

(OPEN ACCESS)

The effect of storage time on the physicochemical and oxidation properties of the functional supplement powder containing marine bioactive compounds using liposome technique

Hadis Amiri^{*1}, Bahareh Shabanpour^{*2}, Parastoo Pourashouri³,
Mahboobeh Kashiri⁴

1. Corresponding Author, Ph.D. Student in Seafood Processing, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: hadis_amiri88@yahoo.com
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Seafood Processing, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: b_shabanpour@yahoo.com
3. Associate Prof., Dept. of Seafood Processing, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: pourashouri.p@gmail.com
4. Associate Prof., Dept. of Food Science and Technology, Faculty of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: mkashiri@gau.ac.ir

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 10.12.2023

Revised: 11.19.2023

Accepted: 12.05.2023

Keywords:

Functional supplement
powder,
Marine bioactive
compounds,
Nanoliposome,
Storage time

ABSTRACT

Background and Objectives: Research has focused on utilizing marine bioactive compounds such as peptides, polyunsaturated fatty acids (PUFAs), and pigments as therapeutic agents through their incorporation into supplements, medicinal compounds, or functional foods. However, certain physicochemical properties such as its instability, poor water solubility, bitter taste and possible degradation during digestion have hindered their wide spread use. Therefore, the present study aimed to overcome these challenges through an innovative approach by developing a functional supplement powder using the technique of nanoliposomal encapsulation of fish protein hydrolysate (FPH), fish oil (FO), and shrimp lipid extract (SHE). The nanoliposomes were coated with whey protein concentrate (WPC) and chitosan (CS) in mono/bilayer, and composite forms. Subsequently, the effect of storage duration on the physicochemical properties and oxidative stability of the produced functional supplement powders was investigated.

Materials and Methods: In this study, a functional supplement powder containing fish oil and shrimp lipid extract in a ratio of 1:0.1% (w/w), along with a 1% (w/w) solution of fish protein hydrolysate was prepared using the encapsulation technique of nanoliposomes. The prepared nanoliposomes were coated with whey protein (WPC) and chitosan (CS) as mono/bilayer and composite forms, then dried by a freeze dryer for 72 hours. Analysis of proximate compounds, solubility, primary oxidation compounds and color evaluation of the treatments were investigated during 0, 1, 2, and 3 months of storage at 4 °C.

Results: According to the results, the type of coating, storage time and moisture level showed a significant effect on the physicochemical properties and oxidative stability of the treatments ($P < 0.05$). With increasing storage time, the amount of ash, moisture, solubility, primary oxidation compounds, and brightness index of the treatments significantly

increased, while the amount of protein, fat, and redness index significantly decreased ($P<0.05$). Chitosan monolayer treatment and bilayer (WPC/CS) treatments showed the highest and lowest amount of changes in physicochemical properties and oxidative stability, respectively. Therefore, bilayer treatments provided better protection than other treatments. According to the results, the presence of WPC as a wall compound had a favorable effect on the physicochemical properties of the treatments, while the presence of chitosan in combination with WPC as bilayers had a protective effect on the core materials and the oxidative stability of the treatments during storage time.

Conclusion: Therefore, encapsulation of marine bioactive compounds in liposomal carriers and coating them with whey protein as a mono/bilayer could be a useful approach to protect sensitive compounds in food products or as a nutritional supplement powder during storage.

Cite this article: Amiri, Hadis, Shabanpour, Bahareh, Pourashouri, Parastoo, Kashiri, Mahboobeh. 2025. The effect of storage time on the physicochemical and oxidation properties of the functional supplement powder containing marine bioactive compounds using liposome technique. *Journal of Utilization and Cultivation of Aquatics*, 14 (1), 37-53.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/japu.2023.21818.1828

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

اثر مدت نگهداری بر خواص فیزیکوشیمیایی و اکسایشی پودر مکمل فراسودمند حاوی ترکیبات زیست‌فعال دریایی با تکنیک ریزپوشانی نانولیپوزوم‌ها

حدیث امیری^{۱*}، بهاره شعبانپور^{۲*}، پرستو پورعاشوری^۳، محبوبه کشیری^۴

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری فرآوری محصولات شیلاتی، دانشکده شیلات و محیط‌زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: hadis_amiri88@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، استاد گروه فرآوری محصولات شیلاتی، دانشکده شیلات و محیط‌زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: b_shabanpour@yahoo.com
۳. دانشیار گروه فرآوری محصولات شیلاتی، دانشکده شیلات و محیط‌زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: pourashouri.p@gmail.com
۴. دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: mkashiri@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: سابقه و هدف: پژوهش‌ها روی استفاده از ترکیبات زیست‌فعال دریایی مانند پپتیدهای زیستی، اسیدهای چرب چند غیراشباع (PUFA) و رنگدانه‌ها به عنوان عوامل درمانی از طریق ترکیب آن‌ها در مکمل‌ها، ترکیبات دارویی یا غذاهای فراسودمند متمرکز شده است. با این حال، برخی خواص فیزیکوشیمیایی مانند ناپایداری و حلالیت ضعیف در آب، طعم تلخ و تخریب احتمالی در طول هضم مانع از استفاده گسترده آن‌ها شده است. بنابراین پژوهش حاضر با هدف غلبه بر این مشکلات از طریق رویکردی نوآورانه با توسعه یک پودر مکمل فراسودمند با تکنیک ریزپوشانی نانولیپوزوم‌های حاوی پروتئین هیدرولیز شده ماهی (FPH)، روغن ماهی (FO) و عصاره چرب میگو (SHE) انجام گردید. نانولیپوزوم‌های تولیدی با پروتئین آب پنیر (WPC) و کیتوزان (CS) به صورت تک/دولایه و ترکیبی پوشش‌دهی شدند، سپس اثر مدت نگهداری بر خواص فیزیکوشیمیایی و پایداری اکسایشی پودرهای مکمل فراسودمند تولیدی بررسی گردید. واژه‌های کلیدی: پودر مکمل فراسودمند، ترکیبات زیست‌فعال دریایی، مدت نگهداری، نانولیپوزوم مواد و روش‌ها: در این مطالعه، پودر مکمل فراسودمندی حاوی روغن ماهی و عصاره چرب میگو با نسبت (۱ به ۰/۱ درصد وزنی)، به همراه محلول آبی پروتئین هیدرولیز شده ماهی (یک درصد وزنی) با تکنیک ریزپوشانی نانولیپوزوم‌ها تهیه گردید. نانولیپوزوم‌ها با پروتئین آب پنیر و کیتوزان به صورت تک/دولایه و ترکیبی پوشش‌دهی شدند، سپس توسط دستگاه فریزدرایر	تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۴

به مدت ۷۲ ساعت خشک شدند. آنالیز ترکیبات تقریبی، حلالیت، ترکیبات اولیه اکسیداسیون و بررسی رنگ تیمارها طی ۰، ۱، ۲ و ۳ ماه در دمای ۴ درجه سانتی گراد مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: طبق نتایج به دست آمده، نوع پوشش، مدت نگهداری و میزان رطوبت اثر معنی داری بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی و پایداری اکسایشی تیمارها نشان داد ($P < 0.05$). با افزایش زمان نگهداری، میزان خاکستر، رطوبت، حلالیت، ترکیبات اولیه اکسیداسیون و شاخص روشنایی تیمارها افزایش معنی داری داشتند ولی میزان پروتئین، چربی و شاخص قرمزی تیمارها روند کاهشی معنی داری داشتند ($P < 0.05$). تیمار تک لایه کیتوزان و تیمارهای دو لایه (WPC/CS) به ترتیب بیشترین و کمترین میزان تغییرات خصوصیات فیزیکوشیمیایی و پایداری اکسایشی را نشان دادند. بنابراین تیمارهای دو لایه حفاظت بهتری نسبت به سایر تیمارها داشتند. طبق نتایج، حضور پروتئین آب پنیر (WPC) به عنوان ترکیب دیواره بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی تیمارها اثر مطلوبی داشت، در صورتی که حضور کیتوزان در ترکیب با WPC به صورت دو لایه اثر محافظت کنندگی بر مواد هسته و پایداری اکسایشی تیمارها طی دوره نگهداری داشت.

نتیجه گیری: بنابراین ریزپوشانی ترکیبات زیست فعال دریایی در حامل‌های لیپوزومی و پوشش دهی آن‌ها با کنسانتره پروتئین آب پنیر به صورت تک/دو لایه می‌تواند رویکرد مفیدی جهت حفاظت ترکیبات حساس در فرآورده‌های غذایی یا به صورت یک پودر مکمل مغذی طی زمان نگهداری باشد.

استناد: امیری، حدیث، شعبانپور، بهاره، پورعاشوری، پرستو، کشیری، محبوبه (۱۴۰۴). اثر مدت نگهداری بر خواص فیزیکوشیمیایی و اکسایشی پودر مکمل فراسودمند حاوی ترکیبات زیست فعال دریایی با تکنیک ریزپوشانی نانولیپوزوم‌ها. نشریه بهره‌برداری و پرورش آبزیان، ۱۴ (۱)، ۵۳-۳۷.

DOI: 10.22069/japu.2023.21818.1828



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان در مورد سلامتی عمومی با یک رژیم غذایی مناسب و کارآمد، عامل مهمی در جهت تقویت غذاهای فراسودمند جدید است (۱). غذاهایی که به‌طور مؤثر سبب حفظ سلامتی و بهبود فعالیت‌های حیاتی شده یا خطرات ابتلا به بیماری را کاهش می‌دهند (۲). ترکیبات زیست‌فعال نقش کلیدی در وضعیت تغذیه‌ای غذاهای فراسودمند دارند. از میان ترکیبات زیست‌فعال می‌توان به ترکیباتی با منشاء دریایی مانند پروتئین هیدرولیز شده ماهی (FPH)^۱، روغن ماهی و عصاره چرب میگو^۲ حاصل از ماهیان کم‌مصرف، دورریز، پسماند ماهیان و سخت‌پوستان اشاره نمود. پروتئین هیدرولیز شده ماهی محصولی با کیفیت بالا و مخلوطی از پروتئین‌های شکسته، پپتیدها و اسیدهای آمینه است که می‌توان از پروتئین ماهیچه ماهی یا پسماند حاصل از فرآوری طی فرایند هیدرولیز به‌دست آورد. پپتیدها بسته به توالی اسیدهای آمینه حاصل از فعالیت پروتئاز مورد استفاده، ممکن است عملکردهای مختلفی مانند فعالیت آنتی‌اکسیدانی، ضد فشار خون، ضد میکروبی، ضد قارچ داشته باشند (۳). این امر منجر به پژوهش‌ها در مورد استفاده از پپتیدهای زیستی به عنوان عوامل درمانی، از طریق ترکیب آن‌ها در مکمل‌ها، ترکیبات دارویی یا غذاهای کاربردی گردیده است. با این حال بعضی خصوصیات فیزیکوشیمیایی آن‌ها (مانند طعم تلخ) و تخریب احتمالی در هنگام هضم، مانع استفاده از آن‌ها می‌شود (۴). ترکیبات زیست‌فعال موجود در چربی پسماند میگو مانند اسیدهای چرب چند غیراشباع و رنگدانه‌های موجود از دلایل ارزشمندی این پسماند می‌باشد (۵ و ۶). آستازانتین، از رنگدانه‌های موجود در چربی پسماند میگوست که فعالیت‌های فیزیولوژیکی مختلفی از جمله ضد اکسیداسیونی،

ضد التهابی، افزایش پاسخ ایمنی، پیشگیری از بیماری‌های قلبی عروقی، بهبود عملکرد حرکتی و تأثیر مثبتی بر عملکرد مغز و سیستم عصبی مرکزی دارد. بنابراین، اگر آستازانتین به عنوان یک عنصر کاربردی به رژیم غذایی اضافه شود، برای بهبود سلامت انسان اهمیت کاربردی خواهد داشت (۷). اما ناپایداری و حلالیت ضعیف در آب آستازانتین، قابلیت دسترسی زیستی آن را به میزان قابل توجهی کاهش داده و کاربردهای آن را به عنوان عامل تغذیه‌ای در صنایع غذایی و غذایی-دارویی محدود می‌کند (۸). بنابراین به دلیل حساسیت رنگدانه‌ها و روغن‌ماهی به اکسایش و همچنین طعم نامطلوب و تلخ FPH، چالشی برای افزودن و به کار بردن این ترکیبات زیست‌فعال دریایی در صنعت غذا و دارو ایجاد شده است. نانوریزپوشانی یکی از روش‌های نوین حفظ ترکیبات زیست‌فعال و حساس مواد غذایی است (۹). فرایندی که طی آن ترکیبات زیست‌فعال (مواد هسته) مانند روغن‌های غذایی و طعم‌دهنده‌ها در مواد ثانویه (دیواره) پوشش‌دهی می‌شوند (۱۰). از بین نانوحامل‌های مورد استفاده جهت ریزپوشانی ترکیبات زیست‌فعال، لیپوزوم‌ها و زیکول‌های کروی با غشای دو لایه فسفولیپیدی در ساختار خود هستند. این ترکیبات به دلیل خاصیت دوگانه دوست توانایی کپسوله کردن رنج وسیعی از ترکیبات آب‌دوست و چربی‌دوست را دارند (۱۱ و ۱۲). آن‌ها می‌توانند مولکول‌های آب‌دوست و چربی‌دوست را به ترتیب در فاز آبی داخلی و دولایه چربی محصور کنند، همچنین می‌توانند پایداری را بهبود داده و انتشار محتویاتشان را کنترل کنند (۱۳). از محدودیت‌های اصلی لیپوزوم‌ها تمایل به هم پیوستگی و تجمع آن‌ها و تشکیل ذرات بزرگ‌تر است و احتمال خروج مواد ریزپوشانی شده طی دوره نگهداری در آن‌ها وجود دارد. این پایداری ضعیف در یک محیط آبی اثر شدیدی بر عمر مفید آن‌ها دارد. برای غلبه بر این

1- Fish protein hydrolysate

2- Shrimp lipid extract

مشکلات افزودن پوشش پلیمر زیستی بر سطح آن‌ها توسعه یافته و می‌تواند راهکار مؤثری باشد (۱۴). امروزه استفاده از پلیمرهای طبیعی به ویژه کیتوزان و پروتئین آب پنیر به دلیل ویژگی‌های زیستی و خاص جهت پوشش‌دهی لیپوزوم‌ها بسیار کارآمد خواهند بود. در این راستا اجاق و همکاران (۱۵) بیان داشتند، نانوریزپوشانی پپتیدهای زیست‌فعال آبزیان در حامل‌های لیپوزومی و پوشش‌دهی آن‌ها با کیتوزان به جهت افزایش دافعه استری بین ذرات و تشکیل فاز شبه هیدراتاسیون مانع از تجمع و برخورد لیپوزوم‌ها شده و سبب پایداری بیش‌تر لیپوزوم‌ها می‌گردد. بنابراین در پژوهش حاضر تأثیر مدت نگهداری بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی و پایداری اکسایشی پودر مکمل فراسودمند تولیدی با تکنیک ریزپوشانی نانولیپوزوم‌های حاوی ترکیبات زیست‌فعال دریایی (شامل پروتئین هیدرولیزشده ماهی، روغن ماهی و عصاره چرب میگو) که با پلیمرهای زیستی (شامل پروتئین آب پنیر و کیتوزان) پوشش‌دهی شدند، مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

پروتئین هیدرولیز شده ماهی (درجه هیدرولیز ۳۸/۶۴) از ماهی کاراس (*Carassius auratus*) ($290 \pm g$) طی فرآیند هیدرولیز آنزیمی با استفاده از آنزیم آلکالاز (نوازیم، دانمارک) طبق روش امیری و همکاران (۱۶) و اویسی‌پور و همکاران (۱۷) استخراج شد. عصاره چرب میگو از پسماند خرد شده (سر، پوسته و دم) میگوی پاشفید غربی (*Litopenaeus vannamei*) طبق روش امیری و همکاران (۱۶) و گومز ایستاکا و همکاران (۱۸) و مونتر و همکاران (۱۶) استخراج گردید. روغن کبد ماهی کاد (*Gadus morhua*)، شرکت سیگما، آلمان، کنسانتره پروتئین آب پنیر (۸۰

درصد پروتئین و ۷ درصد چربی) (شرکت ولاک، انگلیس)، کیتوزان (وزن مولکولی متوسط، درجه داستیلاسیون ۸۵-۸۰ درصد، شرکت سیگما)، لستین سوپا (سیگما، آلمان)، هیدروکسید سدیم، ایزوپروپیل الکل، هیدروکلریک اسید، هگزان، اتیل استات، آب مقطر دوبار تقطیر و سایر مواد شیمیایی با درجه آزمایشگاهی از شرکت‌های اپلیکم، تتراکم و مرک خریداری گردیدند.

آماده‌سازی نانولیپوزوم: در آماده‌سازی تیمارها، پروتئین هیدرولیز شده ماهی (FPH)، روغن ماهی (FO) و عصاره چرب میگو (SHE) در ساختار لیپوزوم‌ها ریزپوشانی شدند. نانولیپوزوم‌های تهیه شده با دیواره‌های مختلف، پروتئین آب پنیر (WPC) و کیتوزان (CS) به‌صورت تک‌لایه، تک‌لایه ترکیبی و دو لایه پوشش‌دهی شدند (جدول ۱). جهت تهیه لیپوزوم‌ها لستین (۵ درصد وزنی دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد)، روغن ماهی و عصاره چرب میگو با نسبت (۱ به ۰/۱ درصد وزنی)، به همراه محلول آبی پروتئین هیدرولیزشده ماهی (یک درصد وزنی) بر روی هات پلیت در دور ۱۰۰۰ rpm (۳۰ درجه سانتی‌گراد) ترکیب شدند (۱۶ و ۱۹)، تهیه نانولیپوزوم‌ها با سونیکاسیون در توان ۴۰۰ وات به مدت ۷ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد صورت گرفت. پوشش‌دهی نانولیپوزوم‌ها به‌صورت تک‌لایه، ترکیبی (پروتئین آب پنیر + کیتوزان با نسبت ۱:۱) و تیمارهای دو لایه (کیتوزان/پروتئین آب پنیر) طبق روش لیو و همکاران (۲۰) و مادرینگال-کاربایو و همکاران (۲۱) انجام گردید. محلول‌های تازه تهیه شده کیتوزان (۰/۵ درصد در محلول یک درصد اسید استیک گلاسیال) با $pH = 4/5$ و کنسانتره پروتئین آب پنیر ۱۰ درصد به ترتیب روی نانولیپوزوم‌های دارای بار منفی به روش نشست لایه به لایه قرار داده شدند. پس از افزودن لایه اول (کیتوزان با بار مثبت)، محلول لایه دوم با بار مخالف (پروتئین آب پنیر با بار منفی) روی نمونه‌ها با نسبت

فراسودمند، نانولیپوزوم‌های پوشش‌دهی شده در فریزر ۸۰- درجه سانتی‌گراد منجمد و سپس توسط دستگاه خشک‌کن تصعیدی طی ۷۲ ساعت خشک شدند. سپس پودر مکمل فراسودمند تولیدی درون ظروف درب‌دار به مدت ۳ ماه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند و به صورت دوره‌ای طی ماه‌های ۰، ۱، ۲، ۳ شاخص‌های فیزیکوشیمیایی و اکسایشی تیمارها مورد بررسی قرار گرفتند.

۱:۱ اضافه گردید (۲۲). جهت آماده‌سازی نانولیپوزوم‌های تک‌لایه ترکیبی (WPC + CS)، محلول کیتوزان ۰/۵ درصد و محلول پروتئین آب پنیر ۱۰ درصد با نسبت (۱:۱) با هم ترکیب و جهت پوشش‌دهی نانولیپوزوم‌ها استفاده شدند. میانگین اندازه ذرات و پتانسیل زتا در نانولیپوزوم‌های بدون پوشش به ترتیب ۱۴۱/۳ نانومتر و ۸۴/۷- میلی‌ولت مشاهده شد، پوشش‌دهی نانولیپوزوم‌ها باعث تغییر اندازه و پتانسیل زتا تیمارها گردید (۱۶). در مرحله بعدی جهت تهیه پودر مکمل

جدول ۱- تیمارها: پودرهای مکمل فراسودمند تولیدی از نانولیپوزوم‌های حاوی پروتئین هیدرولیز شده ماهی (FPH)، روغن ماهی (FO) و عصاره چرب میگو (SHE) که توسط لایه‌های مختلف با پروتئین آب پنیر (WPC) و کیتوزان (CS) پوشش‌دهی شدند.

Table 1. Treatments: Functional supplement powders produced from nanoliposomes containing fish protein hydrolysate (FPH), fish oil (FO), and shrimp lipid extract (SHE) coated with various layers of whey protein concentrate (WPC) and chitosan (CS).

تیمار Treatment	محتوی تیمار Treatment Content
(WPC) + LP(FPH-FO-SHE)	نانولیپوزوم‌های تک‌لایه پروتئین آب پنیر حاوی (FPH، FO و SHE) Whey protein-monolayer nanoliposomes containing (FPH-FO-SHE)
(WPC+CS) + LP(FPH-FO-SHE)	نانولیپوزوم‌های تک‌لایه ترکیبی (پروتئین آب پنیر+کیتوزان) حاوی (FPH، FO و SHE) Composite-monolayer nanoliposomes containing (FPH-FO-SHE)
(WPC/CS) + LP(FPH-FO-SHE)	نانولیپوزوم‌های دولایه (کیتوزان/پروتئین آب پنیر) حاوی (FPH، FO و SHE) Bilayer nanoliposomes containing (FPH-FO-SHE)
(CS) + LP(FPH-FO-SHE)	نانولیپوزوم‌های تک‌لایه کیتوزان حاوی (FPH، FO و SHE) Chitosan-monolayer nanoliposomes containing (FPH-FO-SHE)
(WPC) + LP(FPH-FO)	نانولیپوزوم‌های تک‌لایه پروتئین آب پنیر حاوی (FPH و FO)، بدون عصاره چرب Whey protein-monolayer nanoliposomes containing (FPH-FO), without SHE

میزان حلالیت: ابتدا ۰/۱ گرم از پودرهای مکمل فراسودمند تولیدی درون لوله‌های سانتریفیوژ حاوی ۵ میلی‌لیتر آب مقطر قرار داده شدند و در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت انکوبه شدند. سپس، تیمارها به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۲۵۰۰ rpm سانتریفیوژ شدند. غلظت پروتئین محلول در فاز آبی توسط روش بیوره اندازه‌گیری گردید و نتایج به صورت میلی‌گرم/گرم لیپوزوم بیان شدند (۲۵).

بررسی رنگ: جهت بررسی شاخص‌های رنگ پودر مکمل فراسودمند تولیدی، از دستگاه رنگ‌سنج استفاده

آنالیز ترکیبات تقریبی: مقادیر پروتئین، چربی و خاکستر پودر مکمل فراسودمند تولیدی با فرآیندهای مختلف به روش AOAC (۲۳) مورد ارزیابی قرار گرفت. محتوی پروتئین با استفاده از روش کلدال، محتوی چربی به روش سوکسله و محتوی خاکستر توسط کوره در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد تعیین گردید. مقدار رطوبت نمونه‌ها، از طریق تفاوت وزن ۲ گرم پودر پس از خشک کردن به مدت ۱۶ ساعت در آن ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد محاسبه گردید. نتایج به صورت میزان رطوبت در ۱۰۰ گرم پودر گزارش شدند (۲۴).

گردید. رنگ تیمارها در مقابل صفحه مشکی اندازه‌گیری شد. ۵ گرم از پودر مکمل فراسودمند تولیدی در پتری‌دیش قرار داده شد و پارامترهای رنگ مانند L^* (روشنایی)، a^* (قرمزی)، b^* (زردی) برای هر تیمار ۳ بار توسط دستگاه قرائت گردید (۲۲).

پیوندهای مزدوج: استخراج روغن جهت انجام آزمایش پیوندهای مزدوج پودر مکمل تولیدی به روش کلینسورن و همکاران (۲۶) انجام گردید. ۰/۱

گرم از نمونه‌های روغن استخراجی در بالن حجمی ۲۵ میلی‌لیتر توسط ایزواکتان به حجم رسانده شدند. پس از هم زدن محلول‌ها، جذب تیمارها به وسیله دستگاه اسپکتوفتومتر در طول موج ۲۳۳ نانومتر در برابر شاهد ایزواکتان قرائت گردید. با استفاده از جذب تیمارها، مقدار پیوندهای مزدوج طبق رابطه زیر اندازه‌گیری شد (۲۷).

$$\text{عرض کوت} \times \frac{\text{مقدار جذب نمونه}}{\text{غلظت نهایی نمونه مورد استفاده}} = \text{پیوندهای مزدوج}$$

تجزیه و تحلیل آماری: تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ انجام گردید. پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها نتایج در قالب طرح کاملاً تصادفی آنالیز گردید. نتایج به کمک آزمون اندازه‌گیری تکرار شده در واحد زمان و تحلیل آنالیز واریانس یک‌طرفه انجام گردید. جهت بررسی مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن استفاده شد. تمامی نتایج به صورت میانگین و انحراف معیار ارائه گردید و مقایسه‌های آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد.

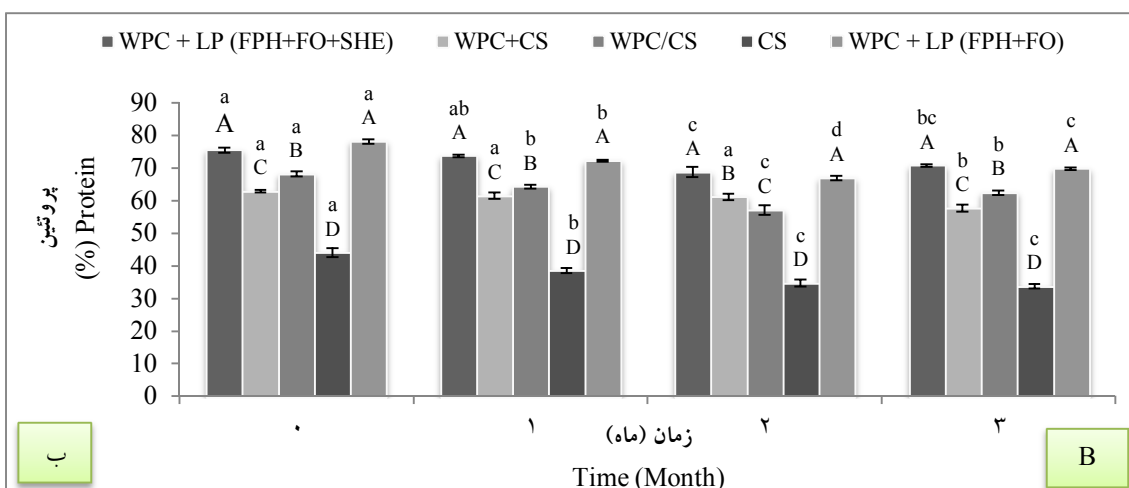
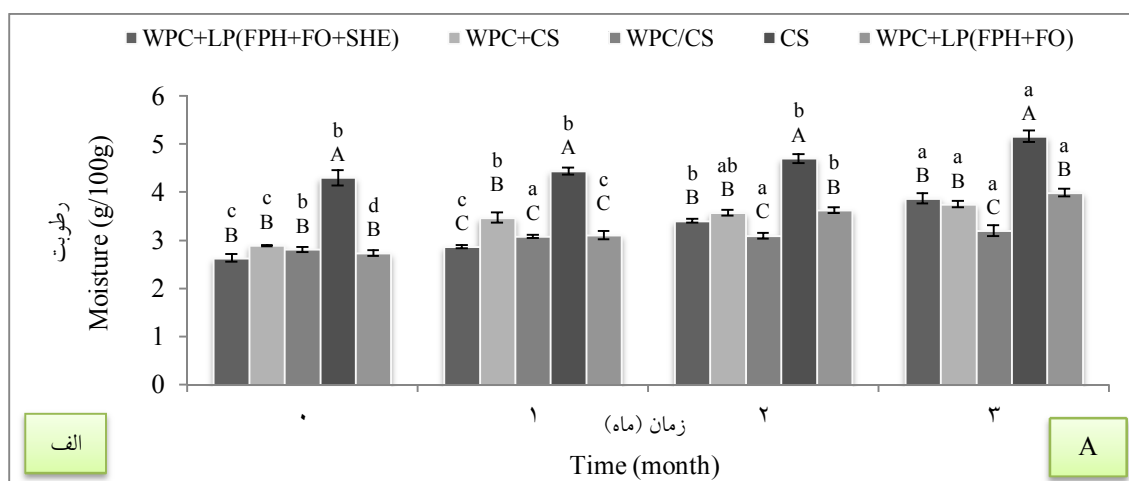
نتایج و بحث

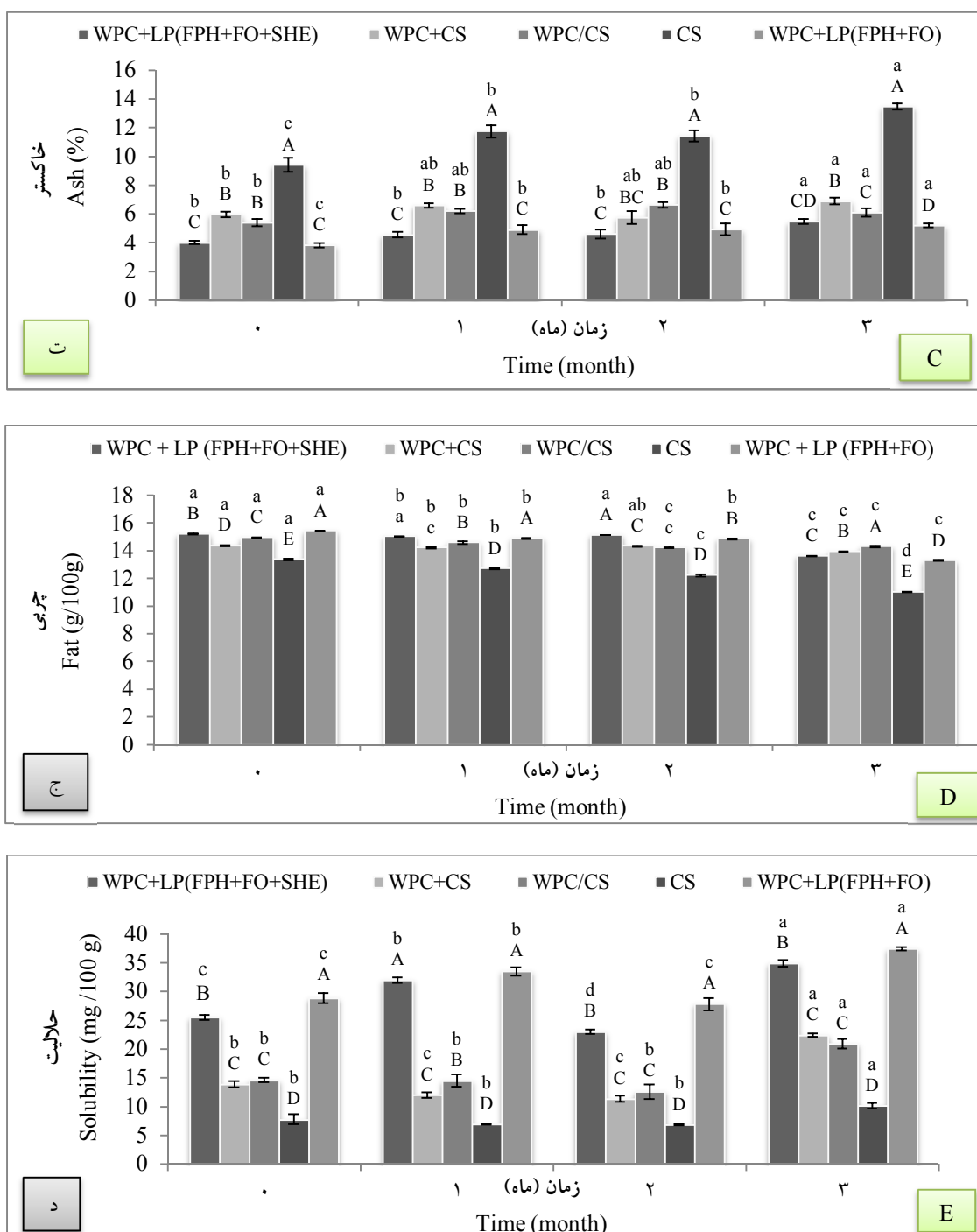
آنالیز ترکیبات تقریبی: محتوی رطوبت یکی از ویژگی‌های مهم پودر است و عمر مفید و چسبندگی پودر را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. به‌طور کلی، محصولات خشک شده با محتوی رطوبت بین ۳ تا ۱۰ درصد، مناسب‌ترین حالت پایداری به هنگام نگهداری را نشان می‌دهند (۲۸). پایین بودن محتوای رطوبتی پودر سبب جلوگیری از تخریب ترکیبات زیست‌فعال ریزپوشانی‌شده می‌گردد. مقادیر رطوبت در پودرهای مکمل حاصل از خشک‌کن انجمادی در گستره ۰/۸ ± ۲/۶۳ تا ۰/۱۶ ± ۴/۳ گرم در ۱۰۰ گرم بودند.

تغییرات میزان رطوبت پودرهای مکمل فراسودمند تولیدی طی مدت ۳ ماه نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در شکل ۱ (الف) ارائه شده است. طبق نتایج، نوع پوشش و مدت زمان نگهداری بر میزان رطوبت پودرهای مکمل تولیدی تأثیر معنی‌داری داشت ($P < 0/05$). به‌طوری‌که در زمان صفر تیمار تک‌لایه کیتوزان بیش‌ترین میزان رطوبت را نشان داد، ولی سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری با هم نداشتند. با گذشت زمان نگهداری میزان رطوبت نمونه‌ها روند افزایشی معنی‌داری را نشان داد. ولی تیمار دو لایه نسبت به سایر تیمارها تغییرات میزان رطوبت کم‌تری در طی دوره نگهداری داشت. هم‌چنین درصد رطوبت، برخی از خصوصیات پودر مانند حالیت را نیز تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. نوع و میزان ترکیبات دیواره در میزان رطوبت پودرهای تولیدی اثرگذار می‌باشد (۲۹). هم‌چنین تفاوت سرعت خشک کردن، ظرفیت نگهداری آب در ساختار و تخلخل ذرات پودر در طی دوره خشک کردن نیز ملاحظات مهمی هستند که در تعیین مقدار رطوبت مؤثر می‌باشند (۱۰).

نوع پوشش و مدت نگهداری بر میزان پروتئین، خاکستر و چربی تیمارها تأثیر معنی‌داری داشت ($P < 0.05$). به‌طوری‌که با افزایش زمان نگهداری میزان پروتئین و چربی تیمارها روند کاهشی و میزان خاکستر تیمارها روند افزایشی معنی‌داری را نشان دادند ($P < 0.05$). تیمار تک‌لایه کیتوزان کم‌ترین میزان پروتئین، چربی و بیش‌ترین میزان خاکستر و تیمار تک‌لایه پروتئین آب پنیر بیش‌ترین میزان پروتئین، چربی و کم‌ترین میزان خاکستر را نسبت به سایر تیمارها داشتند.

تغییرات میزان پروتئین، خاکستر و چربی پودرهای مکمل فراسودمند تولیدی طی مدت ۳ ماه نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در شکل ۱ (ب، ت و ج) ارائه شده است. طبق نتایج به‌دست آمده، مقادیر پروتئین پودرهای مکمل فراسودمند تولیدی در گستره 1.38 ± 0.16 تا 0.76 ± 0.23 درصد و مقادیر خاکستر پودرهای مکمل تولیدی در گستره 3.83 ± 0.15 تا 4.9 ± 0.09 درصد و میزان چربی تیمارها در گستره 13.35 تا 15.42 گرم در 100 گرم مشاهده گردید.





شکل ۱- (الف) تغییرات محتوی رطوبت، (ب) پروتئین، (ت) خاکستر، (ج) چربی و (د) حلالیت پودرهای مکمل فراسودمند

طی ۳ ماه نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد، مقادیر به‌صورت میانگین ۳ تکرار بیان شده‌اند.

A-F حروف بزرگ متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میان تیمارها با پوشش‌های مختلف ($P < 0.05$).

a-d حروف کوچک متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میان تیمارها طی مدت نگهداری ($P < 0.05$).

Figure 1. Changes in moisture content (A), protein (B), ash (C), fat (D), and solubility (E) of functional supplement powders over a 3-month storage period at 4 °C.

The values represent the means of three replicates. Significant differences among treatments with different coatings are indicated by letters A-F ($P < 0.05$), while significant differences among treatments over the storage period are indicated by letters a-d ($P < 0.05$).

میزان حلالیت: حلالیت پودرهای مکمل تولیدی در آب، از طریق پل‌های ارتباطی میان ترکیبات آن‌ها و قطرات آب ایجاد می‌شود که سبب قوی‌تر شدن اتصال و ارتباط میان آن‌ها می‌گردد. حضور برخی پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها باعث افزایش مقدار گروه‌های آبدوست در سیستم و افزایش اتصال آن‌ها به مولکول‌های آب می‌گردد (۳۰). تغییرات میزان حلالیت پودرهای مکمل فراسودمند تولیدی طی مدت ۳ ماه نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در شکل ۱ (د) ارائه شده است. طبق نتایج، اختلاف معنی‌داری در میزان حلالیت بین تیمارها مشاهده گردید ($P < 0/05$)، به‌طوری‌که تیمار تک‌لایه پروتئین آب پنیر (بدون عصاره چرب) $0/88 \pm 28/83$ (میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم) و تیمار تک‌لایه کیتوزان $0/88 \pm 7/83$ به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین میزان حلالیت را نسبت به سایر تیمارها نشان دادند. تیمار تک‌لایه ترکیبی (WPC+CS) و تیمار دو لایه (WPC/CS) اختلاف معنی‌داری با هم نداشتند. همچنین روند افزایشی معنی‌داری در میزان حلالیت تیمارها طی زمان نگهداری مشاهده گردید ($P < 0/05$). حلالیت در آب پودر مکمل تولیدی از دیدگاه رهایش پایدار و کنترل شده هسته در محیط آبی، اهمیت زیادی دارد که به ساختار لیپوزوم‌ها بستگی دارد. ساختار لیپوزوم‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که حلالیت محدودی داشته یا با تاخیر در آب حل شوند (۳۱). در مطالعه جیناپونگ و همکاران (۳۲)، تأثیر رطوبت، اندازه ذرات پودرها و قطر ذرات تولیدی بر میزان انحلال‌پذیری نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیانگر آن بود که پودرهایی با رطوبت کم‌تر با سهولت بیش‌تری در آب حل می‌گردند، که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت. به‌طوری‌که تیمار تک‌لایه کیتوزان با درصد

رطوبت بالاتر حلالیت کم‌تری نسبت به سایر تیمارها داشت. این نتیجه در مغایرت با نتیجه بوفو و همکاران (۳۳) بود که بیان داشتند حضور مقادیر بالای آب و رطوبت در میکروکپسول‌ها منجر به تجمع ذرات می‌شود که در نتیجه آن نفوذ مایع به درون ذرات راحت‌تر شده و حلالیت افزایش می‌یابد. بوتزل و همکاران (۳۰) با مطالعه ریزپوشانی روغن ماهی در دیواره‌های مختلف تفاوت معنی‌داری در میزان حلالیت میکروکپسول‌ها مشاهده نکردند و بیان داشتند که دلیل آن کاربرد مواد پروتئینی و کربوهیدرات‌های بود که به‌طور طبیعی، در غلظت‌های مختلف حلالیت بالایی را در آب نشان می‌دهند. انحلال‌پذیری پودرها همچنین می‌تواند بسته به نوع و ترکیب ماده اولیه، شرایط خشک کردن، نوع و حلالیت ماده حامل و میزان تعامل بین حامل و عصاره باشد که احتمالاً تحت تأثیر عوامل آب‌گریزی پلی‌مر، انعطاف‌پذیری پلی‌مر و غلظت آن می‌باشد (۳۴).

رنگ‌سنجی: رنگ پودرهای مکمل فراسودمند تولیدی از لحاظ پذیرش و افزودن آن به محصولات دیگر بسیار مهم است (۳۵). نتایج بررسی شاخص‌های رنگ L^* (روشنایی)، a^* (قرمزی)، b^* (زردی) پودرهای مکمل فراسودمند تولیدی طی مدت ۳ ماه نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ ارائه شده است. طبق نتایج، نوع دیواره و مدت زمان نگهداری بر میزان شاخص روشنایی L^* و قرمزی a^* پودرهای مکمل فراسودمند تولیدی اثر معنی‌داری داشتند ($P < 0/05$). (جدول‌های ۲ و ۳). به‌طوری‌که نگهداری سبب کاهش میزان شاخص قرمزی و افزایش میزان شاخص روشنایی در تمامی تیمارها گردید ($P < 0/05$). طی زمان نگهداری، پودرهای مکمل حاوی نانولیپوزم‌های دو لایه (CS/WPC)

تغییرات شاخص قرمزی و روشنایی کم‌تری نسبت به سایر تیمارها داشتند. میزان شاخص قرمزی پودرهای مکمل تولیدی مربوط به رنگدانه آستازانتین موجود در عصاره چرب میگو می‌باشد. بنابراین کاهش رنگ قرمزی تیمارها طی زمان نگهداری به تجزیه آستازانتین موجود در آن‌ها مرتبط می‌باشد. سوتوماپور-گردینگ و همکاران (۳۶) کاهش رنگ نانوامولسیون‌های حاوی رنگدانه طی مدت نگهداری را به تجزیه کاروتنوئید موجود در نمونه علی‌رغم پایداری فیزیکی آن مرتبط دانستند. همچنین در بررسی میزان شاخص زردی b^* پودرهای مکمل فراسودمند تولیدی طی مدت ۳ ماه نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد افزایش معنی‌داری مشاهده گردید (جدول ۲). به‌طوری‌که پودرهای مکمل محتوی نانولیپوزوم‌های تک‌لایه کیتوزان بیش‌ترین میزان تغییرات زردی را طی زمان نگهداری نشان دادند ($P < 0.05$). ولی در تیمار تک‌لایه پروتئین آب پنیر (بدون عصاره چرب میگو)، میزان شاخص زردی

تغییرات چندانی نداشت و تقریباً ثابت بود. در مطالعه چن و همکاران میزان شاخص زردی نانوامولسیون‌های حاوی بتا-کاروتن طی زمان نگهداری کاهش یافت، علت تخریب و کاهش شاخص‌های زردی و قرمزی نمونه‌ها، تجزیه کاروتنوئید طی زمان نگهداری در تماس با اکسیژن وارد شده به محیط عنوان گردید. مقایسه تغییرات شاخص روشنایی و قرمزی پودرهای مکمل فراسودمند تولیدی طی مدت نگهداری با تغییرات رنگ نانولیپوزوم‌ها قبل فرایند خشک کردن همسو بود و نگهداری سبب کاهش میزان شاخص قرمزی و افزایش میزان روشنایی تیمارها گردید. ولی تغییرات شاخص زردی پودرهای مکمل تولیدی طی مدت نگهداری با تغییرات رنگ نانولیپوزوم‌ها قبل فرایند خشک کردن متفاوت بود. بطوریکه نگهداری سبب افزایش میزان شاخص زردی پودرهای مکمل گردید. همچنین مقایسه بین تیمارها نشان داد، تیمارهای دو لایه تغییرات شاخص‌های رنگی کم‌تری نسبت به سایر تیمارها داشتند.

جدول ۲- تغییرات میزان روشنایی پودر مکمل فراسودمند حاوی پروتئین هیدرولیز شده ماهی، روغن ماهی و عصاره چرب میگو پوشش داده شده با بیوپلیمرهای مختلف طی ۳ ماه نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد.

Table 2. Changes in brightness level of functional supplement powder containing fish protein hydrolysate, fish oil, and shrimp lipid extract coated with various biopolymers during 3 months of storage at 4 °C.

3	2	1	0	تیمار / زمان نگهداری Storage time /Treatment
79.63 ± 0.09 ^{aB}	78.4 ± 0.23 ^{bB}	76.17 ± 0.37 ^{cB}	73.3 ± 0.23 ^{dC}	(WPC) + LP (FPH-FO-SHE)
78.3 ± 0.11 ^{aC}	77.53 ± 0.14 ^{aB}	76.1 ± 0.23 ^{cB}	73.8 ± 0.21 ^{dC}	(WPC+CS) + LP (FPH-FO-SHE)
79.00 ± 0.12 ^{aB}	77.83 ± 0.18 ^{aB}	77.13 ± 0.15 ^{bB}	75.03 ± 0.47 ^{cB}	LP (FPH-FO-SHE) (WPC/CS) +
70.7 ± 0.26 ^{aD}	69.73 ± 0.23 ^{aC}	65.97 ± 0.75 ^{bC}	63.3 ± 0.31 ^{cD}	(CS) + LP (FPH-FO-SHE)
87.3 ± 0.32 ^{aA}	86.73 ± 0.5 ^{aA}	85.1 ± 0.17 ^{bA}	82.33 ± 0.58 ^{cA}	(WPC) + LP (FPH-FO)

داده‌ها به صورت میانگین سه تکرار ± انحراف معیار بیان شده‌اند. a-e حروف متفاوت نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار ($P < 0.05$) میان تیمارهای مختلف است

جدول ۳- تغییرات میزان قرمزی پودر مکمل فراسودمند حاوی پروتئین هیدرولیز شده ماهی، روغن ماهی و عصاره چرب میگو پوشش داده شده با بیوپلیمرهای مختلف طی سه ماه نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی گراد.

Table 3. Changes in redness level of functional supplement powder containing fish protein hydrolysate, fish oil, and shrimp lipid extract coated with various biopolymers during 3 months of storage at 4 °C.

3	2	1	0	تیمار/ زمان نگهداری Storage time /Treatment
8.87 ± 0.27 ^{cC}	9.93 ± 0.27 ^{bB}	12.47 ± 0.3 ^{aB}	13.03 ± 0.27 ^{BC}	(WPC) + LP (FPH-FO-SHE)
9.97 ± 0.23 ^{cB}	10.47 ± 0.26 ^{cB}	12.67 ± 0.17 ^{bB}	13.57 ± 0.27 ^{aB}	(WPC+CS) + LP (FPH-FO-SHE)
10.13 ± 0.23 ^{bC}	10.3 ± 0.1 ^{bB}	12.03 ± 0.37 ^{aB}	12.27 ± 0.23 ^{aC}	LP (FPH-FO-SHE) (WPC/CS) +
12.83 ± 0.18 ^{aA}	14.13 ± 0.19 ^{bA}	16.23 ± 0.27 ^{aA}	17.77 ± 0.23 ^{aA}	(CS) + LP (FPH-FO-SHE)
2.4 ± 0.03 ^{bD}	2.87 ± 0.23 ^{bC}	6.2 ± 0.1 ^{aC}	6.57 ± 0.27 ^{aD}	(WPC) + LP (FPH-FO)

داده‌ها به صورت میانگین سه تکرار ± انحراف معیار بیان شده‌اند. a-e حروف متفاوت نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار ($P < 0.05$) میان تیمارهای مختلف است

جدول ۴- تغییرات میزان زردی پودر مکمل فراسودمند حاوی پروتئین هیدرولیز شده ماهی، روغن ماهی و عصاره چرب میگو پوشش داده شده با بیوپلیمرهای مختلف طی سه ماه نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی گراد.

Table 4. Changes in yellowness level of functional supplement powder containing fish protein hydrolysate, fish oil, and shrimp lipid extract coated with various biopolymers during 3 months of storage at 4 °C.

3	2	1	0	تیمار/ زمان نگهداری Storage time /Treatment
21.53 ± 0.24 ^{aC}	21.73 ± 0.27 ^{aB}	18.93 ± 0.13 ^{bB}	18.87 ± 0.07 ^{bB}	(WPC) + LP (FPH-FO-SHE)
21.47 ± 0.27 ^{aB}	21.47 ± 0.27 ^{aB}	19.53 ± 0.07 ^{bB}	18.43 ± 0.23 ^{cB}	(WPC+CS) + LP (FPH-FO-SHE)
21.73 ± 0.27 ^{aB}	21.93 ± 0.07 ^{aB}	19.07 ± 0.27 ^{bB}	19.07 ± 0.27 ^{bC}	LP (FPH-FO-SHE) (WPC/CS) +
27.23 ± 0.27 ^{aA}	28.13 ± 0.07 ^{aA}	21.7 ± 0.5 ^{bA}	21.43 ± 0.67 ^{bA}	(CS) + LP (FPH-FO-SHE)
17.53 ± 0.23 ^{bD}	18.27 ± 0.27 ^{aC}	17.2 ± 0.1 ^{bC}	17.03 ± 0.27 ^{bD}	(WPC) + LP (FPH-FO)

داده‌ها به صورت میانگین سه تکرار ± انحراف معیار بیان شده‌اند. a-e حروف متفاوت نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار ($P < 0.05$) میان تیمارهای مختلف است

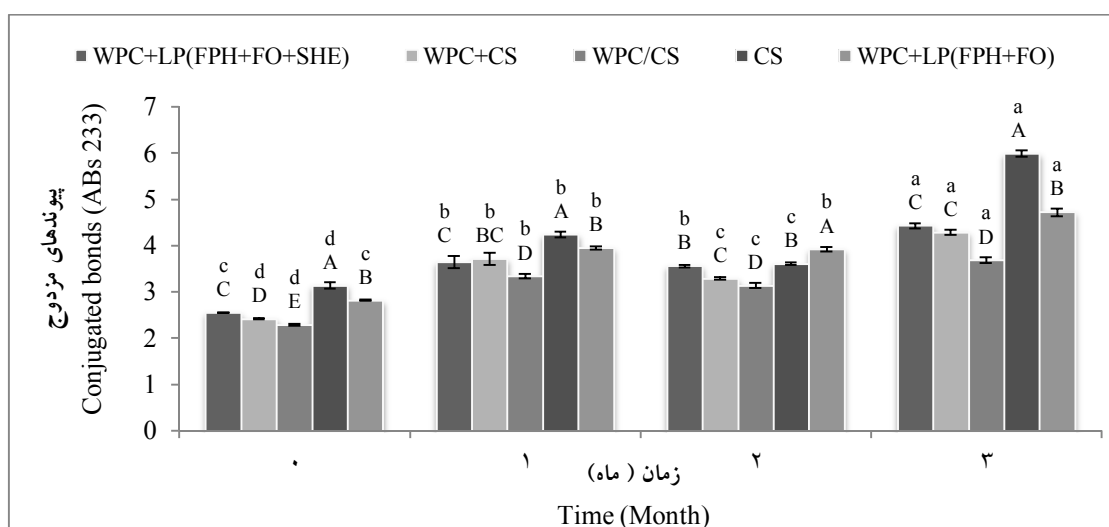
ترکیبات اولیه اکسیداسیون (پیوندهای مزدوج):

تغییرات میزان پیوندهای مزدوج پودرهای مکمل تولیدی طی مدت ۳ ماه نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در شکل ۲ ارائه شده است. طبق نتایج، روند مشابهی در مقادیر پیوندهای مزدوج همه تیمارها طی دوره نگهداری مشاهده گردید. به‌طوری‌که روند کلی تغییرات افزایشی بود ولی در ماه دوم نگهداری

اندکی کاهش در مقادیر پیوندهای مزدوج همه تیمارها مشاهده گردید. از آنجائی‌که سطوح پیوندهای مزدوج محصولات ابتدایی فرایند اکسیداسیون روغن‌ها هستند، ممکن است در مراحل بعد از تولید پیوندهای مزدوج به ترکیبات ابتدایی دیگر مانند هیدروپروکسیدها نیز تبدیل شوند (۳۷). بررسی میزان پیوندهای مزدوج تیمارهای مختلف نشان داد، تیمار تک‌لایه کیتوزان بیش‌ترین و تیمار دو لایه کم‌ترین میزان پیوندهای

روغن ماهی را در غنی‌سازی همبرگر طی زمان نگهداری ۱۵ روز در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار دادند، طبق نتایج، استفاده از نانولیپوزوم‌های حاوی روغن ماهی دارای ثبات بیش‌تری نسبت به روغن ماهی آزاد بودند که بیانگر نقش حافظتی بالای ساختار لیپوزومی در برابر فرآیند اکسیداسیون است.

مزدوج را داشتند. بنابراین پودرهای مکمل محتوی نانولیپوزوم‌های دو لایه حفاظت بهتری نسبت به سایر تیمارها داشتند. حضور پروتئین آب پنیر و کیتوزان به‌عنوان مواد دیواره در تیمار دولایه (WPC/CS)، اثر محافظت‌کنندگی مؤثری بر مواد هسته نشان دادند و این موضوع سرعت تشکیل محصولات ثانویه حاصل از اکسیداسیون را به تأخیر خواهد انداخت. قوطوری و همکاران (۳۸) اثر افزودن نانولیپوزوم‌های حاوی



شکل ۲- تغییرات میزان پیوندهای مزدوج پودرهای مکمل فراسودمند طی ۳ ماه نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد، مقادیر به صورت میانگین ۳ تکرار بیان شده‌اند.

A-F حروف بزرگ متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میان تیمارها با پوشش‌های مختلف ($P<0.05$).

a-d حروف کوچک متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میان تیمارها طی مدت نگهداری ($P<0.05$).

Figure 2. Changes in the level of conjugated bonds in functional supplement powders over a 3-month storage period at 4 °C.

The values represent the means of three replicates. Significant differences among treatments with different coatings are indicated by letters A-F ($P<0.05$), while significant differences among treatments over the storage period are indicated by letters a-d ($P<0.05$).

پوشش و مدت زمان نگهداری افزایش معنی‌داری در میزان رطوبت، خاکستر، حلالیت، شاخص روشنایی و ترکیبات اولیه اکسیداسیون تیمارها و کاهش معنی‌داری در میزان پروتئین، چربی و شاخص قرمزی تیمارها ایجاد نمود ($P<0.05$). اما مقایسه بین تیمارها نشان داد، طی زمان نگهداری میزان تغییرات خصوصیات

نتیجه‌گیری کلی

مطالعه اخیر نشان داد که استفاده از سیستم‌های لیپوزومی به‌صورت تک/ دولایه پروتئین آب پنیر می‌تواند در حفاظت از ترکیبات زیست‌فعال دریایی طی زمان نگهداری در جهت تولید پودر مکمل فراسودمند روشی کارآمد باشد. طبق نتایج، نوع

نامطلوب در فرآورده‌های غذایی و به‌عنوان یکی از سیستم‌های مؤثر در افزایش پایداری ترکیبات زیست‌فعال طی زمان نگهداری باشد.

تقدیر و تشکر

از صندوق حمایت از پژوهش‌گران و فناوران کشور به جهت حمایت‌های مالی پژوهش حاضر با شماره ۹۸۰۱۳۶۰۳ کمال تشکر را داریم.

فیزیکوشیمیایی و پایداری اکسایشی تیمارها در پودرهای مکمل حاوی نانولیپوزوم‌های دو لایه نسبت به سایر تیمارها کم‌تر بود. بنابراین تیمارهای دو لایه (پروتئین آب پنیر و کیتوزان) در حفاظت ترکیبات زیست‌فعال نقش مؤثرتری داشتند. طبق نتایج، تکنیک ریزپوشانی در نانو حامل‌های لیپوزومی می‌تواند در برطرف نمودن محدودیت‌های موجود در استفاده از ترکیبات زیست‌فعال دریایی به‌دلیل حساسیت بالای این ترکیبات، طعم و بوی خاص، ایجاد رنگ

منابع

1. Nath, A., Vatai, G., & Banvolgyi, S. (2023). Functional food and bioactive compounds through environmentally benign emerging processes. *Processes*, 11, 1182.
2. Diplock, A. T., Aggett, P. J., Ashwell, M., Borner, F., Fern, E. B., & Roberfroid, M. B. (1999). Scientific concept of functional foods in Europe. Consensus document. *British Journal Of Nutrition*, 81 (1), 1-27.
3. Hanachi, A., Bianchi, A., Kahn, C. J. F., Velot, E., Arab-Tehrany, E., Cakir-Kiefer, C., & Linder, M. (2022). Encapsulation of Salmon Peptides in marine liposomes: Physico-chemical, Antiradical activities and biocompatibility assays. *Marine drugs*, 20, 249. <https://doi.org/10.3390/md2004024>.
4. Berraquero-García, C., Pérez-Gálvez, R., Espejo-Carpio, F. J., Guadix, A., Guadix, E. M., & García-Moreno, P. J. (2023). Encapsulation of Bioactive Peptides by Spray-Drying and Electrospraying. *Foods*, 12 (10), 2005. <https://doi.org/10.3390/foods12102005>.
5. Gómez-Estaca, J., Montero, P., Fernández-Martín, F., Calvo, M. M., & Gómez-Guillén, M. C. (2016). The effect of high-pressure treatment on functional components of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) cephalothorax. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 154-160.
6. Montero, P., Calvo, M. M., Gómez-Guillén, M. C., & Gómez-Estaca, J. (2016). Microcapsules containing astaxanthin from shrimp waste as potential food coloring and functional ingredient: Characterization, stability, and bioaccessibility. *LWT - Food Science and Technology*, 70, 229-236.
7. Qiang, M., Pang, X., Ma, D., Ma, C., & Liu, F. (2020). Effect of membrane surface modification using chitosan hydrochloride and lactoferrin on the properties of astaxanthin-loaded liposomes. *Journal Molecules*, 610 (25), 1-12. <https://doi:10.3390/molecules25030610>.
8. Pan, L., Li, H., Hou, L., Chang, Z., Li, Y., & Li, X. (2022). Gastrointestinal digestive fate of whey protein isolates coated liposomes loading astaxanthin: Lipolysis, release, and bioaccessibility. *Food Bioscience*, 45, 101464.
9. Mohammadi, A., Jafari, S. M., Esfanjani, A. F., & Akhavan, S. (2016). Application of nano-encapsulated olive leaf extract in controlling the oxidative stability of soybean oil. *Food Chemistry*, 190, 513-519.
10. Jafari, S. M., Assadpoor, E., He, Y., & Bhandari, B. (2008). Encapsulation efficiency of food flavours and oils during spray drying. *Journal of Drying Technology*, 26 (7), 816-835.
11. Chaves, M. A., Baldino, L., Pinho, S. C., & Reverchon, E. (2022). Supercritical

- CO₂ assisted process for the production of mixed phospholipid nanoliposomes: Unloaded and vitamin D3-loaded vesicles. *Journal of Food Engineering*, 316, 110851.
12. Furlani, F., Rossi, A., Grimaudo, M. A., Bassi, G., Giusto, E., Molinari, F., Lista, F., Montesi, M., & Panseri, S. (2022). Controlled Liposome Delivery from Chitosan-Based Thermosensitive Hydrogel for Regenerative Medicine. *International Journal of Molecular Sciences*, 23 (2), 894.
 13. Liu, W., Hou, Y. Y., Jin, Y., Wang, X., Xu, X., & Han, J. (2020). Resarch progress on liposomes: Application in food, digestion behavior and absorption mechanism. *Trends in Food Science & Technology*. 104, 177-189.
 14. Sebaaly, C., Trifan, A., Sieniawska, E., & Greige-Gerges, H. (2021). Chitosan-coating effect on the characteristics of liposomes: A focus on bioactive compounds and essential oils: A review. *Processes*, 9 (3), 445.
 15. Ojagh, S. M., Hasani, SH., & Hasani, M. (2019). The effect of freezing/ thawing and freeze-drying/rehydration processes on the physical stability of nano-liposomes containing the bioactive peptides. *Journal of Innovation in Food Science and Technology*, 13 (4), 65-81.
 16. Amiri, H., Shabanpour, B., Pourashori, P., & Kashiri, M. (2023). Encapsulation of marine bioactive compounds using liposome technique: evaluation of physicochemical properties and oxidative stability during storage. *Food Structure*, 35, 100308. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2023.100308>.
 17. Ovissipour, M., Rasco, B., Shihoodi, S. G., Modanlow, M., Gholami, S., & Nemati, M. (2012). Antioxidant activity of protein hydrolysates from whole anchovy sprat (*Clupeonella engrauliformis*) prepared using endogenous enzymes and commercial proteases". *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93 (7), 1718-1726.
 18. Gómez-Estaca, J., Calvo, M. M., Alvarez-Acero, I., Motero, P., & Gómez-Guillen, M. C. (2017). Characterization and storage stability of astaxanthin esters, fatty acid profile and α -tocopherol of lipid extract from shrimp (*L. Vannami*) waste with potential application as food ingredient. *Food Chemistry*, 216, 37-44.
 19. Rasti, B., Erfanian, A., & Selamat, J. (2017). Novel nanoliposomal encapsulated omega-3 fatty acids and their applications in food. *Food Chemistry*, 230, 690-696.
 20. Liu, W., Tian, M., Kong, Y., Lu, J., Li, N., & Han, J. (2017). Multilayered vitamin C nanoliposomes by self-assembly of alginate and chitosan: Long-term stability and feasibility application in mandarin juice. *Journal of LWT-Food Science and Technology*, 75, 608-615.
 21. Madrigal-Carballo, S., Lim, S., Rodriguez, G., Vila, A. O., Krueger, C. G., Gunasekaran, S., & Reed, J. D. (2010). Biopolymer coating of soybean lecithin liposomes via layer-by-layer self-assembly as novel delivery system for ellagic acid. *Journal of Functional Foods*, 2 (2), 99-106.
 22. Liu, X., McClements, D. J., Cao, Y., & Xiao, H. (2016b). Chemical and physical stability of astaxanthin-enriched emulsion-based delivery systems. *Food Biophysics*, 11 (3), 302-310.
 23. AOAC. 2002. Official Methods of Analysis. Cunniff, (Ed), Gaithersburg, MD, 3p.
 24. Zhong, Q., Tian, H., & Zivanivic, S. (2009). Encapsulation of fish oil in solid zein particles by liquid-liquid dispersion. *Journal of food processing and Preservation*. 33 (2), 255-270. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2009.00390.x>.
 25. Gan, C. Y., Cheng, L. H., & Easa, A. M. (2008). Evaluation of microbial transglutaminase and ribose cross-linked soy protein isolate-based microcapsules containing fish oil. *Journal of Innovative*

- Food Science and Emerging Technologies*, 9 (4), 563-569.
26. Klinkesorn, U., Sophanodora, P., Chinachoti, P., Decker, E. A., & McClements, D. J. (2006). Encapsulation of emulsified tuna oil in two-layered interfacial membranes prepared using electrostatic layer-by-layer deposition. *Journal of Food Hydrocolloids*, 19 (6), 1044-1053.
27. Zuta, P. C., Simpson, B. K., Zhao, X., & Leclerc, L. (2007). The effect of α -tocopherol on the oxidation of mackerel oil. *Journal of Food Chemistry*, 100 (2), 800-807.
28. Santana, A., Cano-Higuera, D., De Oliveira, R., & Telis, V. (2016). Influence of different combination of wall materials on the microencapsulation of jussara pulp (*Euterpe edulis*) by spray drying. *Food Chemistry*, 212, 1-9.
29. Hunder, S. Y., Karthik, P., & Anandharamakrishnan, C. (2015). Effect of whey protein isolate and beta cyclodextrin wall systems on stability of microencapsulated vanillin by spray freeze drying method. *Food Chemistry*, 174, 16-24.
30. Botrel, D. D., de Barros Fernandes, R. V., Borges, S. V., & Yoshida, M. I. (2014). Influence of wall matrix systems on the properties of spray-dried microparticles containing fish oil. *Journal of Food Research International*, 62, 344-352.
31. Cho, Y. H., Shim, H. K., & Park, J. (2003). Encapsulation of fish oil by an enzymatic gelation process using transglutaminase cross-linked proteins. *Journal of Food Science*, 68, 2717-2723.
32. Jinapong, N., Supphantharika, M., & Jammong, P. (2008). Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. *Journal of Food Engineering*, 84 (2), 194-205.
33. Buffo, R. A., Probst, K., Zehentbauer, G., Luo, Z., & Reineccius, G. A. (2002). Effects of agglomeration on the properties of spray-dried encapsulated flavors. *Journal of Flavour and Fragrance*, 17 (4), 292-299.
34. Pai, D., Vangala, V., Wei Ng, J., Kiong Ng, W., & Tan, R. (2015). Resistant maltodextrin as a shell material for encapsulation of naringin: Production and physicochemical characterization. *Journal of Food Engineering*, 161, 68-74.
35. Klaypradit, W., & Huang, Y. W. (2008). Fish oil encapsulation with chitosan using ultrasonic atomizer. *Journal of LWT-Food Science and Technology*, 41 (6), 1133-1139.
36. Sotomayor-Gerding, D., Oomah, B. D., Acevedo, F., Morales, E., Bustamante, M., Shene, C., & Rubilar, M. (2016). High carotenoid bioaccessibility through linseed oil nanoemulsions with enhanced physical and oxidative stability. *Food Chemistry*, 199, 463-470.
37. Jiménez-Martin, E., Pérez-Palacios, T., Carrascal, J. R., & Rojas, T. A. (2016b). Enrichment of chicken nuggets with microencapsulated omega-3 fish oil: effect of frozen storage time on oxidative stability and sensory quality. *Journal of Food and Bioprocess Technology*, 9 (2), 285-297.
38. Ghoturi, S., Ojagh, S. M., Hasani, M., Alishahi, A., & Hasani, S. H. (2023). Effect of addition of fish oil nanoliposomes on the technological and nutrition quality of beef burgers over storage at 4 °C. *Journal of Utilization and Cultivation of Aquatics*, 12 (1), 143-162.

