Frontiers in Plant Science*, 13, 834416. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.834416>
- Kursian, M., Sharifi, A., Mahdavian, E., & Blurjan, S. (2015). Physical properties of black currant extract of black raspberry extract prepared by spray drying method. *Journal of Innovative in Food Science & Technology*, 7 (4), 85-94.
- Lee, J., Rennaker, C. & Wrolstad, R. E. (2008). Correlation of two anthocyanin quantification methods: HPLC and spectrophotometric methods. *Food Chemistry*, 110, 782-786. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.03.010>
- Maghsoudi, S., Esmailzadeh Kenari, R., & Farahmandfar, R. (2019). Effect of type and concentration of wall materials on kilka fish oil nano and microcapsules properties using xanthan and *Lepidium sativum* seeds gum. *FSCT*, 16 (88), 109-121. <http://fsct.modares.ac.ir/article-7-29837-en.html>
- Mahdavee Khazaei, K., Jafari, S., Ghorbani, M., & Hemmati Kakhki, A. (2014). Application of maltodextrin and gum Arabic in microencapsulation of saffron petal's anthocyanins and evaluating their storage stability and color. *Carbohydrate Polymers*, 105, 57-62. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.01.042>
- Malekizadeh, N., Peighambardoust, S. H., Olad Ghaffari, A., & Sarabandi, K. (2018). Effects of different concentrations of maltodextrin and drying temperatures of spray drying process on physicochemical properties of encapsulated

- sumac extract. *Iranian Food Science & Technology Research Journal*, 14 (2), 321-334. <https://doi.org/10.22067/ifstr.v0i0.61209>
- Mao, L., Xu, D., Yang, J., Yuan, F., Gao, Y., & Zhao, J. (2009). Effects of small and large molecule emulsifiers on the characteristics of β -carotene nanoemulsions prepared by high pressure homogenization. *Food Technology & Biotechnology*, 47, 336-342. <https://doi.org/https://hrcak.srce.hr/39852>
- Mirhojati, H., Sharayei, P., & Ahmadzadeh Ghavidel, R. (2017). Microencapsulation of anthocyanin pigments obtained from seedless barberry (*Berberis vulgaris* L.) fruit using freeze drying. *Iranian Food Science & Technology Research Journal*, 13, 14-27. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v1396i3.58661>
- Mohammadzadeh, M., Bostan, A., & Kadkhodae, R. (2022). Evaluating the production process of Solid lipid nanoparticles: The effect of process parameters on the physicochemical properties of pre and final emulsion. *Journal of Food Science & Technology (Iran)*, 19, 171-181. <https://doi.org/10.22034/FSCT.19.130.171>
- Moradi, E., Feizy, J., & Lakshmipathy, R. (2021). Microencapsulation of saffron pollen extract by spray drying to preserve its nutritional properties. *Journal of Food & Bioprocess Engineering*, 4, 146-152. <https://doi.org/10.22059/jfabe.2021.323338.1091>
- Najaf Najafi, M., & Kadkhodae, R. (2011). Microencapsulation of limonene by freeze drying: effect of type and concentration of wall material. *Iranian Food Science & Technology Research Journal*, 7 (3) <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v7i3.10127>
- Najafi, Z., Zahran, H., Şahin Yeşilçubuk, N., & Gürbüz, H. (2022). Effect of different extraction methods on saffron antioxidant activity, total phenolic and crocin contents and the protective effect of saffron extract on the oxidative stability of common vegetable oils. *Grasas y Aceites*, 73, e480-e480. <https://doi.org/10.3989/gya.0783211>
- Nikjoo, R., Peighambardoust, S. H., & Olad Ghaffari, A. (2019). Effect of spray drying on physicochemical characteristics and quality of peppermint powder. *Journal of Food Science & Technology (Iran)*, 16, 99-109. <https://doi.org/10.29252/fsct.16.95.9>
- Onsaard, E., Putthanimon, J., Singthong, J. & Thammarutwasik, P. (2018). Oxidation stability of sesame oil encapsulated by spray drying. *International Food Research Journal*, 25, 792-784.
- Rahnama, S., & Hakimzadeh, V. (2023). Microencapsulation of saffron aqueous extract by two methods of spray drying and freeze drying with the aim of using in drinks. *Journal of Saffron Research*, 11, 236-249. (In persian with English Abstract) <https://doi.org/10.22077/jsr.2023.6785.1225>
- Saberian, H., & Pasban Noghabi, V. (2023). Thermal stabilization of the anthocyanin extract of saffron petal using encapsulation and its application in the model drink. *Iranian Journal of Food Sciences & Industries*, 19, 17-31. <https://doi.org/10.22034/FSCT.19.132.17>
- Sebaaly, C., Greige-Gerges, H., Agusti, G., Fessi, H., & Charcosset, C. (2016). Large-scale preparation of clove essential oil and eugenol-loaded liposomes using a membrane contactor and a pilot plant. *Journal of Liposome Research*, 26, 126-138. <https://doi.org/10.3109/08982104.2015.1057849>
- Sharayei, P., Eynafshar, S., Kamali, A., & Nyazmand, R. (2014). Effect of type and concentration of wall material on microencapsulated saffron color compounds by freeze drying. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 15, 25-38. <https://doi.org/10.22092/jaer.2014.100180>
- Singh, L. P., Bhattacharyya, S. K., Kumar, R., Mishra, G., Sharma, U., Singh, G., & Ahalawat, S. (2014). Sol-Gel processing of silica nanoparticles and their applications. *Advances in*

- Colloid & Interface Science*, 214, 17-37.
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.10.007>
- Tonon, R. V., Brabet, C., Pallet, D., Brat, P., & Hubinger, M. D. (2009). Physicochemical and morphological characterisation of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced with different carrier agents. *International Journal of Food Science & Technology*, 44, 1950-1958.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.0212.x>
- Zendeboodi, F., Yeganehzad, S., & Sadeghian, A. (2018). Production of carbohydrate-protein based soft drink powder containing date syrup by spray dryer: Evaluation effect of drying carriers on physical properties of the powdered drink. *Journal of Food Science & Technology*, 15, 43-54.
<https://doi.org/http://fsct.modares.ac.ir/article-7-19984-fa.html>
- Zuidam, N. J., & Nedovic, V. (2010). *Encapsulation Technologies for Active Food Ingredients and Food Processing*, Springer.
<https://doi.org/https10.1007/978-1-4419-1008-0>