



Investigating the Effects of Biopolymer Concentration and Core Material Percentage on Quality Characteristics of Fish Oil Nanocapsules Containing Clove Essential Oil Prepared by Complex Coacervation Technique

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sharifi E.^{*1} MSc,
JafarPour S.A.¹ PhD,
Hosseini S.M.H.² PhD

How to cite this article

Sharifi E, JafarPour S A, Hosseini S M H. Investigating the Effects of Biopolymer Concentration and Core Material Percentage on Quality Characteristics of Fish Oil Nanocapsules Containing Clove Essential Oil Prepared by Complex Coacervation Technique. Journal of Fisheries Science and Technology. 2018;7(3):205-213.

¹Fisheries Department, Animal Sciences & Fisheries Faculty, Sari Agricultural Sciences & Natural Resources University, Sari, Iran

²Food Industries Department, Agriculture Faculty, Shiraz University, Shiraz, Iran

*Correspondence

Address: Kilometer 9 Farah Abad Road, Sari, Mazandaran Province.
Postal Code: 4818168984
Phone: +98 (11) 33687901
Fax: -
Sharifi.elah1370@gmail.com

Article History

Received: March 17, 2017

Accepted: October 13, 2017

ePublished: September 22, 2018

ABSTRACT

Aims Considering the unsaturated nature of fish fatty acids, the use of technologies to control its oxidation rate is essential for use in the food industry. Thereafter, the aim of this study was to investigate the effects of biopolymer concentration and core material percentage on quality characteristics of fish oil nanocapsules containing clove essential oil prepared by complex coacervation technique.

Materials & Methods In the present experimental research, the effects of 3 independent variables including the total biopolymer percentage (gelatin-gum Arabic; 6, 8, and 10%), oil content (2 to 3%), and the concentration of clove essential oil (0, 2000, and 3000 ppm) on dependent variables such as size and zeta potential of particles, color, surface oil, encapsulation, and nanoencapsulation efficiency were evaluated. The present study was carried out as a factorial experiment in a completely randomized design. One-way analysis of variance and Duncan test were used. The data were analyzed by SPSS 16 software.

Findings The increase in total biopolymer percentage was associated with increasing particle size as it was in the range between 259.19 ± 55.83 and 814.35 ± 253.05 nm, respectively. In terms of color parameters, the yellowness of produced powders was increased by increasing the concentration of fish oil and cloves essential oil, while lightness was decreased by increasing the concentration of the biopolymer. Also, the superficial oil was increased by increasing oil and clove essential oil concentrations in the nanocapsules, and microencapsulation efficiency in different treatments was recorded between 65.1 ± 2.75 in treatment 15 (10% biopolymer and 3% oil) to 98.84 ± 0.78 in treatment 4 (8% biopolymer and 2% oil).

Conclusion Using complex coacervation technique with gelatin-gum Arabic as a biopolymer can produce nano-sized particles.

Keywords Omega 3 Fatty Acids; Microencapsulation; Biopolymer

CITATION LINKS

[1] Common purslane: A source of Omega-3 ... [2] Effects of n-3 long chain polyunsaturated ... [3] Encapsulation of fish oil in solid zein particles ... [4] Oxidative stability of polyunsaturated fatty ... [5] Microencapsulation of Omega-3 fatty ... [6] Extraction of fish oil using green extraction methods ... [7] Evaluation of microbial transglutaminase and ... [8] Release properties on gelatin-gum Arabic ... [9] Encapsulation technologies for active food ingredients ... [10] Encapsulated emulsions and methods of ... [11] Nanoencapsulation of Omega-3 fatty acids using caseinate-pectin ... [12] Microencapsulation of fish oil by simple coacervation ... [13] Efficiency evaluation of nanoencapsulation ... [14] Optimisation of the microencapsulation of tuna ... [15] Entrapment of flaxseed oil within gelatin-gum ... [16] Microencapsulation for the improved delivery of ... [17] Anti-inflammatory and antinociceptive activities A ... [18] Antioxidant activity of eugenol and related monomeric ... [19] Comparison of essential oils of clove buds extracted ... [20] Effect of different drying methods and Essential ... [21] Characterization of spray-dried tuna oil emulsified ... [22] Influence of Alyssum homolocarpum seed gum on the stability and ... [23] Fish oil encapsulation with chitosan using ... [24] Encapsulation efficiency of food flavours and ... [25] Influence of relative humidity on oxidation of ... [26] Fish oil stabilisation by microencapsulation with modified ... [27] Extractable oil in microcapsules prepared by spray-drying ... [28] Lipid composition of shark liver oil: Effects of emulsifying and ... [29] Modified SPI improves the emulsion properties and oxidative stability of fish oil ... [30] Estimation of the distribution of droplet size, interfacial area ... [31] Gellan-Caseinate nanocomplexes as a carrier of Omega-3 fatty acids ... [32] Formation and stability of ... [33] Impact of whey protein - beet pectin conjugation ... [34] The effect of Alyssum homolocarpum ... [35] Physico-chemical, mechanical and ... [36] Production and characterization of oil-in-water ... [37] Effect of Lallemandia royleana seed ...

بررسی اثر غلظت بیوپلیمر کل و درصد هسته بر ویژگی‌های کیفی نانوکپسول‌های روغن ماهی حاوی اسانس میخک تولیدشده به روش کوآسرواسیون پیچیده

الهه شریفی* MSc

گروه شیلات، دانشکده علوم دام و شیلات، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

سیدعلی جعفرپور PhD

گروه شیلات، دانشکده علوم دام و شیلات، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

سیدمحمد هاشم حسینی PhD

گروه صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده

اهداف: با توجه به ماهیت غیراشباع اسیدهای چرب ماهی، کاربرد فناوری‌هایی برای کنترل نرخ اکسایش آن برای استفاده در صنعت غذا ضروری است. هدف پژوهش حاضر بررسی روش تولید نانوکپسول‌های روغن ماهی به همراه اسانس میخک با استفاده از تکنیک کوآسرواسیون بود.

مواد و روش‌ها: در پژوهش تجربی حاضر تأثیر سه متغیر مستقل شامل درصد بیوپلیمر کل (ژلاتین-صمغ عربی: ۶، ۸ و ۱۰٪) روغن (۲ تا ۳٪)، غلظت اسانس میخک (صفر، ۲۰۰ و ۳۰۰۰ ppm) بر متغیرهای وابسته از قبیل اندازه ذرات و پتانسیل زتا، رنگ پودرهای تولیدشده، مقادیر روغن سطحی، کپسوله‌شده و بازدهی ریزپوشانی بررسی شد. پژوهش حاضر به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. آزمون‌های آماری تحلیل واریانس یک‌طرفه و آزمون دانکن به کار رفتند. داده‌ها در نرم‌افزار SPSS 16 تجزیه و تحلیل شدند.

یافته‌ها: افزایش درصد بیوپلیمر کل موجب افزایش اندازه ذرات شد و اندازه ذرات محدوده‌ای بین ۲۵۹/۱۹±۵۵/۸۳ تا ۸۱۴/۳۵±۲۵۳/۰۵ نانومتر داشتند. در بررسی رنگ پودرهای تولیدشده با افزایش غلظت روغن ماهی و اسانس میخک شاخص زردی افزایش و با افزایش غلظت بیوپلیمر کل شاخص روشنایی کاهش یافت. همچنین روغن سطحی با افزایش درصد روغن و غلظت اسانس میخک در سطح نانوکپسول‌ها افزایش نشان داد و بازدهی ریزپوشانی در تیمارهای مختلف بین ۶۵/۱۰±۲/۷۵ تا ۸۸/۸۴±۰/۷۸ (روغن) ۳٪ تا ۹۸/۸۴±۰/۷۸ (روغن) ۳٪ تا ۹۸/۸۴±۰/۷۸ (روغن) ۳٪ متفاوت بود.

نتیجه‌گیری: استفاده از تکنیک کوآسرواسیون پیچیده با استفاده از ژلاتین ماهی و صمغ عربی به عنوان بیوپلیمر، می‌تواند ذرات با اندازه نانو تولید کند.

کلیدواژه‌ها: اسیدهای چرب امگا ۳، ریزپوشانی، بیوپلیمر

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۲۱

*نویسنده مسئول: Sharifi.elah370@gmail.com

مقدمه

در سال‌های اخیر، در صنعت غذا افزودن ترکیبات کاربردی به محصولات خوراکی ضروری به نظر می‌رسد. این ترکیبات معمولاً نسبت به عوامل محیطی، فرآوری یا شرایط دستگاه گوارش بسیار حساس هستند و به سرعت غیرفعال می‌شوند. یکی از این ترکیبات کاربردی اسیدهای چرب غیراشباع امگا ۳ است. خانواده امگا ۳ متشکل از آلفالینولئیک اسید (ALA C18: 3) و دیگر متابولیت‌های زنجیره آن ایکوزاپنتانویک اسید (EPA C20: 5) و دکوزاهگزانوئیک اسید (DHA C22: 6) است. همان‌طور که از نام آنها مشخص است، چند پیوند دوگانه در زنجیره‌شان وجود دارد که اولین پیوند دوگانه در کربن سوم از سمت متیل قرار گرفته است. در حال حاضر منابع غذایی برتر زنجیره اسیدهای چرب امگا ۳، روغن ماهی و مکمل‌های روغن ماهی هستند. اسیدهای چرب

چندغیراشباع امگا ۶ و امگا ۳ برای عملکرد فیزیولوژیکی بدن اهمیت زیادی دارند، هر دو نوع برای رشد و توسعه سیستم عصبی مرکزی، شبکه چشم و عملکرد مناسب سیستم قلبی عروقی لازم هستند^[1]. در حال حاضر مطالعات بیشتر نشان می‌دهند که اسیدهای چرب امگا ۳ نقش مهمی در کاهش خطر بیماری‌های قلبی عروقی، برخی از انواع سرطان‌ها و همچنین نقش کلیدی در رشد مغز ایفا می‌کنند، با این حال با توجه به ماهیت غیراشباع به اکسیداسیون لپیدی بسیار حساس هستند^[2]. روغن ماهی ترکیبی غیرقطبی و نامحلول در آب است اما هنگامی که به صورت امولسیون آماده می‌شود یک مکانیزم فیزیکی برای متفرق کردن قطرات روغن در سامانه‌های آبی فراهم می‌کند. امولسیون را می‌توان به‌طور مستقیم به‌منظور غنی‌سازی مواد غذایی و نوشیدنی‌ها استفاده کرد^[3]. همچنین روغن‌های حاوی مقادیر بالای اسیدهای چرب غیراشباع امگا ۳ به اکسیداسیون بسیار مستعد هستند. طی اکسیداسیون اسیدهای چرب امگا ۳، پراکسید تولید می‌شود که در ادامه به ترکیبات فرار تبدیل شده که برخی از آنها طعمی نامطلوب تولید می‌کنند و در نهایت موجب کاهش ارزش تغذیه‌ای اسیدهای چرب امگا ۳ می‌شوند^[4]. بنابراین ارایه راهکارهای مناسب برای افزایش ماندگاری روغن ماهی حاوی اسیدهای چرب غیراشباع به‌منظور استفاده از آن در صنعت غذا ضروری است^[5].

از روش‌های معمول برای حفاظت روغن ماهی در مقابل اکسیداسیون، اضافه‌کردن آنتی‌اکسیدان و تکنیک ریزپوشانی است^[6, 7]. در تکنیک ریزپوشانی ترکیبات زیست‌فعال توسط یک مانع فیزیکی به‌طور کامل احاطه و حفاظت شده است. این تکنیک به‌عنوان یک تکنولوژی برای قراردادن مواد جامد، مایع و گاز در کپسول‌های کوچک مطرح است، کپسول‌هایی که می‌توانند محتویات خود را به‌صورت کنترل‌شده و تحت شرایط خاصی آزاد کنند^[8].

ریزپوشانی با تکنیک کوآسرواسیون توسط جداسازی فازی دو یا چند بیوپلیمر در یک محلول و به‌دنبال آن به‌وسیله رسوب‌گیری ثانویه لایه کواسروای تشکیل‌شده در اطراف مواد میانی انجام می‌شود که به دو حالت کواسرواسیون ساده (حاوی یک پلیمر) و کواسرواسیون پیچیده (شامل دو یا چند پلیمر) ایجاد می‌شود، یکی از کلونیدها معمولاً ژلاتین یا پروتئین آب‌پنیر است، در حالی که دیگری باری مخالف دارد (مانند صمغ عربی، پلی‌فسفات سدیم یا متیل‌کربوکسی‌سلولز)^[9]. هنگامی که دو پلیمر با هم در محیط آبی مخلوط می‌شوند، ممکن است هنگام مخلوط‌شدن بین آنها جاذبه یا دافعه ایجاد شود که به‌طور عمده به pH، قدرت یونی، نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید، غلظت بیوپلیمر کل، وزن مولکولی، چگالی بار الکتریکی، انعطاف‌پذیری، ترکیب پلیمرهای زیستی، فشار و درجه حرارت بستگی دارد^[10].

در پژوهش بحرانی و همکاران^[11] تولید نانوکمپلکس‌های بیوپلیمری پکتین- کازئین به‌عنوان یک نانوحامل بالقوه برای ریزپوشانی امگا ۳ معرفی شد. در پژوهش آنها اندازه ذرات ۸۶ نانومتر و راندمان ریزپوشانی ۹۱٪ گزارش شد. در پژوهشی^[12] به‌منظور بهبود پایداری اکسیداتیو و کاربرد روغن ماهی، از روش کواسرواسیون ساده و خشک‌کردن با خشک‌کن پاششی، برای تولید میکروکپسول‌های حاوی روغن ماهی استفاده شد، پایداری اکسیداتیو روغن ماهی توسط ریزپوشانی بهبود یافت و اسکن عکس‌های میکروسکوپی الکترونیکی نشان داد که میکروکپسول به‌دست‌آمده یک میکروکپسول گرد، صاف و توخالی با هسته روغن ماهی است. در پژوهش جعفرپور و همکاران^[13] نانوذرات حاوی

متحد)، صمغ عربی (دای‌جونگ؛ کره جنوبی)، آنزیم ترانس‌گلوتامیناز (آجی‌نوموتو؛ ژاپن)، ایزوپروپانول و هگزان (مرک؛ آلمان) و سایر مواد آزمایشگاهی به کار رفتند.

استخراج روغن ماهی: ماهی قزل‌آلا از بازار ماهی‌فروشان ساری خریداری شد، پس از تخلیه شکمی، با آب کاملاً شسته و با مولینکس چرخ شد. یک کیلوگرم گوشت چرخ‌شده ماهی درون یک ارلن ریخته شد، سپس به اندازه وزن گوشت ماهی به آن آب مقطر (یک‌لیتر) افزوده و در نهایت کاملاً همگن شدند. به‌منظور استخراج روغن، محلول هگزان- ایزوپروپانول (۵۰۰ میلی‌لیتر) به نسبت ۱:۳ به کار رفت، به‌منظور استخراج بهتر روغن، محلول روی شیکر مدل LS-100 (لایترون؛ ایران) به مدت ۲ ساعت کاملاً هم‌زده شد، سپس به مدت ۲۴ ساعت در یک محیط کاملاً تاریک قرار گرفت. بعد از گذشت ۲۴ ساعت ابتدا با پارچه تنظیف گوشت ماهی از محلول جدا، سپس محلول با قیف بوختر صاف و به یک دکانتور اضافه شد. با گذشت زمان روغن ماهی حاوی هگزان از محلول آب و ایزوپروپانول جدا شد و در قسمت بالایی دکانتور فاز مجزایی تشکیل داد. به‌منظور جدا کردن حلال، روغن ماهی حاوی هگزان در آن تحت خلا با دمای محیط قرار گرفت و بعد از گذشت ده روز هگزان از روغن کاملاً جدا شد [10].

استخراج اسانس میخک: گیاه میخک از عطاری تهیه و پس از آن با آسیاب کاملاً پودر شد. به‌منظور استخراج اسانس، به یک بالن با حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر، ۲۵ گرم پودر میخک و ۲۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه و دستگاه کلونجر روشن شد، با گذشت ۳ ساعت ترکیبات فرار روغن میخک جدا شدند. اسانس حاصل به‌منظور حفظ خواص در ظرف تیره نگهداری شد [20].

مراحل تهیه نانوکپسول‌ها شامل موارد زیر بود:

آماده‌سازی مواد دیواره ژلاتین و صمغ عربی: محلول‌های ذخیره ژلاتین و صمغ عربی با غلظت ۶٪ وزنی- وزنی به‌طور جداگانه تهیه شدند. به‌منظور هیدراته‌شدن کامل بیوپلیمرها، عمل هم‌زدن دیسپرسیون ژلاتین و صمغ عربی به ترتیب در دمای ۵۰°C و ۲۵°C به مدت ۱۸ ساعت در بن‌ماری (فن‌آزمایشگر؛ ایران) انجام شد.

تهیه امولسیون روغن ماهی در آب: در ابتدا برای هر تیمار، طبق میزان تعیین‌شده (صفر، ۲۰۰ و ۳۰۰۰ ppm)، اسانس میخک با روغن ماهی مخلوط شد. سپس محلول ژلاتین به روغن ماهی حاوی اسانس میخک اضافه و به مدت ۳۰ ثانیه با دستگاه هموژنایزر اولتراتوراکس مدل wise 15D (IKA Dispersers؛ کره‌جنوبی) دور ۷۰۰۰ rpm کاملاً همگن شدند. سپس آب مقطر نیز اضافه و به مدت ۱۰ دقیقه با هموژنایزر دور ۱۱۰۰۰ rpm یکنواخت شد، پس از این مرحله محلول صمغ عربی به آن افزوده و دوباره به مدت ۱۰ دقیقه همگن شد، به این ترتیب آماده‌سازی امولسیون چندگانه روغن در آب صورت گرفت. با افزودن اسید هیدروکلریدریک، pH امولسیون به ۳/۸ رسید و به‌منظور ایجاد الحاقات عرضی ۱٪ آنزیم ترانس‌گلوتامیناز نیز به آن اضافه شد. در پایان ۳٪ مالتودکسترین به‌عنوان کمک‌خشک‌کن در دستگاه خشک‌کن انجمادی به محلول‌ها اضافه و ۲ دقیقه با دور ۷۰۰۰ rpm همگن شدند. به‌منظور خشک‌کردن امولسیون‌ها و دستیابی به پودر خشک، دستگاه خشک‌کن انجمادی مدل FDU-8624 (Operon؛ کره جنوبی) به کار رفت. برای این منظور امولسیون‌ها در ظروف یک‌بارمصرف ریخته شدند، ابتدا در قسمت فریزر یخچال معمولی در دمای ۱۸°C قرار گرفتند، بعد از منجمدشدن، نمونه‌ها در داخل اتاقک خشک‌کن انجمادی در دمای ۸۵°C- قرار گرفتند تا فرایند

امگا ۳ توسط دیواره ژلاتین پوست ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان و صمغ عربی با استفاده از روش کوآسرواسیون مرکب تولید شدند. براساس نتایج حاصل از پژوهش آنها سرعت هموژنایزر بیشترین تاثیر را بر اندازه ذرات داشت همچنین پودرهای تولیدشده دارای کارایی ریزپوشانی در حدود ۶۹/۷۴ تا ۹۸/۴۱٪ بودند. در مطالعه‌ای که توسط ونگ و همکاران [14] صورت گرفت، بهینه‌سازی ریزپوشانی روغن ماهی تن در هگزامتافسفات ژلاتین-سدیم (SHMP) با استفاده از کوآسرواسیون پیچیده بررسی شد. بالاترین عملکرد کواسروات پیچیده در pH برابر ۴/۷ و در نسبت ۱:۱۵ ژلاتین به SHMP به دست آمد. میزان ۹۸/۵۶٪ روغن با موفقیت میکرو شد و ثبات آن بیش از دوبرابر روغن غیرمحصورشده بود. لی و همکاران [15]، بهینه‌سازی ریزپوشانی روغن دانه کتان را در ماتریسی از ژلاتین- صمغ عربی از طریق کوآسرواسیون مرکب بررسی کردند، نتایج نشان داد که با افزایش دور هموژنایزر ساختار کپسول‌ها از نوع تک‌هسته‌ای کروی به کپسول‌های چندهسته‌ای نامنظم تغییر می‌کند. اندازه کپسول‌ها و مقدار روغن کپسوله‌نشده با افزایش غلظت بیوپلیمر کل از ۱ به ۲٪ وزنی/حجمی افزایش یافت، راندمان ریزپوشانی در این پودرها ۸۴٪ گزارش شد.

آبزیان مقادیر بالایی از اسیدهای چرب غیراشباع دارند. بدن انسان قادر به سنتز اسیدهای چرب چند غیراشباعی نیست، بنابراین دریافت مستقیم غلظت‌های مشخصی از این چربی‌های زیست‌فعال از طریق جیره غذایی ضروری است [16]. با توجه به پایین‌بودن سرانه مصرف غذاهای دریایی در ایران و در راستای آن کاهش دریافت امگا ۳ می‌توان با به‌کاربردن فناوری‌هایی جدید، محصولات غذایی را با این گونه ترکیبات غنی کرد. ایران به‌دلیل دارا بودن ذخایر شیلاتی، پتانسیل بالایی نیز در تولید محصولات جانبی (مانند روغن ماهی، ژلاتین ماهی و غیره) از ضایعات بهره‌برداری‌نشده آبزیان دارد. در نتیجه می‌توان از این ضایعات در قالب فرآورده‌های بیولوژیک و دارای ارزش افزوده و به‌عنوان منبعی برای تولید نانوکپسول‌های روغن ماهی و اسیدچرب ماهی استفاده کرد.

اسانس میخک با توجه به محتوای بالای اوژنولی خواص ضد میکروبی قابل توجه و فعالیت‌های درمانی مانند ضد التهاب، ضد درد [17] و خواص آنتی‌اکسیدان [18] دارد. اسانس جوانه میخک به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان گیاهی موثر شناخته شده است که ترکیبات فنلی (بیش از ۸۰٪ اوژنول) دارد. جداسازی بخش غنی از اوژنول میخک و استفاده از آن به‌عنوان یک منبع آنتی‌اکسیدان طبیعی به شکل ریزپوشانی‌شده و ریزپوشانی‌نشده در سامانه‌های غذایی گزارش شده است، با این حال استفاده از بخش غنی از اوژنول میخک در مواد غذایی، با توجه به بوی تند آن به‌عنوان یک طعم‌دهنده محدود است [19]. براساس مجموعه پژوهش‌های صورت‌گرفته، تاکنون پژوهشی در زمینه تولید نانوکپسول امگا ۳ به همراه اسانس گیاه میخک با استفاده از روش کوآسرواسیون و استفاده از ژلاتین ماهی و صمغ عربی به‌عنوان مواد دیواره انجام نشده است.

هدف پژوهش حاضر بررسی روش تولید نانوکپسول‌های روغن ماهی به همراه اسانس میخک با استفاده از تکنیک کوآسرواسیون بود.

مواد و روش‌ها

در پژوهش تجربی حاضر ژلاتین ماهی (سیگماآلدریج؛ ایالات

استفاده از معادله‌های زیر صورت پذیرفت [22]:

$$D_{43} = \frac{\varepsilon n_i d_i^4}{\varepsilon n_i d_i^3}$$

$$\text{Span} = \frac{D(90\%) - D(10\%)}{D(50\%)}$$

$$\text{SSA} = \frac{6}{D_{43}}$$

n_i برابر با تعداد قطرات با قطر d_i است.

D (۱۰٪، ۵۰٪ و ۹۰٪): قطری که حجم ذرات کوچک‌تر از آن به ترتیب ۹۰، ۵۰ و ۱۰٪ حجم کل ذرات موجود در سیستم را تشکیل می‌دهد.

D_{43} برابر میانگین قطر برحسب حجم - وزن است. پژوهش حاضر به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. آزمون واریانس یک‌طرفه برای تجزیه و تحلیل داده‌ها انجام شد تا تفاوت بین میانگین تیمارها مشخص شود و سپس از آزمون دانکن برای مشخص کردن معنی‌داری تفاوت بین میانگین‌ها در سطح آلفای برابر ۰/۰۵ استفاده شد، همچنین نرم‌افزار SPSS 16 به کار رفت.

یافته‌ها

اختلاف شاخص‌های روشنایی و زردی بین ۱۸ تیمار معنی‌دار بود (۰/۰۵ < p). بیشترین مقدار روشنایی و زردی به ترتیب در تیمار ۱۶ و ۴ و کمترین آن در تیمار ۷ مشاهده شد (جدول ۱).

بازدهی ریزپوشانی پودرهای تولیدشده بین ۶۵/۱۲/۷۵ تا ۹۸/۸۴±۰/۷۸٪ در تیمارهای مختلف متفاوت بود (جدول ۲). روغن سطحی و بازدهی ریزپوشانی بین ۱۸ تیمار معنی‌دار بود (۰/۰۵ < p). بالاترین سطح بازدهی در تیمار ۴ (۹۸/۸۴±۰/۷۸) مشاهده شد که در این تیمار مقدار زیادی از روغن توسط بیوپلیمر کل احاطه شده و میزان روغنی که در سطح کپسول‌ها حضور داشت بسیار ناچیز بود، بنابراین می‌توان تیمار ۴ را به عنوان بهترین تیمار به دلیل دارابودن بالاترین مقدار بازدهی ریزپوشانی معرفی کرد. همچنین کمترین سطح بازدهی مربوط به تیمار ۱۵ (۶۵/۱۲/۷۵) بود که بیشترین مقدار روغن سطحی را داشت (جدول ۲).

به منظور بررسی اندازه و پتانسیل زتا ذرات امولسیون سه تیمار ۱۰، ۴ و ۸ که به ترتیب حاوی ۶، ۸ و ۱۰٪ مخلوط بیوپلیمر (ژلاتین - صمغ عربی) بودند، انتخاب شدند. معیار انتخاب این نمونه‌ها بالاترین درصد بازدهی ریزپوشانی بود. همچنین به منظور تعیین تاثیر اندازه کپسول بر بازدهی ریزپوشانی، تیمار ۱۵ که کمترین مقدار بازدهی ریزپوشانی در بین تیمارها را داشت، انتخاب شد.

در کوآسراوی حاصل از برهم‌کنش الکترواستاتیک بین ژلاتین و صمغ عربی، روغن ریزپوشانی‌شده اندازه‌ای در محدوده نانومتر داشت. اندازه ذرات تحت تاثیر غلظت بیوپلیمر بودند، با افزایش غلظت مخلوط بیوپلیمر اندازه ذرات افزایش یافت و محدوده اندازه ذرات بین ۲۵۹/۱۹±۵۵/۸۳ (تیمار ۱۰) تا ۸۱۴/۳۵±۲۵۳/۰۵ (تیمار ۱۵) نانومتر بود. کمترین مقدار شاخص اسپان مربوط به ۲ تیمار ۱۰ و ۱۵ بود. سطح مخصوص با میانگین اندازه ذرات رابطه عکس داشت، بیشترین سطح مخصوص مربوط به تیمار ۱۰ بود که پایداری در این امولسیون بیشتر از سایر امولسیون‌ها و کمترین آن به تیمار ۱۵ مربوط بود (جدول ۳).

خشک شدن تحت خلا را سپری نمایند. در نهایت پودرهای تولیدشده در ظروف تیره کاملاً در بسته نگهداری شدند.

آزمایش‌های صورت گرفته روی پودر نانوکپسول‌ها به صورت زیر بود: **اندازه‌گیری رنگ میکروکپسول‌ها:** برای سنجش رنگ میکروکپسول‌ها مقداری از پودرها روی کاغذی تیره ریخته، سپس میزان رنگ با استفاده از دستگاه رنگ‌سنج مدل IMG-Pardazesh Cam-System XI (ابزارکاران فن‌پویای شمال ایران؛ ایران) و سه فاکتور a، b و L در هر نمونه اندازه‌گیری شدند. مقدار L میزان روشنایی، a محدوده قرمز- سبز و b محدوده آبی- زرد را نشان می‌دهند.

اندازه‌گیری روغن سطحی: به منظور اندازه‌گیری روغن موجود در سطح کپسول‌ها، ۱۲ میلی‌لیتر هگزان به ۲ گرم پودر اضافه و ۲ دقیقه ورتکس شد، پس از آن به مدت ۲۰ دقیقه با دستگاه سانتریفیوژ مدل BH:1200 (ارمغان طب ایرانیان: ایران) در دور ۸۰۰۰rpm سانتریفیوژ شدند. محلول روپی با کاغذ صافی فیلتر و کاغذ صافی دوبار با هگزان شسته شد. روغن باقی‌مانده به همراه هگزان در آون (فن‌آزمایشگاه: ایران) با دمای ۱۰۵°C قرار گرفت تا حلال کاملاً تبخیر شد، پس از آن محاسبه روغن آزاد صورت پذیرفت [21].

اندازه‌گیری روغن ریزپوشانی‌شده: به میزان ۲ میلی‌لیتر آب مقطر با پودر حاصل از مرحله قبل (پودر عاری از روغن سطحی) مخلوط و به مدت یک دقیقه ورتکس شدند. به میزان ۲۵ میلی‌لیتر هگزان/ایزوپروپانول با نسبت ۱:۳ به محلول اضافه و روغن آن کاملاً استخراج شد. سپس ۲۰ دقیقه در دور ۴۰۰۰rpm سانتریفیوژ شد. فاز آلی شفاف جدا و دوباره فاز آبی با مخلوط حلال استخراج شد. در پایان محلول حاوی روغن کپسوله‌شده در آون با دمای ۱۰۵°C قرار گرفت تا زمانی که حلال کامل تبخیر شد و روغن باقی‌مانده پس از وزن آن محاسبه شد [21].

بازدهی ریزپوشانی: بازدهی ریزپوشانی از رابطه زیر محاسبه شد [21]:

$$EE = \frac{\text{Encapsulated Oil} \left(\frac{\text{gr}}{100 \text{ gr}} \right)}{\text{Total Oil} \left(\frac{\text{gr}}{100 \text{ gr}} \right)} * 100$$

روغن کل برابر مجموع روغن کپسوله‌شده و روغن سطحی است. **اندازه‌گیری رنگ نانوکپسول‌ها:** برای اندازه‌گیری رنگ نانوکپسول‌ها مقداری از پودر را روی کاغذی تیره ریخته و سپس میزان رنگ و سه فاکتور a، b و L در هر نمونه با استفاده از دستگاه رنگ‌سنج مدل IMG-Pardazesh Cam-System XI (ابزارکاران فن‌پویای شمال: ایران) اندازه‌گیری شدند.

آزمایش‌های صورت گرفته روی امولسیون‌ها به قرار زیر بود:

اندازه ذرات امولسیون و پتانسیل زتا: اندازه ذرات امولسیون با استفاده از دستگاه پراکندگی نور دینامیک تعیین شد. مقدار کمی از امولسیون در کووت ریخته و با آب مقطر رقیق شد. کووت در دستگاه قرار گرفت سپس اندازه ذرات و پتانسیل زتا اندازه‌گیری شدند. این دستگاه قطر ذرات را براساس تئوری می (Mie) و از روی پراکنش اشعه محاسبه و میانگین قطر را تحت عناوین ساتر یا میانگین قطر حجم-وزن (D_{43}) به دست می‌دهد. شاخص اسپان دامنه نمودار توزیع اندازه ذرات را نشان می‌دهد هر چه نمودار باریک‌تر باشد عدد اسپان کوچک‌تر است. سطح مخصوص ذرات نیز برحسب میلی‌متر مربع بر میلی‌لیتر از روی قطر متوسط محاسبه شد. اندازه‌گیری قطر، توزیع اندازه و سطح مخصوص ذرات با

جدول ۱) مقایسه میانگین پارامترهای رنگ‌سنجی پودر نانوکپسول‌های تولیدشده

تیمار	بیوپلیمر کل (%)	روغن ماهی (%)	اسانس میخک (ppm)	میزان روشنایی	محدوده قرمز-سبز	محدوده آبی-زرد
۱	۶	۲	صفر	۷۷/۴۰±۱/۳۵ ^{bcde}	-۲/۴۰±۱/۶۲ ^{abc}	۱۱/۷۰±۱/۲۴ ^{cdef}
۲	۶	۲	۲۰۰۰	۸۰/۴۱±۱/۲۲ ^{ab}	-۳/۹۵±۱/۷۸ ^{bc}	۱۱/۱۹±۱/۷۵ ^{def}
۳	۶	۲	۳۰۰۰	۷۸/۴۶±۲/۶۵ ^{abcd}	-۲/۲۸±۲/۸۷ ^{abc}	۱۲/۸۱±۱/۳۹ ^{bcdef}
۴	۸	۲	صفر	۷۷/۹۰±۲/۴۸ ^{abcde}	-۳/۵۳±۰/۵۷ ^{bc}	۱۵/۵۵±۱/۲۱ ^{abc}
۵	۸	۲	۲۰۰۰	۷۹/۰۱±۱/۸۹ ^{abcd}	-۳/۸۰±۲/۰۳ ^{bc}	۱۲/۵۱±۱/۵۰ ^{bcdef}
۶	۸	۲	۳۰۰۰	۷۸/۸۷±۱/۲۷ ^{abcd}	-۱/۲۶±۲/۷۸ ^{ab}	۱۰/۹۴±۳/۰۸ ^{def}
۷	۱۰	۲	صفر	۷۲/۱۹±۱/۴۸ ^f	-۰/۲۶±۱/۹۳ ^a	۶/۲۸±۵/۱۱ ^g
۸	۱۰	۲	۲۰۰۰	۷۵/۹۲±۲/۴۰ ^{de}	-۱/۸۵±۰/۸۴ ^{abc}	۸/۷۸±۱/۷۸ ^{fg}
۹	۱۰	۲	۳۰۰۰	۸۰/۰۳±۰/۶۸ ^{abc}	-۳/۱۴±۱/۷۸ ^{abc}	۱۲/۶۸±۰/۶۸ ^{bcdef}
۱۰	۶	۳	صفر	۷۴/۹۳±۰/۸۶ ^e	-۳/۸۲±۱/۵۷ ^{bc}	۱۲/۰۹±۱/۲۹ ^{cdef}
۱۱	۶	۳	۲۰۰۰	۷۹/۴۰±۲/۵۵ ^{abc}	-۴/۲۰±۳/۰۶ ^{bc}	۱۳/۸۰±۳/۷۹ ^{bcdef}
۱۲	۶	۳	۳۰۰۰	۷۹/۴۲±۱/۶۲ ^{abc}	-۲/۵۲±۱/۶۶ ^{abc}	۱۲/۰۵±۳/۳۴ ^{cdef}
۱۳	۸	۳	صفر	۷۶/۸۲±۳/۱۴ ^{cde}	-۳/۲۱±۱/۴۲ ^{bc}	۱۳/۰۰±۲/۸۱ ^{bcdef}
۱۴	۸	۳	۲۰۰۰	۷۹/۲۴±۱/۴۱ ^{abc}	-۳/۶۲±۱/۱۹ ^{bc}	۱۸/۰۱±۲/۰۸ ^a
۱۵	۸	۳	۳۰۰۰	۷۹/۰۸±۱/۸۷ ^{abcd}	-۲/۸۶±۱/۴۱ ^{abc}	۱۶/۳۹±۳/۶۱ ^{ab}
۱۶	۱۰	۳	صفر	۸۰/۳۷±۲/۷۷ ^a	-۱/۶۸±۲/۲۵ ^{ab}	۹/۵۸±۵/۷۵ ^{efg}
۱۷	۱۰	۳	۲۰۰۰	۷۸/۱۸±۴/۲۳ ^{abcd}	-۴/۷۳±۲/۵۹ ^c	۱۳/۴۵±۱/۶۷ ^{bcde}
۱۸	۱۰	۳	۳۰۰۰	۷۸/۲۰±۲/۸۵ ^{abc}	-۳/۹۳±۲/۱۳ ^{bc}	۱۵/۰۱±۲/۵۳ ^{abcd}

حروف مشترک در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌داری بین میانگین‌ها است

جدول ۲) مقایسه میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده روغن سطحی، روغن کپسوله‌شده و بازدهی ریزپوشانی

تیمار	بیوپلیمر کل (%)	روغن ماهی (%)	اسانس میخک (ppm)	روغن سطحی (%)	روغن کپسوله‌شده (%)	بازدهی ریزپوشانی (%)
۱	۶	۲	صفر	۴/۹۴±۱/۹۸ ^{de}	۳۶/۹۰±۱۰/۲۰ ^{abc}	۸۸/۴۹±۱/۸۶ ^{fg}
۲	۶	۲	۲۰۰۰	۲/۱۲±۰/۹۲ ^{fgh}	۳۸/۴۸±۱۳/۷۰ ^{abc}	۹۴/۹۰±۰/۵۳ ^{bcd}
۳	۶	۲	۳۰۰۰	۲/۷۹±۱/۴۱ ^{efgh}	۳۴/۶۰±۱۰/۱۰ ^{abc}	۹۲/۹۳±۱/۹۵ ^{cde}
۴	۸	۲	صفر	۰/۵۶±۰/۴۲ ^h	۴۲/۹۰±۱۰/۳۰ ^{abc}	۹۸/۸۴±۰/۷۸ ^a
۵	۸	۲	۲۰۰۰	۰/۶۶±۰/۳۰ ^h	۴۳/۳۸±۱۰/۸۰ ^{abc}	۹۸/۵۷±۰/۳۸ ^a
۶	۸	۲	۳۰۰۰	۳/۳۷±۱/۵۶ ^{defg}	۳۴/۹۶±۱۲/۹۰ ^{abc}	۹۰/۹۲±۳/۰۱ ^{ef}
۷	۱۰	۲	صفر	۱/۸۲±۰/۴۷ ^{fgh}	۳۳/۳۵±۱۱/۳۰ ^{abc}	۹۴/۷۱±۰/۵۴ ^{bcd}
۸	۱۰	۲	۲۰۰۰	۱/۵۴±۰/۶۸ ^{fgh}	۳۶/۳۳±۱۰/۷۰ ^{abc}	۹۶/۰۲±۱/۲۹ ^{abc}
۹	۱۰	۲	۳۰۰۰	۲/۲۴±۰/۴۶ ^{fgh}	۲۷/۱۲±۷/۷۰ ^c	۹۲/۲۴±۰/۷۴ ^{de}
۱۰	۶	۳	صفر	۱/۴۴±۰/۴۲ ^{gh}	۴۶/۵۰±۷/۳۰ ^{ab}	۹۶/۹۶±۰/۸۶ ^{ab}
۱۱	۶	۳	۲۰۰۰	۱۲/۱۹±۱/۳۹ ^b	۳۴/۵۸±۱/۲۰ ^{abc}	۷۳/۹۸±۱/۹۰ ^h
۱۲	۶	۳	۳۰۰۰	۲/۴۷±۱/۰۷ ^{fgh}	۲۷/۸۱±۷/۲۵ ^c	۹۲/۰۴±۱/۳۳ ^{de}
۱۳	۸	۳	صفر	۱/۵۷±۰/۱۸ ^{fgh}	۴۲/۶۲±۷/۱۰ ^{abc}	۹۶/۴۲±۰/۵۱ ^{ab}
۱۴	۸	۳	۲۰۰۰	۱۲/۱۲±۲/۸۳ ^b	۳۴/۵۱±۲/۶۰ ^{abc}	۷۴/۲۶±۳/۲۹ ^h
۱۵	۸	۳	۳۰۰۰	۱۶/۰۷±۱/۴۶ ^a	۳۰/۰۰±۲/۲۳ ^{bc}	۶۵/۱۰±۲/۷۵ ⁱ
۱۶	۱۰	۳	صفر	۴/۰۸±۱/۲۷ ^{def}	۳۹/۴۷±۶/۴۰ ^{abc}	۹۰/۸۰±۱/۴۴ ^{ef}
۱۷	۱۰	۳	۲۰۰۰	۵/۵۱±۱/۹۰ ^f	۴۹/۲۳±۰/۴۰ ^a	۹۰/۰۱±۳/۲۵ ^{ef}
۱۸	۱۰	۳	۳۰۰۰	۷/۷۴±۱/۶۴ ^c	۴۷/۸۱±۹/۵۰ ^a	۸۶/۱۶±۱/۸۳ ^g

حروف مشترک در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌داری بین میانگین‌ها است

جدول ۳) میانگین و توزیع اندازه ذرات و پتانسیل زتا امولسیون نانوکپسول‌های روغن ماهی

تیمار	بیوپلیمر کل (%)	بازدهی ریزپوشانی (%)	میانگین اندازه ذرات (nm)	سطح مخصوص ذرات $\frac{m^2}{ml}$	اسپان	پتانسیل زتا (میلی‌ولت)
۱۰	۶	۹۶/۹۶±۰/۸۶	۲۵۹/۱۹±۵۵/۸۳ ^d	۰/۰۲۳	۰/۵۱	-۲۹/۵±۳/۴ ^a
۴	۸	۹۸/۸۴±۰/۷۸	۲۸۲/۲۷±۷۵/۸۸ ^c	۰/۰۲۱	۰/۷	-۱۹/۷±۲/۰ ^c
۸	۱۰	۹۶/۰۲±۱/۲۹	۳۶۰/۲±۲۶۸/۱۰ ^b	۰/۰۱۷	۱/۳۳	-۲۵/۹±۱/۲ ^b
۱۵	۱۰	۶۵/۱۰±۲/۷۵	۸۱۴/۳۵±۲۵۳/۰۵ ^a	۰/۰۰۷	۰/۵۱	-۱۶/۹±۱/۷ ^d

رنگ پودرهای تولیدشده از نظر افزودن به محصولی دیگر و پذیرش در بازار مصرف بسیار اهمیت دارد. به‌منظور بررسی رنگ پودرها، سه شاخص a ، b و L اندازه‌گیری می‌شود که مقدار L روشنایی را نشان می‌دهد، a در جهت مثبت (افزایش) شاخص رنگ قرمز و در جهت

بحث
هدف پژوهش حاضر بررسی روش تولید نانوکپسول‌های روغن ماهی به همراه اسانس میخک با استفاده از تکنیک کوآسرواسیون بود.

داشتند. همچنین مشابه این نتایج در مطالعه جعفرپور و همکاران^[13] هم مشاهده شد، در مطالعه آنها با افزایش غلظت امگا ۳ از ۱۰ به ۳۰٪ مقادیر روغن سطحی افزایش یافت.

بازدهی ریزپوشانی بیان‌کننده مقدار روغنی است که با موفقیت توسط بیوپلیمر احاطه و ریزپوشانی شده است که از استخراج آن توسط یک فرآیند شست‌وشو با حلال جلوگیری می‌کند^[21]. بازدهی ریزپوشانی در این پژوهش از ۶۵/۱ تا ۹۸/۸۴٪ در تیمارهای مختلف متفاوت بود. طبق نتایج به‌دست‌آمده برای تاثیر اسانس میخک و درصد روغن بر بازدهی ریزپوشانی منفی است یعنی با افزایش غلظت اسانس میخک و درصد روغن میزان بازدهی کاهش یافت. تیمار ۴ و ۱۵ که به‌ترتیب بیشترین و کمترین بازدهی ریزپوشانی را داشتند، درصد بیوپلیمر کل ثابت (۸٪)، اما درصد روغن متغیر (۲ و ۳٪) بود و نشان داد که با افزایش درصد روغن بازدهی ریزپوشانی کاهش می‌یابد، همچنین با افزایش غلظت بیوپلیمر از ۶ به ۸٪ میزان بازدهی ریزپوشانی کاهش یافت، یعنی مقدار روغن کمتری توسط بیوپلیمر احاطه شده بود که با نتایج پژوهش لویو و همکاران^[15] مطابقت داشت، در پژوهش آنها مقدار روغن کپسوله‌نشده با افزایش غلظت بیوپلیمرها از ۱ به ۲٪ (وزنی/حجمی) افزایش یافت. کپسول‌های ژلاتین صمغ عربی با نسبت ۱:۱ هسته به دیواره تولید شدند و راندمان ریزپوشانی در این پودرها ۸۴٪ گزارش شد.

در مطالعات مختلف مقدار بازدهی ریزپوشانی تا ۹۸٪ گزارش شده است که در زیر به اختصار به بعضی از آنها اشاره شده است. گارسیا و همکاران^[28] ترکیب مالتودکستین، صمغ عربی و ژلاتین را به‌عنوان مواد دیواره برای ریزپوشانی روغن کبد ماهی بررسی کردند. بازدهی ریزپوشانی در مطالعه آنها در محدوده ۸۲٪ بود. در مطالعه ونگ و همکاران^[14] بالاترین عملکرد کوآسرواسیون مرکب در میزان PH برابر با ۴/۷ و در یک ژلاتین با نسبت ۱:۱۵ به هگزاتاسفاسفات سدیم به دست آمد و ۹۸/۵۶٪ روغن با موفقیت ریزپوشانی شد. در پژوهش جعفرپور و همکاران^[13] تیمارهایی که در آن اسیدهای چرب امگا ۳ بیشتری استفاده شده، در مقایسه با تیمارهایی با امگا ۳ کمتر، بازدهی ریزپوشانی کمتری داشتند و پودرهای تولیدشده کارایی ریزپوشانی در حدود ۶۹/۷۴ الی ۹۸/۴۱٪ را نشان دادند.

در پژوهش ژانگ و همکاران^[29] روغن ماهی با استفاده از محصولات واکنش میلارد (HSPi-MD)، پروتئین آبکافت‌شده ایزوله سویا (HSPi) و مالتودکستین به روش خشک‌کن انجمادی ریزپوشانی شد. بازدهی ریزپوشانی ترکیبات HSPi-MD با افزایش مدت‌زمان واکنش از ۶۳/۲۳٪ به ۸۷/۲۴٪ رسید. از آنجایی که تاکنون در زمینه تاثیر اسانس میخک بر بازدهی ریزپوشانی در سطح ملی و بین‌المللی پژوهشی صورت نگرفته علت دقیق کاهش بازدهی ریزپوشانی به‌دلیل افزایش غلظت اسانس میخک نامعلوم است و به بررسی‌های گسترده‌تر نیاز دارد.

اندازه ذرات و توزیع آنها، نقش مهمی در ویژگی‌های فیزیکی سیستم‌های کلوئیدی مانند پایداری طی نگهداری، کدورت و ویژگی‌های رئولوژیک دارد، همچنین بر ویژگی‌هایی مانند دسترسی زیستی، خواص ارگانولپتیکی و حسی فرآورده‌های غذایی حاوی آن مؤثر است^[30]. کاهش اندازه ذرات موجب افزایش نسبت سطح به حجم ذرات شده و بدین‌طریق بر ویژگی‌های فیزیکی، زیستی و حسی سیستم تاثیر می‌گذارد^[31]. کاهش اندازه ذرات، ثبات نانوامولسیون‌ها را در برابر ته‌نشینی و خامه‌ای‌شدن همراه با

منفی شاخص رنگ سبز است. شاخص b در جهت مثبت شاخص رنگ زرد و در جهت منفی شاخص رنگ آبی است. طبق نتایج حاصل از پژوهش حاضر شاخص زردی با افزایش درصد روغن و غلظت اسانس میخک افزایش یافت همچنین این شاخص با افزایش درصد بیوپلیمر کل تا محدوده مشخصی افزایش اما در غلظت‌های بالاتر کاهش یافت. شاخص روشنایی با افزایش غلظت بیوپلیمر کل کم شد که با پژوهش جعفرپور و همکاران^[13] مطابقت دارد در مطالعه آنها نانوکپسول‌های حاوی امگا ۳ ماهی به‌همراه ژلاتین و صمغ عربی به روش کوآسرواسیون تولید شدند. نتایج آنها نشان داد با افزایش غلظت ژلاتین ماهی و درصد روغن میزان روشنایی پودرهای تولیدی کاهش می‌یابد. همچنین در پژوهش کلینکرسورن و همکاران^[21] امولسیون روغن ماهی تون در آب با استفاده از یک فرآیند رسوب الکترواستاتیک لایه به لایه بررسی شد که مقدار L در امولسیون تولیدشده پایین و مقدار b بالا بود احتمالاً دلیل آن حضور محصولات تولیدشده از واکنش قهوه‌ای‌شدن غیرآزیمی مثل واکنش کیتوزان با مولکول‌های قند در لسیته‌ین در طول فرآیند خشک‌شدن بوده است. در پژوهشی دیگر^[23] از کیتوزان، مالتودکستین و پروتئین آب‌پنیر به منظور ریزپوشانی روغن ماهی استفاده شد. رنگ پودرهای ساخته‌شده از کیتوزان و مالتودکستین در مقایسه با پودرهایی که با کیتوزان و پروتئین آب‌پنیر تولید شدند، سفیدتر بود که این احتمالاً به‌دلیل وجود پروتئین آب‌پنیر است و منجر به افزایش شاخص زردی پودرها می‌شود.

روغن سطحی در امولسیون‌های پودر شده معمولاً به قسمتی از روغن گفته می‌شود که با حلال‌های آلی قابل استخراج بوده و نشان‌دهنده چربی موجود در سطح پودرها است. حضور روغن در سطح ذرات پودر نامطلوب‌ترین ویژگی پودرهای ریزپوشانی‌شده است^[24]. علاوه بر محاسبه مقدار روغن کپسوله‌شده مقدار روغن سطحی هم اهمیت دارد. روغن سطحی به‌دلیل حضور در سطح بیرونی کپسول و تماس مستقیم با اکسیژن مستعد اکسیداسیون است بنابراین مقدار آن باید بسیار اندک باشد^[25]. طبق نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش مقادیر روغن سطحی در ۱۸ تیمار بین ۱۶/۰۷±۱/۴۶ تا ۰/۵۶±۰/۴۲ قرار داشت. با افزایش مقدار مواد هسته (روغن) از ۲ به ۳٪ و غلظت اسانس میخک از صفر به ۳۰۰۰ppm شاخص روغن سطحی افزایش یافت. احتمالاً در تکنیک ریزپوشانی زمانی که درصد مواد هسته افزایش می‌یابد، پلیمرهای موجود توانایی احاطه‌کردن کامل مواد هسته را ندارند و در سطح کوآسروای حاصل از مواد دیواره تجمع می‌کنند. کمترین مقدار روغن سطحی در تیماری مشاهده شد که کمترین درصد روغن را داشت و عاری از اسانس میخک بود.

نتایج حاصل از بررسی روغن سطحی در پژوهش حاضر با نتایج حاصل از پژوهش کولانووسکی و همکاران^[26] که توانایی سلولزهای اصلاح‌شده و مالتودکستین را به‌عنوان عوامل میکروکپسوله‌کننده روغن ماهی بررسی کردند، مطابقت دارد، در پژوهش آنها در غلظت ۲۰٪ روغن، بازدهی ریزپوشانی ۸۶/۵٪ و در غلظت ۴۰٪ روغن، بازدهی ریزپوشانی ۸۴/۸٪ حاصل شد، آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش درصد روغن در امولسیون موجب افزایش روغن سطحی می‌شود. درازش و برگ^[27] تاثیر مقدار ماده هسته در مقدار روغن سطحی را بررسی کردند، در پژوهش آنها تیمارهایی که حاوی ۳۰٪ روغن به‌عنوان ماده هسته بودند در مقایسه با تیمارهای حاوی ۵۰٪ روغن، روغن سطحی کمتری

کلونیدی موجب بالارفتن نیروی دافعه الکترواستاتیک و در نتیجه افزایش پایداری فیزیکی سیستم می‌شود. عوامل مختلفی از جمله قدرت یونی، نوع و غلظت بیوپلیمرهای پلی‌ساکاریدی و پروتئینی مورد استفاده و نسبت بین آنها روی میزان بار سطحی و پتانسیل زتا کمپلکس حاصل موثر است. مقادیر پتانسیل زتا در ۴ تیمار در محدوده بین ۱۶/۷- تا ۲۹/۵- قرار داشت و تیمار ۱۰ با پتانسیل ۲۹/۵- پایداریترین امولسیون بود، زیرا حامل بیشترین مقدار بار الکتریکی بود. در پژوهش حاضر با افزایش غلظت مخلوط بیوپلیمر پتانسیل زتا کاهش یافت که با پژوهش مورو و همکاران^[36] مطابقت داشت. در مطالعه آنها فرآیند تولید و خصوصیات امولسیون روغن در آب که با مواد دیواره لاکتوگلوبین- پکتین تثبیت شده بود، بررسی شد که با افزایش غلظت پکتین شاخص پتانسیل زتا از ۳۳+ تا ۱۹- کاهش یافت.

در مطالعه حسینی و همکاران^[37] اثر صمغ دانه بالنگ شیرازی و پروتئین آب‌پنیر بر پایداری امولسیون روغن در آب بررسی شد. در این پژوهش پایداریترین حالت امولسیون با درصد حجمی فاز روغنی ۳۵٪، پتانسیل زتایی برابر با ۵۹/۴- میلی‌ولت داشت که در حداکثر غلظت صمغ بالنگ و حداقل غلظت پروتئین آب‌پنیر روی داد. افزایش بیش از حد غلظت بیوپلیمر در نتیجه افزایش ویسکوزیته گاهی موجب کاهش پتانسیل زتا و افزایش اندازه ذرات خواهد شد زیرا نوسانات ذرات در برابر نور لیزر دستگاه تفرق دینامیکی نور (DLS) در محیط با ویسکوزیته بالا کاهش می‌یابد و دستگاه از آن به افزایش اندازه ذره تعبیر می‌کند.

از محدودیت‌های مطالعه حاضر می‌توان به کمبود ابزار، مواد و تجهیزات آزمایشگاهی مطابق با علم روز دنیا اشاره کرد.

نتیجه‌گیری

استفاده از تکنیک کوآسرواسیون پیچیده با استفاده از ژلاتین ماهی و صمغ عربی به‌عنوان بیوپلیمر، می‌تواند ذرات با اندازه نانو تولید کند. اندازه ذرات تحت تاثیر غلظت بیوپلیمر است. با افزایش غلظت مخلوط بیوپلیمر اندازه ذرات افزایش می‌یابد و سطح مخصوص با میانگین اندازه ذرات رابطه عکس دارد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان با کمال احترام از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و همچنین ستاد ویژه توسعه فناوری نانو کشور بابت حمایت و همکاری‌های بی‌دریغ کمال تشکر و قدردانی را دارند.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان یافت نشد.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌دارند هیچ گونه تعارض منافعی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: الهه شریفی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۷۰٪)؛ سیدعلی جعفرپور (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۲۵٪)؛ سیدمحمد هاشم حسینی (نویسنده سوم)، روش‌شناس (۱۵٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان یافت نشد.

منابع

- 1- Simopoulos AP, Norman HA, Gillaspay JE, Duke JA. Common purslane: A source of Omega-3 fatty acids and antioxidants. J Am Coll Nutr. 1992;11(4):374-82.
- 2- Eilander A, Hundscheid DC, Osendarp SJ, Transler C, Zock PL. Effects of n-3 long chain polyunsaturated fatty

ظاهری شفاف یا کمی کدر فراهم کرده و برای کاربردهای غذایی مناسب است^[32]. نتایج حاصل از میانگین اندازه ذرات نشان می‌دهد که محدوده اندازه ذرات امولسیون در این ۴ تیمار بین ۲۵۹/۱۹±۵۵/۸۳ تا ۸۱۴/۳۵±۲۵۳/۰۵ نانومتر است. عوامل مختلفی از قبیل نوع و غلظت مواد دیواره، نسبت بیوپلیمر، دور هم‌وزنایز و درصد روغن بر اندازه ذرات کمپلکس‌های پروتئین-پلی‌ساکارید تاثیرگذار هستند، در پژوهش حاضر با ثابت‌بودن دور هم‌وزنایز و افزایش غلظت بیوپلیمر از ۶ به ۱۰٪ اندازه ذرات افزایش یافت؛ که با پژوهش لئو و همکاران^[15] مطابقت دارد. در پژوهش آنها بهینه‌سازی ریزپوشانی روغن دانه کتان در ماتریسی از ژلاتین- صمغ عربی از طریق کوآسرواسیون مرکب بررسی شد و نتایج نشان داد اندازه کپسول‌ها با افزایش غلظت بیوپلیمرها از ۱ به ۲٪ (وزنی/حجمی) افزایش یافت.

زو و همکاران^[33] بیان کردند که افزایش نسبت پکتین در مخلوط (ایزوله پروتئین سویا- پکتین چغندر) موجب افزایش اندازه ذرات امولسیون حاصل از آن شد که دلیل آن را به حضور پکتین جذب‌نشده در سطح ذرات روغن نسبت دادند که موجب تجمع شده و اندازه ذرات را افزایش می‌دهد. عزیزنباری و همکاران^[31] در پژوهش خود به بررسی تولید کمپلکس‌های ژلان-کارئینات حاوی امگا ۳ پرداختند. طبق نتایج به‌دست‌آمده کوچک‌ترین اندازه ذرات ۳۸۵ نانومتر بود و قطر بیش از ۵۰٪ ذرات زیر ۳۷۲ نانومتر و بیش از ۹۰٪ ذرات زیر ۱۱۷۰ نانومتر بود. در این پژوهش با افزایش غلظت مواد دیواره، اندازه ذرات نیز افزایش یافت.

علاوه بر بررسی اندازه ذرات، بررسی توزیع ذرات و سطح مخصوص نیز دارای اهمیت است. محاسبه شاخص اسپان یکی از روش‌های رایج برای بیان دامنه توزیع اندازه ذرات است. پایین‌بودن این شاخص نشان‌دهنده توزیع یکنواخت و بالایبودن آن بیانگر عدم یکنواختی در توزیع اندازه ذرات است^[34]. مقادیر اسپان در ۴ تیمار در محدوده ۱/۳۳-۵۱/۰ مشاهده شد که در تیمارهای ۱۰ و ۱۵ مقادیر آن بسیار کمتر بود، احتمالاً در این دو تیمار توزیع اندازه ذرات نسبت به دو تیمار دیگر یکنواختی بیشتری داشتند. در پژوهش علی‌پور و همکاران^[34] کمترین عدد اسپان (۱/۳۱۵) مربوط به نمونه حاوی بیشترین نسبت پروتئین بود و کمترین اندازه ذره را داشت و بالاترین عدد اسپان (۱/۵۷) نیز به نمونه‌ای مربوط بود که بیشترین مقدار صمغ و اندازه ذره را داشت. افزایش سطح مخصوص ذرات نشان‌دهنده افزایش ثبات امولسیون است که هر چه این عدد بزرگ‌تر باشد، پایداری امولسیون بیشتر است^[34]. در این پژوهش محدوده سطح مخصوص در ۴ تیمار بین ۰/۲۳ تا ۰/۰۷ مترمربع بر میلی‌متر بود و در تیمار ۱۰ اندازه ذرات در محدوده ۲۵۹/۱۹ نانومتر قرار داشت. طبق مقادیر سطح مخصوص ذرات، پایداری در این تیمار نسبت به ۳ تیمار دیگر بیشتر بود.

در یک سیستم کلونیدی، اختلاف پتانسیل بین لایه‌های یونی غیرمتحرک (لایه استرن) و لایه متحرک (لایه انتشار) در اتمسفر یونی اطراف ذرات باردار، پتانسیل زتا نامیده می‌شود. پتانسیل زتا بهترین شاخص برای تعیین وضعیت الکتریکی سطح ذرات است زیرا نشان‌دهنده میزان تجمع بار در لایه غیرمتحرک و شدت جذب یون‌های مخالف روی سطح ذره است و بنابراین بار ذرات برحسب پتانسیل زتا گزارش می‌شود^[35]. ریشه چسبیدن ذرات به هم و آگلومره‌شدن آنها در پتانسیل زتا نهفته است. کاهش پتانسیل زتا و کاهش دافعه بین ذرات از طریق تعاملات واندروالسی موجب چسبیدن ذرات به یکدیگر می‌شود. بالایبودن پتانسیل زتای ذرات

carbon dioxide and other three traditional extraction methods. *Food Chem.* 2007;101(4):1558-64.

20- Kazemi F. Effect of different drying methods and Essential method of obtaining on the essential qualitative and essential oil components Roman chamomile flowers [Dissertation]. Tehran: Tarbiat Modares University; 2002. [Persian]

21- Klinkesorn U, Sophanodora P, Chinachoti P, Decker EA, Julian Mc Clements D. Characterization of spray-dried tuna oil emulsified in two-layered interfacial membranes prepared using electrostatic layer-by-layer deposition. *Food Res Int.* 2006;39(4):449-57.

22- Koocheki A, Kadkhodae R, Mortazavi SA, Shahidi F, Taherian AR. Influence of Alyssum homolocarpum seed gum on the stability and flow properties of O/W emulsion prepared by high intensity ultrasound. *Food Hydrocoll.* 2009;23(8):2416-24.

23- Klaypradit W, Huang YW. Fish oil encapsulation with chitosan using ultrasonic atomizer. *LWT Food Sci Technol.* 2008;41(6):1133-9.

24- Jafari SM, Assadpoor E, He Y, Bhandari B. Encapsulation efficiency of food flavours and oils during spray drying. *Dry Technol.* 2008;26(7):816-35.

25- Velasco J, Holgado F, Dobarganes C, Márquez-Ruiz G. Influence of relative humidity on oxidation of the free and encapsulated oil fractions in freeze-dried microencapsulated oils. *Food Res Int.* 2009;42(10):1492-500.

26- Kolanowski W, Laufenberg G, Kunz B. Fish oil stabilisation by microencapsulation with modified cellulose. *Int J Food Sci Nutr.* 2004;55(4):333-43.

27- Drusch S, Berg S. Extractable oil in microcapsules prepared by spray-drying: Localisation, determination and impact on oxidative stability. *Food Chem.* 2008;109(1):17-24.

28- García E, Gutiérrez S, Nolasco H, Carreón L, Arjona O. Lipid composition of shark liver oil: Effects of emulsifying and microencapsulation processes. *Eur Food Res Technol.* 2006;222(5-6):697-701.

29- Zhang Y, Tan C, Abbas S, Eric K, Xia S, Zhang X. Modified SPI improves the emulsion properties and oxidative stability of fish oil microcapsules. *Food Hydrocoll.* 2015;51:108-17.

30- Jurado E, Bravo V, Camacho F, Vicaria JM, Fernández-Arteaga A. Estimation of the distribution of droplet size, interfacial area and volume in emulsions. *Colloid Surf A Physicochem Eng Asp.* 2007;295(1-3):91-8.

31- Azizanbari Ch, Ghanbarzadeh B, Hamishehkar H, Hosseini M. Gellan-Caseinate nanocomplexes as a carrier of Omega-3 fatty acids: Study of particle size, Rheological properties and Encapsulation efficiency. *Food Process Preserv.* 2014;5(2):19-42. [Persian]

32- Tadros T, Izquierdo P, Esquena J, Solans C. Formation and stability of nano-emulsions. *Adv Colloid Interface Sci.* 2004;108-109:303-18.

33- Xu D, Wang X, Jiang J, Yuan F, Gao Y. Impact of whey protein - beet pectin conjugation on the physicochemical stability of β -carotene emulsions. *Food Hydrocoll.* 2012;28(2):258-66.

34- Alipour A, Koocheki A, Kadkhodae R, Varidi M. The effect of Alyssum homolocarpum seed gum-whey protein concentrate on stability of oil-in-water emulsion. *Food Sci Technol.* 2015;12(48):163-74. [Persian]

35- Jindal M, Kumar V, Rana V, Tiwary AK. Physico-chemical, mechanical and electrical performance of bael fruit gum-chitosan IPN films. *Food Hydrocoll.* 2013;30(1):192-9.

acid supplementation on visual and cognitive development throughout childhood: A review of human studies. *Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids.* 2007;76(4):189-203.

3- Zhong Q, Tian H, Zivanovic S. Encapsulation of fish oil in solid zein particles by liquid-liquid dispersion. *J Food Process Preserv.* 2009;33(2):255-70.

4- Miyashita K, Nara E, Ota T. Oxidative stability of polyunsaturated fatty acids in an aqueous solution. *Biosci Biotechnol Biochem.* 1993;57(10):1638-40.

5- Kaushik P, Dowling K, Barrow CJ, Adhikari B. Microencapsulation of Omega-3 fatty acids: A review of microencapsulation and characterization methods. *J Funct Food.* 2015;19(Pt B):868-81.

6- Baik MY, Suhendro EL, Nawar WW, Mc Clements DJ, Decker EA, Chinachoti P. Effects of antioxidants and humidity on the oxidative stability of microencapsulated fish oil. *J Am Oil Chem Soc.* 2004;81(4):355-60.

7- Gan CY, Cheng LH, Easa AM. Evaluation of microbial transglutaminase and ribose cross-linked soy protein isolate-based microcapsules containing fish oil. *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2008;9(4):563-9.

8- Chang CP, Leung TK, Lin SM, Hsu CC. Release properties on gelatin-gum Arabic microcapsules containing camphor oil with added polystyrene. *Colloid Surf B Biointerface.* 2006;50(2):136-40.

9- Zuidam NJ, Nedović V, editors. Encapsulation technologies for active food ingredients and food processing. Heidelberg: Springer; 2010. p. 25.

10- Julian Mc Clements D, Decker A. Encapsulated emulsions and methods of preparation [Internet]. Mountain View: Google Patents; 2005 [cited 2007 May 10]. Available from: <https://patents.google.com/patent/EP1928589A2/en>

11- Bahrani S, Ghanbarzadeh B, Hamishehkar H, Sowti Khiyabani M. Nanoencapsulation of Omega-3 fatty acids using caseinate-pectin based complexes: FTIR, DSC, particle size, and encapsulation efficiency. *Iran J Nutr Sci Food Technol.* 2013;8(3):1-15. [Persian]

12- Wu KG, Xiao Q. Microencapsulation of fish oil by simple coacervation of hydroxypropyl methylcellulose. *Chin J Chem.* 2005;23(11):1569-72.

13- Jafarpour SA, Esfahani R, Jafari SM. 1395. Efficiency evaluation of nanoencapsulation of Omega-3 fatty acids with gelatin-Arabic gum complex using coacervation technique. *Iran Sci Fish J.* 2016;25(1):29-42. [Persian]

14- Wang B, Adhikari B, Barrow CJ. Optimisation of the microencapsulation of tuna oil in gelatin-sodium hexametaphosphate using complex coacervation. *Food Chem.* 2014;158:358-65.

15- Liu S, Low NH, Nickerson MT. Entrapment of flaxseed oil within gelatin-gum Arabic capsules. *J Am Oil Chem Soc.* 2010;87(7):809-15.

16- Champagne CP, Fustier P. Microencapsulation for the improved delivery of bioactive compounds into foods. *Curr Opin Biotechnol.* 2007;18(2):184-90.

17- Daniel AN, Sartoretto SM, Schmidt G, Caparroz-Assef SM, Bersani-Amado CA, Cuman RKN. Anti-inflammatory and antinociceptive activities A of eugenol essential oil in experimental animal models. *Braz J Pharmacogn.* 2009;19(1B):212-7.

18- Ogata M, Hoshi M, Urano S, Endo T. Antioxidant activity of eugenol and related monomeric and dimeric compounds. *Chem Pharm Bull (Tokyo).* 2000;48(10):1467-9.

19- Guan W, Li S, Yan R, Tang S, Quan C. Comparison of essential oils of clove buds extracted with supercritical

37- Hosseini VS, Najaf Najafi M, Mohammadi Sani A, Koocheki A. Effect of *Lallemantia royleana* seed gum and whey protein concentrate on stability of oil-in-water emulsion. J Res Innov Food Sci Technol. 2013;2(2):109-20. [Persian]

36- Moreau L, Kim HJ, Decker EA, Julian Mc Clements D. Production and characterization of oil-in-water emulsions containing droplets stabilized by β -lactoglobulin-pectin membranes. J Agric Food Chem. 2003;51(22):6612-7.