



انکپسولاسیون پروتئین هیدرولیز شده ضایعات ماهی تن زردباله (*Thunnus albacares*) با استفاده از مالتودکسترین و صمغ عربی و ارزیابی خواص فیزیکی و شیمیایی میکروکپسول‌های حاصل مینا اسمعیلی خاریکی^{۱*}، سهیل ریحانی پول^۲، سکینه یگانه^۱

۱- گروه شیلات، دانشکده علوم دامی و شیلات، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۲- دانش‌آموخته دکتری تخصصی، گروه فرآوری محصولات شیلاتی، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ های مقاله :	استفاده از تکنیک‌های حفاظتی مانند انکپسولاسیون برای افزایش کارایی پروتئین‌های هیدرولیز شده در صنایع غذایی و دارویی، ضروری است. در این تحقیق، پروتئین هیدرولیز شده حاصل از امعاء و احشاء ماهی تن زرد باله (<i>Thunnus albacares</i>) توسط سه نوع پوشش (مالتودکسترین، صمغ عربی و مالتودکسترین/صمغ عربی با نسبت برابر) با استفاده از روش خشک کردن پاششی ریزپوشانی شد و خصوصیات میکروکپسول‌های حاصل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میکروکپسول‌های با دیواره مالتودکسترین کوچک‌ترین اندازه ذرات را داشتند ($4/0 \pm 96/1 \mu m$)، در حالی که نمونه‌های با دیواره صمغ عربی بالاترین بازده ریزپوشانی ($92/76 \pm 1/88\%$) را نشان دادند ($p < 0/05$). با انجام میکروکپسولاسیون، فعالیت آبی کاهش یافت و کمترین مقدار آن ($0/215 \pm 0/01$) در میکروکپسول‌های دارای دیواره مالتودکسترین مشاهده شد ($p < 0/05$). همچنین با میکروکپسولاسیون، دانسیته توده‌ای کاهش یافت و کمترین مقدار آن در میکروکپسول‌های دارای دیواره صمغ عربی ($0/0 \pm 135/01 g/ml$) مشاهده شد ($p < 0/05$). میزان ویسکوزیته سینماتیک میکروکپسول‌های دارای دیواره مالتودکسترین و دیواره ترکیبی در تمامی غلظت‌های مورد بررسی فاقد اختلاف معنی‌دار بود ($p > 0/05$) و بیشترین میزان ویسکوزیته در میکروکپسول‌های دارای دیواره صمغ عربی ثبت شد ($p < 0/05$). میکروکپسولاسیون پروتئین هیدرولیز شده موجب افزایش انحلال‌پذیری و کاهش جاذب‌الرطوبه بودن گردید ($p < 0/05$). بیشترین میزان این دو شاخص (به ترتیب $98/1 \pm 62/18\%$ و $30/17 \pm 0/95\%$) در میکروکپسول‌های دارای دیواره مالتودکسترین مشاهده شدند ($p < 0/05$). این تحقیق نشان داد که ریزپوشانی پروتئین‌های هیدرولیز شده با استفاده از روش خشک-کردن پاششی و حامل‌های مبتنی بر مالتودکسترین و صمغ عربی، موجب بهبود برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها می‌شود و اثر نوع حامل بر این خواص معنی‌دار است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۶	
تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸	
کلمات کلیدی:	
پروتئین هیدرولیز شده، میکروکپسولاسیون، صمغ عربی، خشک کردن پاششی، دانسیته توده‌ای، فعالیت آبی	
DOI: 10.48311/fsct.2026.84014.0	
* مسئول مکاتبات:	
M.esmaeili@sanru.ac.ir; mina.smaily@gmail.com	

۱-مقدمه

افزایش ماندگاری ماده غذایی در فرمولاسیون استفاده شده- اند، دچار تغییرات نامطلوب ساختاری شوند و کارایی خود را از دست دهند. یکی از بهترین روش‌هایی که امروزه در صنعت غذا می‌تواند بر مشکلات مذکور فائق آید، ریزپوشانی پروتئین‌های هیدرولیز شده است [۹ و ۱۰] که معمولا با استفاده از روش‌های مختلف از جمله خشک کردن انجمادی [۱۱] و خشک کردن پاششی [۱۲] انجام می‌گردد. همچنین پروتئین‌های هیدرولیز شده دو نقطه ضعف (مشکل) در رابطه با میزان جذب رطوبت و مزه دارند که راه حل آن‌ها به اعتقاد متخصصین، ریزپوشانی است [۱۲ و ۱۳]. میزان جذب رطوبت در پروتئین‌های هیدرولیز شده بالاست که این ویژگی منفی موجب ناپایداری فیزیکی محصول در طول نگهداری، بروز واکنش‌های شیمیایی، فساد میکروبی و در نهایت از بین رفتن خواص عملکردی، آنتی‌اکسیدانی و ویژگی‌های سلامتی‌بخشی و ارزش غذایی پروتئین‌های هیدرولیز شده می‌گردد [۱۲]. همچنین پروتئین‌های هیدرولیز شده مزه‌ای تلخ دارند که استفاده از آن‌ها را در فرمولاسیون مواد غذایی با مشکل مواجه می‌کند [۱۳ و ۱۴]. ریزپوشانی پروتئین‌های هیدرولیز شده در صورت انتخاب روش و ماده دیواره (حامل) بهینه، می‌تواند نقاط ضعف مذکور را پوشش دهد.

طی فرایند ریزپوشانی، میکروکپسول یا نانوکپسولی اطراف پروتئین‌های هیدرولیز شده ایجاد می‌شود که این ماکرومولکول را در شرایط نامساعد از تغییرات احتمالی محافظت می‌کند. ضمن اینکه کپسول‌های تشکیل شده اطراف پروتئین‌های هیدرولیز شده در این روش، محتویات خود را با سرعت کنترل شده و شرایط ویژه رها می‌کنند [۱۱]. یکی از عواملی که بر تمامی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی ترکیبات فعال ریزپوشانی شده موثر است، جنس حامل یا دیواره است [۱۲، ۱۵ و ۱۶]. در فرایند ریزپوشانی از ترکیبات مختلف کربوهیدراتی (مالتودکسترین، نشاسته، کیتوزان، دکسترین، ساکارز و ...)، سلولزی (کربوکسی متیل- سلولز، متیل سلولز، اتیل سلولز، نیتروسولوز و ...)، پروتئینی (کازئین، پروتئین آب پنیر، ژلاتین و ...)، لیپیدی (لیپوزوم، واکس، پارافین، بیزواکس، دی‌گلیسریدها، مونوگلیسریدها و

پروتئین‌های هیدرولیز شده در واقع حاصل هیدرولیز پروتئین‌های موجود در بافت‌های مختلف با استفاده از روش‌های آنزیمی و شیمیایی هستند. به منظور ارزان‌سازی تولید این محصول و همچنین مسائل زیست‌محیطی، غالباً ضایعات گوشتی (ضایعات کشتارگاه‌های دام و طیور و همچنین ضایعات مراکز فرآوری آبزیان و ... که دورریز آن‌ها موجب آلودگی محیط زیست و استفاده بهینه از آن‌ها موجب افزایش بهره‌وری می‌شود) به عنوان سوبسترا مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پروتئین‌ها در تولید نوشیدنی‌ها به عنوان پایدارکننده و طعم‌دهنده [۱]، در مواد غذایی مختلف به عنوان آنتی‌اکسیدان، ضد میکروب، امولسیفایر و کف‌زا [۲-۴]، در ساخت محیط کشت باکتری‌ها به عنوان منبع نیتروژن [۵] و در غذای انسان، دام، طیور و آبزیان به عنوان مکمل پروتئینی با قابلیت هضم‌پذیری بالا کاربرد دارند. ضمن اینکه پودرهای پروتئینی حاصل از آبکافت، حاوی پپتیدهای زیست‌فعالند. پپتیدهای زیست‌فعال شامل توالی‌های کوتاه اسیدهای آمینه هستند که وقتی توسط انسان مصرف می‌شوند، بسته به خصوصیات مختلف مانند وزن مولکولی، پروفیل اسیدهای آمینه، درجه هیدرولیز و غیره، می‌توانند اثرات فیزیولوژیکی مفیدی از جمله تعدیل‌کنندگی فشار خون، تقویت‌کنندگی سیستم ایمنی، ضد التهابی، ضد انعقاد خون، ضد سرطانی، آنتی‌اکسیدانی و ضد میکروبی بر بدن اعمال کنند [۶ و ۷].

پپتیدهای زیست‌فعال جهت اعمال این خواص باید در جریان هضم و جذب (معده و روده) سالم و فعال باقی بمانند و سپس وارد جریان خون شوند [۸]. از آنجا که ممکن است این پپتیدها در شرایط اسیدی و آنزیمی دستگاه گوارش دناتوره و تجزیه شوند، استفاده از روش‌هایی جهت حفاظت از این پپتیدها ضروری به نظر می‌رسد. همچنین جهت حفظ خواص نگهدارندگی (ضد باکتریایی و آنتی‌اکسیدانی) پروتئین‌های هیدرولیز شده در مواد غذایی، لازم است تکنیک‌های حفاظتی مناسب بکار گرفته شوند. چرا که هر ماده غذایی شرایط تولید (استفاده از دماهای بالا) و نگهداری خاصی دارد و ممکن است پپتیدهای زیست‌فعالی که جهت

دو ماده و روش خشک کردن پاششی ریزپوشانی می شوند. در مرحله بعد، اثر نوع پوشش مورد استفاده بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی میکروکپسول‌های حامل مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- مواد و روش

۲-۱- هیدرولیز آنزیمی ضایعات

به منظور انجام هیدرولیز آنزیمی ضایعات (امعاء و احشاء) از آنزیم میکروبی نئوتراز (نووایم، دانمارک، ۰/۸ L) پس از بهینه‌سازی شرایط (دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، $pH=7/4$ ، نسبت آنزیم به سوبسترا ۲ درصد وزنی/وزنی، زمان ۹۰ دقیقه) استفاده شد. برای انجام فرایند آبکافت، ۱۰۰ گرم سوبسترای هموژن‌شده در ظروف شیشه‌ای درب‌دار ۵۰۰ میلی‌لیتری ریخته شد، سپس ۲۰۰ میلی‌لیتر بافر فسفات با $pH=7/4$ به آن اضافه گردید. از آنجا که ضایعات دارای آنزیم‌های داخلی بوده و هدف، بررسی اثر آنزیم تجاری است، قبل از اضافه‌کردن آنزیم، ظروف حاوی نمونه به مدت ۲۰ دقیقه در حمام آبی (Memmert wnb 29, Germany) با دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا آنزیم‌های داخل بافت غیر فعال شوند. بعد از این مرحله و خنک‌شدن، آنزیم نئوتراز به مخلوط اضافه و سپس در انکوباتور شیکردار (Cold shaker incubator, TM 65, Iran) با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. پس از ۹۰ دقیقه هیدرولیز، نمونه به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا در این دما آنزیم نئوتراز غیر فعال شده و واکنش خاتمه یابد. پس از خنک‌شدن، نمونه به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد با دور ۸۰۰۰g سانتریفوژ (D-78532 Tuttligen, Germany) شد. سپس مایع رویی جدا و با خشک‌کن انجمادی (Christ, Germany) لیوفیلیزه و تا زمان استفاده در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد نگهداری گردید [۱۸].

۲-۲- درجه هیدرولیز فرآیند

(...) و ... جهت پوشش ترکیبات فعال استفاده می‌شود [۱۱]. مالتودکسترین یکی از پوشش‌های کربوهیدراتی است که از مشتقات نشاسته می‌باشد و از منابع مختلف نشاسته‌ای مانند سیب‌زمینی، ذرت و گندم تهیه می‌گردد. این ماده بدلیل حلالیت بالا در آب و عدم داشتن بو و رنگ شاخص، از مهم‌ترین مواد پلی‌ساکاریدی جهت ریزپوشانی کردن مواد محسوب می‌شود. صمغ عربی نیز پلی‌ساکاریدی است که به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی خاص دارای کاربرد گسترده در صنایع غذایی (امولسیفایر، تثبیت و پایدارکننده، قوام‌دهنده و ...) است و طی دهه اخیر به عنوان دیواره در فرایند نانوکپسولاسیون و میکروکپسولاسیون بسیار مورد توجه بوده است. مالتودکسترین و صمغ عربی ویژگی‌هایی از قبیل قیمت مناسب، خوراکی بودن، حلالیت بالا و ویسکوزیته پائین دارند که همین ویژگی‌ها موجب استفاده گسترده از آن‌ها به عنوان حامل یا دیواره در ریزپوشانی ترکیبات فعال چسبنده و آنتی-اکسیدان شده است [۱۱، ۱۲ و ۱۷]. از بین روش‌های مختلف ریزپوشانی ترکیبات فعال (خشک‌کردن پاششی، اکستروژن، سردکردن پاششی، خشک‌کردن انجمادی و ...)، خشک‌کردن پاششی رایج‌ترین روش مورد استفاده محققین می‌باشد. در دسترس بودن تجهیزات مورد استفاده، حفاظت مطلوب از ساختار ترکیبات فعال، پایداری ایده‌آل ترکیب نهایی و امکان تولید در مقیاس گسترده از مزایای این روش است [۱۲-۱۷]. ماهی تن زردباله^۱ از ماهیان مرغوب و پرطرفدار به منظور تولید کنسرو در کشور است. طی فرآیندهای مختلف تولید محصول، حجم بسیار زیادی از امعاء و احشاء این ماهی انبار و منجمد شده و نهایتاً در تولید فرآورده‌هایی نظیر پودر ماهی، بیوسیلاژ، پودر خون و ... بکارگیری می‌گردند. از دیگر راه‌های استفاده بهینه از این ضایعات، تولید پروتئین‌های هیدرولیز شده یا پپتیدهای زیست‌فعال است [۱۸]. در تحقیق حاضر، ابتدا امعاء و احشاء ماهی مذکور با استفاده از آنزیم میکروبی نئوتراز هیدرولیز و سپس هیدرولیزات حاصل با دیواره‌هایی از جنس مالتودکسترین، صمغ عربی و ترکیب هر

خوراک‌های از قبل تهیه شده برای خشک کردن استفاده گردید. برای هر سه تیمار دبی خوراک ورودی ۳ میلی متر در دقیقه و دمای هوای خروجی طی فرآیند ۷۵ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شد. نهایتاً پودرهای جمع شده در محفظه شیشه‌ای تا رسیدن به دمای ثابت و ممانعت از تغییرات رطوبت در دسیکاتور نگهداری شدند. به منظور نگهداری محصولات ریزپوشانی شده از شیشه‌های تیره در محیط تاریک تا رسیدن زمان آزمایشات استفاده گردید [۱۲ و ۲۰].

۲-۵- میانگین اندازه ذرات، شاخص توزیع اندازه ذره -

ای، پتانسیل زتا و بازده ریزپوشانی

میانگین سایز ذرات و شاخص توزیع اندازه ذره‌ای پس از رقیق کردن نمونه‌ها به میزان ۱۰ برابر با بافر فسفات نمکی (PBS) به روش تفرق نور پویا با استفاده از دستگاه زتاسایزر (نانوسایزر، ۳۰۰۰، ساخت انگلستان، شرکت Malvern، زاویه ۹۰ درجه و سل مخصوص با عرض ۰/۰۱ متر) اندازه‌گیری شدند [۱۰]. به منظور اندازه‌گیری پتانسیل زتای سطح میکروکپسول‌ها نیز از دستگاه زتاسایزر استفاده گردید. در این روش میکروکپسول‌ها با استفاده از ۵۰ میلی مولار بافر فسفات (pH=۷/۴) به میزان ۱۰ برابر رقیق شدند. ارزیابی پتانسیل زتا در زاویه ۱۷۳ درجه سانتی گراد و طول موج ۶۳۳ نانومتر هلیوم - تنگستن (در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد) انجام گرفت [۱۰]. بازده ریزپوشانی فرآیند به روش Liu و همکاران (۲۰۱۵) و با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد [۲۱]:

مقدار پروتئین کل / (مقدار پروتئین بارگیری نشده - مقدار پروتئین کل) = بازده ریزپوشانی

۲-۶- اندازه‌گیری رطوبت و فعالیت آبی

به منظور اندازه‌گیری رطوبت، ابتدا ظرفی که باید نمونه در آن قرار گیرد به مدت نیم ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد خشک و در دسیکاتور تا دمای اتاق خنک گردید. ظرف با ترازوی دقیق (دقت ۰/۰۰۰۱ گرم) توزین و سپس ۱ گرم نمونه به آن اضافه و مجدداً وزن شد. در مرحله بعد ظرف به آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد انتقال یافت و تا رسیدن به وزن ثابت (حدوداً ۳ ساعت) در این شرایط

بعد از پایان فرایند آبکافت، محلول تری کلرواستیک اسید ۲۰ درصد با نسبت برابر به مقداری از مایع رویی حاصل از سانتریفیوژ افزوده شد و محلول حاصل با دور ۶۷۰۰g در دمای ۴ درجه سانتی گراد به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ گردید. سپس نیتروژن موجود در سوپرناتانت جدید به روش بیورت [۱۹] سنجیده شد. نهایتاً درجه هیدرولیز از تقسیم نیتروژن موجود در محلول ۱۰ درصد تری کلرواستیک اسید بر نیتروژن کل نمونه محاسبه و به صورت درصد گزارش گردید [۱۸]. برای رسم منحنی استاندارد و به دست آوردن معادله دستگاه اسپکتروفتومتر از سرم آلبومین گاوی به عنوان پروتئین استاندارد استفاده شد.

۲-۳- آماده‌سازی نمونه جهت ریزپوشانی

برای آماده‌سازی محلول پایه جهت انجام فرآیند ریزپوشانی، پروتئین هیدرولیز شده با نسبت ۴۰ به ۶۰ با مواد دیواره عبارتند از مالتودکسترین، صمغ عربی و ترکیبی از هر دو ماده مذکور با نسبت ۵۰:۵۰، در آب مقطر حل شدند. به این منظور مقدار ۱/۲ گرم پروتئین هیدرولیز شده با ۱/۸ گرم انواع دیواره‌ها در ۲۰ میلی لیتر آب مقطر به مدت ۳۰ دقیقه به طور کامل هموزن و حل شدند. نهایتاً محلول‌های تهیه شده که در واقع تحت عنوان محلول خوراک مطرح هستند، به منظور هیدراته شدن کامل ترکیبات هسته و دیواره به مدت ۳ ساعت در دمای محیط انکوبه شدند [۲۰].

۲-۴- انجام فرآیند ریزپوشانی به روش خشک کردن

پاششی

خشک‌کن پاششی مورد استفاده در این پژوهش (درسا، ایران) دارای یک محفظه به صورت استوانه‌ای با قسمت تحتانی مخروطی شکل با قطر قسمت استوانه‌ای ۲۸ سانتی متر و ارتفاع کل محفظه ۸۰ سانتی متر بود. این خشک‌کن پاششی دارای یک پمپ تغذیه حجمی پریستالتیک با دبی تغذیه متغیر با فشار ۱ بار برای ارسال خوراک به نازل است. فرآیند پاشش توسط اتمایزر فشاری با قطر ۲ سانتی متر و قابلیت عمل توسط کمپرسور هوا انجام شد. در ادامه از هوای ورودی با دمای ۱۳۰ درجه سانتی گراد و به صورت هم‌جهت با

مدت ۴ دقیقه تحت عمل سانتریفوژ (D-78532 Tuttligen, Germany) قرار گرفت. پس از عمل سانتریفوژ، حجم مشخص از مایع رویی جدا و به یک پتريدش منتقل و در آون (Fan azma gostar, BM 55, Iran) با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ ساعت خشک گردید. سرانجام وزن ماده خشک شده نسبت به پودر اولیه جهت تعیین حد انحلال‌پذیری به کار رفت و به صورت درصد گزارش شد [۲۵].

۱۰-۲- میزان جاذب‌الرطوبه‌بودن

به منظور بررسی میزان جاذب‌الرطوبه‌بودن تیمارها، ۱ گرم از هر تیمار در دسیکاتور محتوی محلول اشباع سدیم کلرید با رطوبت نسبی ۷۵ درصد به مدت یک هفته نگهداری شد. میزان جاذب‌الرطوبه‌بودن تیمارها، به صورت محاسبه افزایش وزن نمونه بر حسب درصد (گرم آب جذب‌شده توسط ۱۰۰ گرم پودر) اندازه‌گیری و گزارش گردید [۲۶].

۱۱-۲- تجزیه و تحلیل آماری

پژوهش حاضر در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا و به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار آماری SPSS (نسخه ۲۲) استفاده شد. داده‌ها از طریق آنالیز واریانس یک‌طرفه^۲ آنالیز شدند و ارزیابی معنی‌داری تفاوت بین میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن (در سطح اطمینان ۹۵ درصد) انجام گرفت. به منظور رسم جداول و اشکال نیز از نرم‌افزار EXCEL استفاده گردید.

۳- نتایج

۱-۳- میانگین اندازه ذرات، پتاسیل زتا، شاخص توزیع

اندازه ذره‌ای و بازده ریزپوشانی

جدول ۱ برخی از ویژگی‌های فیزیکی میکروکپسول‌های حامل پروتئین هیدرولیزشده (درجه هیدرولیز ۱۵/۶۳±۰/۴۹ درصد) با دیواره‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، میانگین سایز ذرات در سه تیمار به صورت معنی‌داری متفاوت و از ۴/۹۶±۰/۱ تا

نگهداری شد. میزان رطوبت از اختلاف وزن ظرف و نمونه قبل و بعد از خشک کردن بر وزن نمونه محاسبه و به صورت درصد گزارش شد. جهت اندازه‌گیری فعالیت آبی نمونه‌ها از دستگاه اندازه‌گیری فعالیت آبی (Decagon Devices, USA) در دمای محیط استفاده گردید [۲۲].

۷-۲- دانسیته توده‌ای

جهت سنجش دانسیته توده‌ای پروتئین هیدرولیزشده و میکروکپسول‌های حامل، ابتدا استوانه مدرج ۱۰ میلی‌لیتری توزین و حجم مشخصی از استوانه با تیمارها پر و مجدداً عملیات توزین انجام شد. نهایتاً میزان این شاخص به عنوان نسبتی از وزن نمونه به حجم نمونه محاسبه و به صورت گرم بر میلی‌لیتر گزارش گردید [۲۳].

۸-۲- ویسکوزیته سینماتیک

ویسکوزیته سینماتیک محلول‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد محلول‌های پروتئین هیدرولیزشده و میکروکپسول‌های حامل به صورت تابعی از غلظت توسط ویسکومتر لوله موئین (Cannon-Fenske Viscometer, Schott Gerate, Germany) شماره ۱۰۰ محاسبه گردید. دمای ویسکومتر بوسیله حمام آبی در ۱۰ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته شد. مدت زمان عبور نمونه از ویسکومتر اندازه‌گیری و ویسکوزیته سینماتیک نمونه‌ها مطابق رابطه زیر محاسبه و بر حسب سانتی‌استوک گزارش شد. در این رابطه، C_0 معادل 0.1036 و B معادل $10^{-6} * 86/2$ بر درجه سانتی‌گراد می‌باشد [۲۴].

[دمای آزمایش - دمای پرکردن] $(1-B) * C_0$ زمان جریان =

ویسکوزیته (سانتی‌استوک)

۹-۲- انحلال‌پذیری

به منظور اندازه‌گیری انحلال‌پذیری تیمارها، ۱ گرم از نمونه‌ها به ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر تحت شرایط هم‌زدن با یک همزن مغناطیسی (در ۷۰۰ دور در دقیقه) به مدت ۴ دقیقه اضافه شدند. در مرحله بعد، این محلول در دور ۳۰۰۰g به

ذره‌ای موثر و کمترین میزان این شاخص در میکروکپسول‌های دارای دیواره مالتودکسترین ($0/329 \pm 0/07$) ثبت شد ($p < 0/05$). همچنین بازده فرایند ریزپوشانی نیز تحت تاثیر جنس دیواره‌ها قرار گرفت و بیشترین حد این شاخص مربوط به میکروکپسول‌های دارای دیواره صمغ عربی ($92/1 \pm 7/88$ درصد) بود ($p < 0/05$).

$7/0 \pm 8/12$ میکرومتر متغیر است ($p < 0/05$). ضمن اینکه حداقل میانگین سایز ذرات مربوط به میکروکپسول‌های دارای دیواره مالتودکسترین می‌باشد ($p < 0/05$). در ادامه مشخص شد میکروکپسول‌های تولیدشده، دارای پتانسیل زتای منفی متغیر و متفاوت از $-11/63 \pm 0/9$ تا $-23/39 \pm 1/1$ میلی‌ولت هستند ($p < 0/05$). مطابق جدول ۱ نوع پوشش یا دیواره‌ها به صورت قابل توجهی بر شاخص توزیع اندازه

Table 1. Physical properties of microcapsules carrying hydrolyzed protein

Treatments	Mean particle size (μm)	Zeta potential (MV)	Particle distribution index	Encapsulation efficiency (%)
FPH encapsulated using MD	4.96 ± 0.1^c	-23.39 ± 1.1^c	0.329 ± 0.07^c	74.85 ± 0.52^c
FPH encapsulated using GA	7.84 ± 0.12^a	-11.63 ± 0.9^a	0.695 ± 0.02^a	92.76 ± 1.88^a
FPH encapsulated using MD+GA	6.17 ± 0.05^b	-17.87 ± 1^b	0.538 ± 0.06^b	81.23 ± 0.14^b

- FPH: Fish Protein Hydrolysate, MD: Maltodextrin, GA: Gum Arabic
- Different letters in each column indicate significant difference between the data ($p < 0.05$).

صمغ عربی ($5/11 \pm 0/15$ درصد) ثبت شد ($p < 0/05$). میکروکپسول‌هایی با دیواره ترکیبی مالتودکسترین و صمغ عربی با رطوبتی معادل $4/28 \pm 0/11$ درصد در حد وسط قرار داشتند. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، بر عکس رطوبت، با انجام فرآیند میکروکپسولاسیون، فعالیت آبی میکروکپسول‌ها به صورت معنی‌داری کاهش یافت ($p < 0/05$) و در بین میکروکپسول‌ها بیشترین فعالیت آبی مربوط به میکروکپسول‌های ریزپوشانی‌شده با صمغ عربی ($0/0 \pm 3/89/02$) بود ($p < 0/05$). همچنین میزان فعالیت آبی در میکروکپسول‌های دارای دیواره مالتودکسترین ($0/0 \pm 2/15/01$)، حداقل بود ($p < 0/05$).

۲-۳- رطوبت و فعالیت آبی پروتئین هیدرولیزشده و میکروکپسول‌های حامل
جدول ۲ میزان رطوبت و فعالیت آبی پروتئین هیدرولیزشده و میکروکپسول‌های حامل آن را نشان می‌دهد. مطابق این جدول با انجام فرایند ریزپوشانی، میزان رطوبت میکروکپسول‌ها به صورت معنی‌داری (نسبت به پروتئین هیدرولیزشده) افزایش یافت ($p < 0/05$). در بین میکروکپسول‌ها، حداقل رطوبت مربوط به پروتئین ریزپوشانی‌شده با دیواره مالتودکسترین ($3/36 \pm 0/07$ درصد) بود و حداکثر رطوبت در پروتئین ریزپوشانی‌شده با دیواره

Table 2. Moisture and water activity of FPH and carrier microcapsules

Treatments	Moisture (%)	Water activity
FPH	2.14 ± 0.05^d	0.472 ± 0.03^a
FPH encapsulated using MD	3.36 ± 0.07^c	0.215 ± 0.01^d
FPH encapsulated using GA	5.11 ± 0.15^a	0.389 ± 0.02^b
FPH encapsulated using MD+GA	4.28 ± 0.11^b	0.299 ± 0.01^c

- FPH: Fish Protein Hydrolysate, MD: Maltodextrin, GA: Gum Arabic
- Different letters in each column indicate significant difference between the data ($p < 0.05$).

شکل ۱ میزان دانسیته توده‌ای پروتئین هیدرولیزشده و میکروکپسول‌های حامل با پوشش‌های مختلف را نشان می‌-

۳-۳- دانسیته توده‌ای پروتئین هیدرولیزشده و میکروکپسول‌های حامل

مطابق شکل ۱ میزان این شاخص در میکروکپسول‌های دارای دیواره صمغ عربی، حداقل (0.135 ± 0.01 گرم بر میلی لیتر) و مالتودکسترین، حداکثر (0.212 ± 0.02 گرم بر میلی لیتر) بود ($p < 0.05$).

دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با انجام فرایند ریزپوشانی، دانسیته توده‌ای در میکروکپسول‌های حامل نسبت به پروتئین هیدرولیزشده (0.311 ± 0.03 گرم بر میلی لیتر) به صورت معنی داری کاهش یافته است ($p < 0.05$).

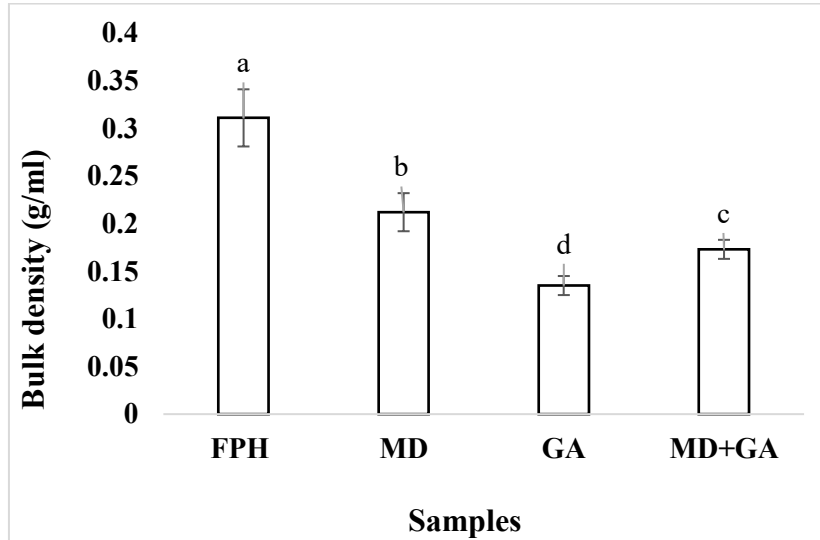


Figure 1. Bulk density of FPH and carrier microcapsules

FPH: Fish Protein Hydrolysate, MD: FPH encapsulated using maltodextrin, GA: FPH encapsulated using gum Arabic, MD+ GA: FPH encapsulated using maltodextrin and gum Arabic

Different letters indicate significant difference between the data ($p < 0.05$).

صمغ عربی (در تمامی غلظت‌ها) فاقد اختلاف معنی دار بودند ($p > 0.05$). همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، بیشترین ویسکوزیته سینماتیک بین تیمارها در تمامی غلظت‌های مورد بررسی مربوط به میکروکپسول‌های حامل با دیواره صمغ عربی می‌باشد ($p < 0.05$). همچنین با افزایش غلظت، ویسکوزیته سینماتیک همه نمونه‌ها روند افزایشی نشان داد. حداکثر مقادیر ویسکوزیته سینماتیک در پروتئین هیدرولیزشده و میکروکپسول‌های حامل با دیواره‌های مالتودکسترین، صمغ عربی و ترکیبی به ترتیب 2.11 ± 0.02 ، 2.76 ± 0.08 و 3.0 ± 0.09 ، 2.0 ± 0.05 سانتی استوک بود.

۳-۴- ویسکوزیته سینماتیک پروتئین هیدرولیزشده و

میکروکپسول‌های حامل

در شکل ۲ ویسکوزیته سینماتیک پروتئین هیدرولیزشده و میکروکپسول‌های حامل با پوشش‌های مختلف در غلظت‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد ارائه شده است. مطابق این شکل، مقادیر ویسکوزیته هر سه میکروکپسول حامل (در تمامی غلظت‌ها) به صورت معنی داری بیشتر از پروتئین هیدرولیزشده می‌باشند ($p < 0.05$). در ادامه؛ مقادیر این شاخص در میکروکپسول‌های حامل با پوشش مالتودکسترین و میکروکپسول‌های حامل با دیواره ترکیبی مالتودکسترین و

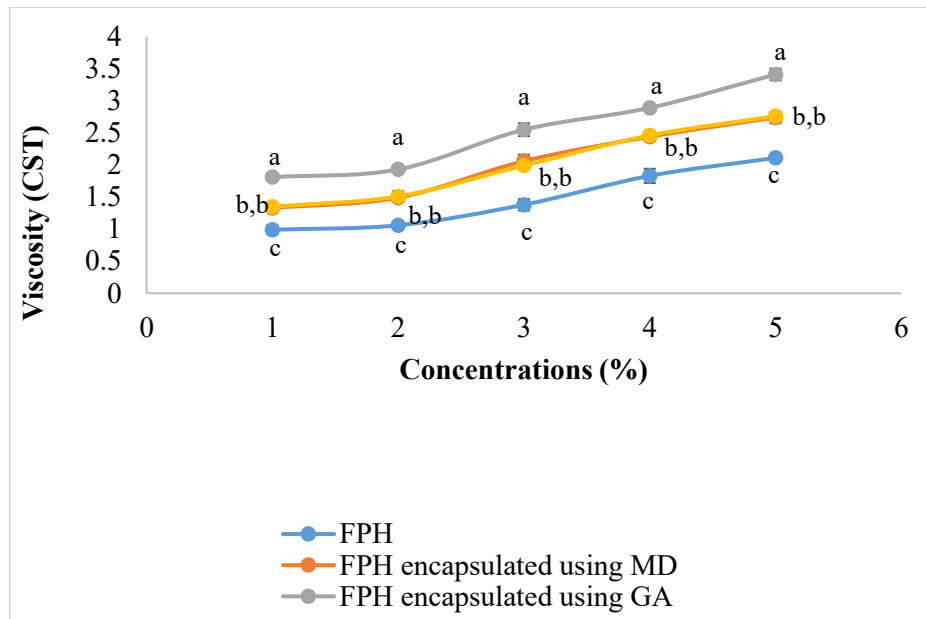


Figure 2. Viscosity of fish protein hydrolysate and carrier microcapsules

Different letters indicate significant difference between the data ($p < 0.05$).

می‌شود، بیشترین و کمترین خاصیت انحلال‌پذیری به ترتیب مربوط به میکروکپسول‌های دارای دیواره مالتودکسترین (۹۸/۱±۶۲/۱۸ درصد) و میکروکپسول‌های دارای دیواره صمغ عربی (۹۰/۱۲±۱/۹۲ درصد) می‌باشد ($p < 0/05$). مطابق این جدول، میزان جاذب‌الرطوبه‌بودن هر سه میکروکپسول حامل ($p < 0/05$) به صورت معنی‌داری کمتر از پروتئین هیدرولیزشده بود و کمترین میزان این شاخص در میکروکپسول‌های حامل با دیواره ترکیبی مالتودکسترین و صمغ عربی (۲۰/۹۶±۱/۷۹ درصد) ثبت گردید ($p < 0/05$).

۳-۵- انحلال‌پذیری و جاذب‌الرطوبه‌بودن پروتئین

هیدرولیزشده و میکروکپسول‌های حامل

در جدول ۳ میزان انحلال‌پذیری و جاذب‌الرطوبه‌بودن پروتئین هیدرولیزشده و میکروکپسول‌های حامل با دیواره‌های مختلف ارائه شده است. مطابق این جدول با ریزپوشانی پروتئین هیدرولیزشده، حلالیت آن به صورت معنی‌داری افزایش یافت و این شاخص در هر سه میکروکپسول حامل ($p < 0/05$) بیشتر از پروتئین هیدرولیزشده (۸۵/۳۶±۱/۵۷ درصد) بود ($p < 0/05$). همانطور که در جدول ۳ مشاهده

Table 3. Solubility and hygroscopicity of FPH and carrier microcapsules

Treatments	Solubility (%)	Hygroscopicity (%)
FPH	85.36±1.57 ^d	41.29±1.23 ^a
FPH encapsulated using MD	98.62±1.18 ^a	30.17±0.95 ^b
FPH encapsulated using GA	90.12±1.92 ^c	24.58±1.01 ^c
FPH encapsulated using MD+GA	94.86±0.83 ^b	20.96±1.79 ^d

- FPH: Fish Protein Hydrolysate, MD: Maltodextrin, GA: Gum Arabic
- Different letters in each column indicate significant difference between the data ($p < 0.05$).

ریزپوشانی و نرخ رهایش هسته از دیواره به صورت قابل توجهی اثرگذار است [۲۸]. از جمله عوامل اثرگذار بر این شاخص می‌توان به نوع روش ریزپوشانی، ترکیب فعال ریزپوشانی‌شده، جنس پوشش یا دیواره، نسبت هسته به دیواره و ... اشاره کرد [۲۹ و ۳۰]. در پژوهش حاضر میانگین

۴- بحث

یکی از مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی مواد ریزپوشانی‌شده (میکروکپسول‌ها)، میانگین سایز ذرات است. این شاخص یکی از اصلی‌ترین خصوصیات می‌باشد و در پایداری آن‌ها موثر است [۲۷]. همچنین میانگین سایز ذرات بر بازده فرآیند

سایز ذرات تحت تاثیر جنس دیواره (مالتودکسترین، صمغ عربی و ترکیب این دو ماده) قرار گرفته و کپسول‌های حاصل سایزی در محدوده ۴/۹۶ تا ۷/۸۴ میکرومتر داشتند. در تحقیقی که خواص فیزیکی میکروکپسول‌های حامل کازئین هیدرولیز شده با پوشش‌های مشابه مورد ارزیابی قرار گرفت، میانگین سایز ذرات تحت تاثیر جنس دیواره متغیر بود و در بازه ۵/۱۶-۶/۳۱ میکرومتر قرار داشت [۱۲]. همچنین در پژوهش مذکور مانند مطالعه حاضر میکروکپسول‌های تولید شده با دیواره صمغ عربی دارای میانگین سایز بزرگتری بودند که دلیل آن افزایش بیشتر ویسکوزیته در خوراک‌های تولید شده با صمغ عربی نسبت به مالتودکسترین و متعاقباً تولید قطرات بزرگتر عنوان شد [۲۲]. در تحقیقی که هیدرولیزات کازئین با استفاده از ایزوله سویا به روش خشک کردن پاششی ریزپوشانی شدند، میانگین سایز میکروکپسول‌های تولید شده ۹/۱۸ تا ۱۱/۳۲ متغیر بود [۳۱]. شاخص توزیع اندازه ذره‌ای نشان‌دهنده میزان یکنواختی یا غیر یکنواختی سیستم‌های کلئیدی است. مقادیر بالای این شاخص نشان می‌دهد که ذرات بزرگ و غیر یکنواخت در سیستم کلئیدی وجود دارند [۱۰]. شاخص توزیع اندازه ذره‌ای در میکروکپسول‌های تولید شده در تحقیق حاضر تحت تاثیر جنس پوشش، متفاوت و در محدوده ۰/۳۲۹ تا ۰/۶۹۵ قرار داشت که این دامنه نشان از یکنواختی تقریبی میکروکپسول‌ها دارد. در تحقیق موسکوئرا و همکاران (۲۰۱۴)، شاخص توزیع اندازه ذره‌ای لیپوزوم‌های حامل پپتیدهای حاصل از کلاژن ماهی، ۰/۲۵ ثبت شد [۳۲]. میزان شاخص توزیع اندازه ذره‌ای در پژوهش Baygan و همکاران (۲۰۲۲) پیرامون ریزپوشانی اسانس کاکوتی با استفاده از پوشش مالتودکسترین و صمغ عربی، ۰/۶۸۱ گزارش گردید [۳۳]. در تحقیقی که رنگدانه آستاگزانتین با پوشش ترکیبی مالتودکسترین و کازئینات سدیم ریزپوشانی و خصوصیات فیزیکی نانوکپسول‌ها ارزیابی شد، شاخص توزیع اندازه ذره - ای، ۰/۴۲۳ گزارش شد [۲۸].

سیستم‌های کلئیدی اندازه‌گیری می‌شود. به طور کلی وجود ترکیبات فعال سطحی باردار مانند سورفاکتانت‌های یونی، پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌ها در سیستم‌های امولسیون موجب تولید بارهای الکتریکی متفاوت (مثبت و منفی) در سطح قطرات می‌گردد. در واقع پتانسیل زتا بیانگر بزرگی همین بار الکتریکی و واکنش‌های الکترواستاتیک بین ذرات معلق است. هر چه مقدار پتانسیل زتای ذرات ریزپوشانی شده بیشتر باشد، نیروی دافعه بین ذرات بیشتر و تمایل آن‌ها برای به هم چسبیدن کم می‌شود که در این صورت قطرات امولسیون یکدیگر را دفع می‌کنند. در نتیجه این برهمکنش‌ها سامانه امولسیون پایدار می‌گردد [۱۰ و ۳۴]. کاهش پتانسیل زتا به کمتر از مقادیر بحرانی، لایه دوگانه باردار اطراف ذرات را تخریب کرده و موجب تجمع ذرات (توده‌ای شدن) می‌گردد. به طور کلی ذراتی که پتانسیل زتای آن‌ها بالاتر از +۳۰ و یا کمتر از -۳۰ میلی‌ولت باشد، در بالاترین حد پایداری قرار دارند [۳۵]. میکروکپسول‌های تولید شده در تحقیق حاضر بسته به جنس دیواره، دارای پتانسیل زتای متفاوتی در بازه ۱۱/۶۳- تا ۲۳/۳۹- میلی‌ولت بودند که بنابر اطلاعات مذکور، مقادیر مطلوبی جهت پایداری سیستم‌های امولسیون می‌باشند. علت منفی بودن پتانسیل زتای میکروکپسول‌ها را می‌توان به ساختار آنیونی صمغ عربی نسبت داد [۳۶].

بازده ریزپوشانی یکی از مهم‌ترین شاخص‌های پایداری ترکیبات کپسوله شده است؛ زیرا نشان‌دهنده توانایی میکروکپسول‌ها (نانوکپسول‌ها) در جلوگیری از خروج هسته درونی می‌باشد. میزان بازده فرایند در تحقیق حاضر تحت تاثیر جنس دیواره به صورت معنی‌داری تغییر کرد و از ۷۴/۸۵ تا ۹۲/۷۶ درصد متفاوت بود. در تحقیقی که پپتیدهای حاصل از آبکافت ژلاتین پوست ماهی قزل‌آلا با استفاده از نانولیپوزوم و غلظت‌های ۰/۲ تا ۱ درصد کیتوزان کپسوله شدند، بازده ریزپوشانی تیمارها از ۶۷/۱ تا ۸۰/۲ درصد متغیر بود [۳۷]. بازده ریزپوشانی فرایند تولید نانوکپسول‌های حامل رنگدانه فیکوسیانین استخراج شده از میکروجلبک اسپیرولینا با پوشش ترکیبی مالتودکسترین-کازئینات سدیم، ۷۳/۴۱ درصد گزارش شد [۱۱]. در پژوهشی که از مالتودکسترین،

چای کوهی با دیوارهای مالتودکسترین و صمغ عربی ریزپوشانی شد، میکروکپسول‌های تولیدشده دارای دیواره مالتودکسترین کمترین و میکروکپسول‌های دارای دیواره صمغ عربی بیشترین رطوبت را داشتند [۴۰] که این یافته با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. علت این نتیجه در پژوهش مذکور، بالاتر بودن ظرفیت نگهداری آب در هیدرولوئیدها (صمغ عربی) نسبت به مشتقات نشاسته (مالتودکسترین) گزارش گردید [۴۰]. همچنین در تحقیقی که کازئین هیدرولیزشده با استفاده از صمغ عربی، مالتودکسترین و دیواره ترکیبی از این دو ماده ریزپوشانی شد (روش خشک کردن پاششی)، حداقل رطوبت و فعالیت آبی (به ترتیب $3/19 \pm 0/21$ و $0/273 \pm 0/01$) در میکروکپسول‌های حامل با دیواره مالتودکسترین و حداکثر این شاخص‌ها (به ترتیب $4/27 \pm 0/14$ و $0/305 \pm 0/01$) در میکروکپسول‌های حامل با دیواره صمغ عربی گزارش گردید [۱۲] که این یافته نیز با پژوهش پیش‌رو همخوانی دارد. در پژوهش حاضر با انجام فرایند میکروکپسولاسیون، رطوبت پودرها بیشتر شد که این مورد با نتایج Fávvaro-Trindade و همکاران (۲۰۱۰) و Akbarbaglu و همکاران (۲۰۲۰) همخوانی دارد [۱۲] و [۱۴].

دانشیه توده‌ای میکرو و نانوکپسول‌ها به شدت نیروهای جاذبه بین ذرات، اندازه ذرات، تعداد نقاط تماس بین آن‌ها، شکل و توزیع اندازه ذرات، رطوبت، ترکیب شیمیایی، میزان هوای محبوس‌شده بین ذرات و جنس پوشش یا دیواره بستگی دارد [۴۱]. این شاخص نشان‌دهنده رفتار محصول در مخلوط خشک می‌باشد و در بسته‌بندی پودر پروتئین هیدرولیزشده و میکروکپسول‌های حامل آن اهمیت دارد [۴۲]. در پژوهش پیش‌رو میزان این شاخص در میکروکپسول‌ها بسته به نوع پوشش از $0/135$ تا $0/212$ گرم بر لیتر متفاوت و حداقل دانشیه توده‌ای در میکروکپسول‌های دارای دیواره صمغ عربی ثبت شد. این یافته با پژوهش Akbarbaglu و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد و علت آن کم‌تر بودن ویسکوزیته صمغ عربی نسبت به مالتودکسترین بیان شده است [۱۲]. افزایش ویسکوزیته موجب تولید

صمغ عربی و اینولین به منظور ریزپوشانی اسانس هل استفاده شد، بازده ریزپوشانی بر حسب نوع و درصد دیواره از ۲۳ تا ۸۰ درصد متغیر بود [۳۸]. در پژوهش مذکور بیشترین بازده ریزپوشانی متعلق به ترکیب دیواره صمغ عربی، مالتودکسترین و اینولین با نسبت‌های به ترتیب $8:14:78$ و کمترین میزان این شاخص مربوط به تیمار صمغ عربی، مالتودکسترین و اینولین با نسبت‌های به ترتیب $36:50:14$ بود [۳۸].

یکی از مهم‌ترین عوامل فساد مواد غذایی، محصولات کشاورزی و فرآورده‌های دامی آب آزاد موجود در آن‌هاست. رطوبت در مواد غذایی شامل ۲ بخش مجزا از هم می‌باشد؛ بخشی که به مواد مختلف چسبیده است و همان رطوبت درگیر و جذب‌شده می‌باشد (آب متصل) و بخشی دیگر به صورت آزاد وجود دارد که درگیر نیست و در واقع همین بخش است که به فعالیت آبی مربوط می‌شود. فعالیت آبی یکی از ویژگی‌های بسیار مهم مواد غذایی بوده که از نظر حفظ سلامت ماده غذایی، زمان نگهداری، طعم، ارزش غذایی و در نهایت جنبه‌های اقتصادی دارای اهمیت فوق العاده‌ای است. این شاخص به صورت نسبت فشار بخار آب محصول به فشار بخار آب خالص پس از رسیدن به حالت تعادل رطوبتی در همان درجه حرارت تعریف می‌شود. در فعالیت آبی پایین (کمتر از $0/6$)، اغلب به دلیل عدم سنتز آنزیم‌ها و پروتئین‌های کاربردی مهم، رشد و تکثیر بیشتر میکروارگانیسم‌ها متوقف می‌گردد [۳۹]. بنابراین کنترل فعالیت آبی روش بسیار موثری برای جلوگیری از تکثیر گونه‌های عامل فساد و بیماری در مواد غذایی می‌باشد. در پژوهش پیش‌رو، میزان رطوبت و فعالیت آبی میکروکپسول‌ها به ترتیب در محدوده $3/36$ تا $5/11$ درصد و $0/215$ تا $0/389$ قرار داشت که با توجه به مطالب مذکور در بالا، می‌توان ادعا کرد که محصولات تولیدشده در تحقیق حاضر از پایداری میکروبی استاندارد برخوردار هستند. لازم به ذکر است که دو شاخص مذکور در میکروکپسول‌های تولیدشده به صورت قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر نوع، ترکیب و جنس دیواره قرار داشتند. در پژوهشی که طی آن عصاره

ویسکوزیته سینماتیک از ویژگی‌های بسیار مهم فرآورده‌های غذایی است که بر بافت مایعات (صنعت نوشابه) و بر فرآیندهایی از قبیل پمپ‌کردن، اکستروژن و خشک‌کردن به صورت قابل توجهی موثر است [۴۶]. در این تحقیق ویسکوزیته محلول پروتئین هیدرولیزشده بسیار کم بود و این شاخص در محلول‌های حاوی میکروکپسول‌ها نسبت به محلول پروتئینی افزایش چشمگیری داشت اما در مجموع از میزان $3/41 \pm 0/09$ سانتی‌استوک (میکروکپسول‌های حامل با دیواره صمغ عربی در غلظت ۵ درصد) تجاوز نکرد. همین ویسکوزیته کم محصولات تولیدشده، امکان استفاده از آن‌ها را در فرمولاسیون فرآورده‌هایی که نیازمند مواد موثر با ویسکوزیته و خواص ژلی ضعیف مانند ماست و سوپ‌های آماده هستند میسر می‌سازد [۱۲]. لازم به ذکر است که در تحقیق پیش‌رو، ویسکوزیته سینماتیک پروتئین هیدرولیزشده و میکروکپسول‌های حامل آن تحت تاثیر غلظت قرار داشت و با افزایش غلظت، افزایش یافت. این یافته با پژوهش‌های Shokrpour Roodbari و همکاران (۲۰۱۵) و Alinejad و همکاران (۲۰۱۶) همخوانی دارد. البته علاوه بر غلظت، درجه هیدرولیز عامل موثر دیگری بر ویسکوزیته سینماتیک پروتئین‌های هیدرولیزشده می‌باشد که در این پژوهش مورد بررسی قرار نگرفت. محققین معتقدند که ویسکوزیته سینماتیک پروتئینی با درجه هیدرولیز کمتر، به دلیل بزرگتر بودن زنجیره‌های پپتیدی و احتمال در هم‌رفتگی و برهمکنش بیشتر پپتیدها و در نتیجه تشکیل ماتریکس قوی‌تر، بیشتر است. با افزایش درجه هیدرولیز پروتئین‌ها، طول و اندازه زنجیره پپتیدها کوچکتر شده و ویسکوزیته نیز کاهش می‌یابد [۴۴].

مهم‌ترین خاصیت عملکردی پروتئین‌های هیدرولیزشده که بر تمامی خواص عملکردی این محصول موثر است، حلالیت می‌باشد [۴۷]. برهمکنش‌های هیدروفوبی و یونی عامل اصلی موثر در حلالیت پروتئین‌ها هستند. برهمکنش هیدروفوبی، اتصال پروتئین- پروتئین را توسعه داده و در

قطرات درشت‌تر پاشیده‌شده به درون محفظه خشک‌کن و در نهایت تشکیل ذرات درشت‌تر می‌گردد. ضمن اینکه توانایی و قابلیت بالاتر صمغ عربی در تشکیل فیلم در اطراف ذرات و محبوس‌سازی حجم بیشتری از هوا به درون ذرات یکی دیگر از عوامل دخیل در این نتیجه است [۴۳]. در پژوهش انجام‌شده، دانسیته توده‌ای پروتئین هیدرولیزشده (با درجه هیدرولیز $15/63 \pm 0/49$ درصد) ۳۱۱ گرم بر لیتر اندازه‌گیری شد. در تحقیق Shokrpour Roodbari و همکاران (۲۰۱۵)، دانسیته توده‌ای پروتئین‌های هیدرولیزشده حاصل از گوشت کوسه چانه سفید^۱ با استفاده از آنزیم آلکالاز در سه درجه هیدرولیز ۱/۹۱، ۲/۲۵ و ۲/۵۳ درصد به ترتیب ۱۵۴/۷، ۱۹۹/۶۶ و ۲۵۴ گرم بر لیتر گزارش گردید [۴۴]. در پژوهش دیگری که گوشت همین کوسه با آنزیم آلکالاز به مدت ۱۲۰ دقیقه هیدرولیز و سپس مایع رویی به روش پاششی خشک شد، دانسیته توده‌ای معادل ۱۱۳/۴۶ گرم بر لیتر برای پروتئین هیدرولیزشده گزارش گردید [۴۲]. در پژوهش Sathivel و همکاران (۲۰۰۹) میزان دانسیته توده‌ای پروتئین هیدرولیزشده گربه ماهی که با خشک‌کن پاششی خشک شده بود، ۳۴۰ گرم بر لیتر عنوان شد [۴۵]. دانسیته توده‌ای پروتئین‌های هیدرولیزشده به عوامل مختلفی از جمله درجه هیدرولیز، نوع آنزیم یا روش هیدرولیز، روش خشک‌کردن، وزن مولکولی و ... بستگی دارد که در این بین درجه هیدرولیز و روش خشک‌کردن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. معمولاً با افزایش درجه هیدرولیز و در نتیجه کاهش وزن مولکولی، دانسیته توده‌ای پروتئین‌های هیدرولیزشده افزایش می‌یابد که دلیل این امر احتمالاً ایجاد ماده پودری با اندازه ذرات کوچکتر و لذا تشکیل تخلخل کمتر در محلول‌هایی با وزن مولکولی کوچک‌تر می‌باشد [۴۴]. همچنین خشک‌کردن انجمادی مایع رویی طی واکنش آبکافت، معمولاً منجر به تولید پودری با میزان تخلخل بالا و دانسیته توده‌ای کم می‌شود [۴۱].

نتیجه حلالیت را کاهش می‌دهد. در حالیکه برهمکنش یونی، اتصال پروتئین- آب را گسترش می‌دهد و موجب افزایش حلالیت پروتئین می‌شود. آبکافت آنزیمی پروتئین‌ها تا حد مشخص، به تدریج موجب شکستن پیوندهای پپتیدی، تشکیل پپتیدهای کوچک و متعاقبا افزایش حلالیت می‌شود. به علاوه باردار شدن و گروه‌های کربوکسیل اسیدهای آمینه، آبدوست بودن پروتئین‌های هیدرولیز شده را افزایش می‌دهند [۴۷ و ۴۸]. حلالیت پروتئین‌های هیدرولیز شده با توجه به نوع آنزیم مصرفی، درجه آبکافت، نسبت اسیدهای آمینه هیدروفیل به اسیدهای آمینه هیدروفوب و pH متغیر است. نوع آنزیم از طریق میزان درجه آبکافت و تولید پپتیدهایی با نسبت‌های متفاوت اسیدهای آمینه آبدوست و آبگریز می‌تواند بر این شاخص اثرگذار باشد. pH هم به دلیل تغییراتی که در میزان گروه‌های باردار در سطح پروتئین به وجود می‌آورد به شکل موثری بر ویژگی‌های جذب آب و متعاقبا حلالیت موثر است [۴۷ و ۴۹]. وقتی پروتئین‌های هیدرولیز شده با پوشش‌های مختلف ریزپوشانی می‌شوند، علاوه بر موارد فوق، عوامل دیگری نظیر ویژگی‌های سطحی، ریزساختار ذره، روش ریزپوشانی، شرایط خشک کردن (دمای مورد استفاده، سرعت جریان هوای ورودی، فشار و دور اتمایزر)، نوع خوراک (غلظت ماده جامد)، جنس دیواره و ... نیز بر انحلال پذیری اثرگذار می‌شوند [۱۲]. در پژوهش پیش رو، با میکروکپسوله کردن پروتئین هیدرولیز شده با سه نوع پوشش، حلالیت به صورت قابل توجهی افزایش یافت و حداکثر این شاخص مربوط به میکروکپسول‌های حامل دارای دیواره مالتودکسترین بود. Nadeem و همکاران (۲۰۱۱)، Wang و Zhou (۲۰۱۵) و Akbarbaglu همکاران (۲۰۲۰) که ترکیبات فعال را با استفاده از صمغ عربی و مالتودکسترین به روش خشک کردن پاششی ریزپوشانی کردند، مانند تحقیق حاضر حلالیت بیشتر میکروکپسول‌های دارای دیواره مالتودکسترین را در مقایسه با میکروکپسول‌های دارای دیواره صمغ عربی گزارش نمودند [۱۲، ۴۰ و ۵۰].

نتیجه حلالیت را کاهش می‌دهد. در حالیکه برهمکنش یونی، اتصال پروتئین- آب را گسترش می‌دهد و موجب افزایش حلالیت پروتئین می‌شود. آبکافت آنزیمی پروتئین‌ها تا حد مشخص، به تدریج موجب شکستن پیوندهای پپتیدی، تشکیل پپتیدهای کوچک و متعاقبا افزایش حلالیت می‌شود. به علاوه باردار شدن و گروه‌های کربوکسیل اسیدهای آمینه، آبدوست بودن پروتئین‌های هیدرولیز شده را افزایش می‌دهند [۴۷ و ۴۸]. حلالیت پروتئین‌های هیدرولیز شده با توجه به نوع آنزیم مصرفی، درجه آبکافت، نسبت اسیدهای آمینه هیدروفیل به اسیدهای آمینه هیدروفوب و pH متغیر است. نوع آنزیم از طریق میزان درجه آبکافت و تولید پپتیدهایی با نسبت‌های متفاوت اسیدهای آمینه آبدوست و آبگریز می‌تواند بر این شاخص اثرگذار باشد. pH هم به دلیل تغییراتی که در میزان گروه‌های باردار در سطح پروتئین به وجود می‌آورد به شکل موثری بر ویژگی‌های جذب آب و متعاقبا حلالیت موثر است [۴۷ و ۴۹]. وقتی پروتئین‌های هیدرولیز شده با پوشش‌های مختلف ریزپوشانی می‌شوند، علاوه بر موارد فوق، عوامل دیگری نظیر ویژگی‌های سطحی، ریزساختار ذره، روش ریزپوشانی، شرایط خشک کردن (دمای مورد استفاده، سرعت جریان هوای ورودی، فشار و دور اتمایزر)، نوع خوراک (غلظت ماده جامد)، جنس دیواره و ... نیز بر انحلال پذیری اثرگذار می‌شوند [۱۲]. در پژوهش پیش رو، با میکروکپسوله کردن پروتئین هیدرولیز شده با سه نوع پوشش، حلالیت به صورت قابل توجهی افزایش یافت و حداکثر این شاخص مربوط به میکروکپسول‌های حامل دارای دیواره مالتودکسترین بود. Nadeem و همکاران (۲۰۱۱)، Wang و Zhou (۲۰۱۵) و Akbarbaglu همکاران (۲۰۲۰) که ترکیبات فعال را با استفاده از صمغ عربی و مالتودکسترین به روش خشک کردن پاششی ریزپوشانی کردند، مانند تحقیق حاضر حلالیت بیشتر میکروکپسول‌های دارای دیواره مالتودکسترین را در مقایسه با میکروکپسول‌های دارای دیواره صمغ عربی گزارش نمودند [۱۲، ۴۰ و ۵۰].

۵- نتیجه گیری

با توجه به نتایج پژوهش حاضر، ریزپوشانی پروتئین‌های هیدرولیز شده با بهره‌گیری از روش خشک کردن پاششی و حامل‌هایی مبتنی بر مالتودکسترین و صمغ عربی، منجر به ارتقاء و بهبود قابل توجهی در طیف وسیعی از خصوصیات فیزیکوشیمیایی آن‌ها نظیر رطوبت، فعالیت آبی، ظرفیت

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تحت قرارداد با شماره ۰۶-۱۴۰۳-۰۳ انجام شد که به این وسیله سپاسگزاری می‌شود.

تأمین مالی

نویسنده اعلام می‌کند که هیچ بودجه‌ای دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

تمام فعالیت‌ها توسط نویسنده انجام شده است.

منافع رقابتی

نویسنده تأیید می‌کند که هیچ گونه تضاد منافع مالی یا منافع رقابتی در این مطالعه ندارد.

۶- منابع

- [1] Skanderby, M. Protein hydrolysates: their functionality and applications. *European Food Research and Technology*. 1994; 10(17), 141-152.
- [2] Elavarasan, K., Naveen Kumar, V., and Shamasundar, B. A. Antioxidant and functional properties of fish protein hydrolysates from fresh water carp (*Ctla Catla*) as influenced by the Nature of Enzyme. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2014; 38(3), 1207-1214.
- [3] Klompong, V., Benjakul, S., Kantachote, D., and Shahidi, F. Antioxidative activity and functional properties of protein hydrolysate of yellow stripe trevally (*Selaroides leptolepis*) as influenced by the degree of hydrolysis and enzyme type. *Food Chemistry*. 2007; 102(4), 1317-1327.
- [4] Nalinanon, S., Benjakul, S., Kishimura, H., and Shahidi, F. Functionalities and antioxidant properties of protein hydrolysates from the muscle of ornate threadfin bream treated with pepsin from skipjack tuna. *Food Chemistry*. 2011; 124(4), 1354-1362.
- [5] Safari, R., Motamedzadegan, A., Ovissipour, M., Regenstein, J. M., Gildberg, A., and Rasco, B. Use of hydrolysates from yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) heads as a complex nitrogen source for lactic acid bacteria. *Food and Bioprocess Technology*. 2012; 5, 73-79.
- [6] Kim, S. K., and Wijesekara, I. Development and biological activities of marine-derived bioactive peptides: A review. *Journal of Functional Foods*. 2010; 2(1), 1-9.
- [7] Harnedy, P. A., and FitzGerald, R. J. Bioactive peptides from marine processing waste and shellfish: A review. *Journal of Functional Foods*. 2012; 4(1), 6-24.

جذب رطوبت، قابلیت انحلال‌پذیری، دانسیته، فعالیت آبی و ویسکوزیته می‌گردد. لازم به ذکر است که این ویژگی‌های مذکور به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر ماهیت پوشش یا حامل (جنس دیواره) قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر، نمی‌توان ادعا نمود که میکروکپسول‌های دارای یک پوشش خاص در تمامی خواص فیزیکی و شیمیایی مطلوب‌ترین یا نامطلوب‌ترین عملکرد را از خود نشان می‌دهند. از این رو، انتخاب یک پوشش بهینه و متناسب، امری حیاتی و وابسته به هدف نهایی کاربرد میکروکپسول‌های حامل در فرمولاسیون‌های غذایی گوناگون محسوب می‌گردد. این انتخاب آگاهانه، امکان دستیابی به ویژگی‌های مطلوب و عملکرد بهینه میکروکپسول‌ها در محصول نهایی را تضمین می‌نماید.

تشکر و قدردانی

- [8] Segura-Campos, M., Chel-Guerrero, L., Betancur-Ancona, D., and Hernandez-Escalante, V. M. Bioavailability of bioactive peptides. *Food Reviews International*, 2011; 27(3), 213-226.
- [9] Reyhani Poul, S., and Yeganeh, S. Physicochemical and antioxidant properties of chitosan-coated nanoliposome loaded with bioactive peptides produced from shrimp wastes hydrolysis. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*. 2022; 21(4), 987-1003.
- [10] Hasani, Sh., Shahidi, M., and Ojagh, M. The production and evaluation of nanoliposomes containing bioactive peptides derived from fish wastes using the alkalase enzyme. *Research and Innovation in Food Science and Industry*. 2018; 8 (1), 31-44 [In Persian].
- [11] Safari, R., Raftani Amiri, Z., Reyhani Poul, S., and Ghaffari, H. Nanoencapsulation of phycocyanin extracted from the alga *Spirulina (Spirulina platensis)* and use of resulting nanoparticles in ice cream formulation. *Iranian Journal of Food Science and Technology*. 2022; 123(19), 145-159.
- [12] Akbarbaglu, Z., Kamali Shojaei, A., and Sarabandi, Kh. Effect of maltodextrin and gum Arabic carriers on the physicochemical properties and antioxidant activity of spray dried casein hydrolysates. *Journal of Food Sciences and Technology*. 2020; 107(17), 131-145
- [13] Yang, S., Mao, X. Y., Li, F. F., Zhang, D., Leng, X. J., Ren, F. Z., and Teng, G. X. The improving effect of spray-drying encapsulation process on the bitter taste and stability of whey protein hydrolysate. *European Food Research and Technology*. 2012; 235, 91-97.

- [14] Fávaro-Trindade, C. S., Santana, A. D. S., Monterrey-Quintero, E. S., Trindade, M. A., and Netto, F. M. The use of spray drying technology to reduce bitter taste of casein hydrolysate. *Food hydrocolloids*. 2010; 24(4), 336-340.
- [15] Sarabandi, K., Peighamardoust, S. H., Mahoonak, A. S., and Samaei, S. P. Effect of carrier types and compositions on the production yield, microstructure and physical characteristics of spray dried sour cherry juice concentrate. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2017; 11, 1602-1612.
- [16] Botrel, D. A., de Barros Fernandes, R. V., Borges, S. V., and Yoshida, M. I. Influence of wall matrix systems on the properties of spray-dried microparticles containing fish oil. *Food Research International*, 2014; 62, 344-352.
- [17] Kurozawa, L. E., Park, K. J., and Hubinger, M. D. Effect of maltodextrin and gum arabic on water sorption and glass transition temperature of spray dried chicken meat hydrolysate protein. *Journal of Food Engineering*, 2009; 91(2), 287-296.
- [18] Ovissipour, M. R., Kenari, A. A., Motamedzadegan, A., and Nazari, R. M. The study on the properties of the Yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) visceral protein hydrolysates using commercial enzymes. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 2010; 6 (1), 68-76.
- [19] Layne, E. [73] Spectrophotometric and turbidimetric methods for measuring proteins. *Methods in enzymology*, 1957; 3, 447-454.
- [20] Sarabandi, K., Mahoonak, A. S., Hamishekar, H., Ghorbani, M., and Jafari, S. M. Microencapsulation of casein hydrolysates: Physicochemical, antioxidant and microstructure properties. *Journal of Food Engineering*, 2018; 23(7), 86-95.
- [21] Liu, W., Ye, A., Liu, W., Liu, C., Han, J., and Singh, H. Behaviour of liposomes loaded with bovine serum albumin during in vitro digestion. *Food Chemistry*. 2015; 175, 16-24.
- [22] Sarabandi, K., Peighamardoust, S. H., Mahoonak, A. S., and Samaei, S. P. Effect of carrier types and compositions on the production yield, microstructure and physical characteristics of spray dried sour cherry juice concentrate. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2017; 11(1), 1602-1612.
- [23] Kinsella, J. E., and Melachouris, N. Functional properties of proteins in foods: a survey. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 1976; 7(3), 219-280.
- [24] Regenstein, J.M., Regenstein, C., Kochen B. Food protein chemistry: An introduction for food scientists. Academic press, 1984. 353 p
- [25] Cano-Chauca, M., Stringheta, P. C., Ramos, A. M., and Cal-Vidal, J. Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2005; 6(4), 420-428.
- [26] Cai, Y. Z., and Corke, H. Production and properties of spray-dried *Amaranthus betacyanin* pigments. *Journal of Food Science*, 2000; 65(7), 1248-1252.
- [27] Fathi, M., Martín, Á., and McClements, D. J. Nanoencapsulation of food ingredients using carbohydrate based delivery systems. *Trends in Food Science & Technology*. 2014; 39(1), 18-39.
- [28] Reyhani Poul, S., Yeganeh, S., and Raftani Amiri. Effect of Using astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* as Free Form and as a carrier nanocapsules in formulation of tomato paste and evaluating microbial and qualitative characteristics of the product during storage at refrigerator. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*. 2024; 20(1), 101-117.
- [29] Zhou, D., Pan, Y., Ye, J., Jia, J., Ma, J., and Ge, F. Preparation of walnut oil microcapsules employing soybean protein isolate and maltodextrin with enhanced oxidation stability of walnut oil. *LWT-Food Science and Technology*. 2017; 83, 292-297.
- [30] Matalanis, A., Jones, O. G., and McClements, D. J. Structured biopolymer-based delivery systems for encapsulation, protection, and release of lipophilic compounds. *Food Hydrocolloids*. 2011; 25(8), 1865-1880.
- [31] Mendanha, D. V., Ortiz, S. E. M., Favaro-Trindade, C. S., Mauri, A., Monterrey-Quintero, E. S., and Thomazini, M. Microencapsulation of casein hydrolysate by complex coacervation with SPI/pectin. *Food Research International*, 2009; 42(8), 1099-1104.
- [32] Mosquera, M., Giménez, B., da Silva, I. M., Boelter, J. F., Montero, P., Gómez-Guillén, M. C., and Brandelli, A. Nanoencapsulation of an active peptidic fraction from sea bream scales collagen. *Food Chemistry*, 2014; 156, 144-150.
- [33] Baygan, A., Safaeian, Sh., Shahinfar, R., and Khoshkhou, Zh. Encapsulation of essential oil of *ziziphoria clinopodioides* using maltodextrin and gum arabic by spray drying ethod. *Journal of Food Science and Technology*. 2022; 120(18), 263-281.
- [34] Mao, L., Xu, D., Yang, J., Yuan, F., Gao, Y., and Zhao, J. Effects of small and large molecule emulsifiers on the characteristics of β -carotene nanoemulsions prepared by high pressure homogenization. *Food Technology and Biotechnology*. 2009; 47(3), 336-342.
- [35] Mozafari, M. R., Flanagan, J., Matia-Merino, L., Awati, A., Omri, A., Suntres, Z. E., and Singh, H. Recent trends in the lipid-based nanoencapsulation of antioxidants and their role in foods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2006; 86(13), 2038-2045.
- [36] Maghsoudi, S., Esmailzadeh Kanari, R., and Farahmandfar, R. Effect of type and concentration of wall materials on Kilka Fish oil nano and

- microcapsules properties using xanthan and *Lepidium Sativum* Seeds gum. *Iranian Journal of Food Science and Technology*. 2019; 88(16), 109-121 [In Persian].
- [37] Ramezanzade, L., Hosseini, S. F., and Nikkhah, M. Biopolymer-coated nanoliposomes as carriers of rainbow trout skin-derived antioxidant peptides. *Food Chemistry*. 2017; 234, 220-229.
- [38] Shahidi Noghabi, M., and Molaveisi, M. Using arabic Gum, maltodextrin and inulin for wall compounds microencapsulation and rapid release of the bioactive compounds from cardamom essential oil in saliva. *Research and Innovation in Food Science and Technology*. 2020; 9(1), 57-72 [In Persian].
- [39] Quek, S. Y., Chok, N. K., and Swedlund, P. The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2007; 46(5), 386-392.
- [40] Nadeem, H. Ş., Torun, M., and Özdemir, F. (2011). Spray drying of the mountain tea (*Sideritis stricta*) water extract by using different hydrocolloid carriers. *LWT-Food Science and Technology*, 2011; 44(7), 1626-1635.
- [41] Carvalho-Silva, L. B. D. Physico-chemical properties of milk whey protein agglomerates for use in oral nutritional therapy. *Food and Nutrition Sciences*. 2013; 4(1), 69-78.
- [42] Alinejad, M., Motamedzadegan, A., and Rezaei, M. Functional properties and antioxidant activities of protein hydrolysates from white cheeck shark (*Carcharhinus dussumieri*) meat. *Journal of Food Science and Technology*. 2016; 50(13), 159-169 [In Persian].
- [43] Bazaria, B., and Kumar, P. Effect of whey protein concentrate as drying aid and drying parameters on physicochemical and functional properties of spray dried beetroot juice concentrate. *Food Bioscience*. 2016; 14, 21-27.
- [44] Shokrpour Roodbari, R., Motamedzadegan, A., Hosseiniparvar, H., and Ovissipour, M. Study of functional properties of protein hydrolysate from White cheeck shark (*Carcharhinus dussumieri*) meat. *Research and Innovation in Food Science and Technology*. 2015; 5(1), 27-38 [In Persian].
- [45] Sathivel, S., Yin, H., Bechtel, P.J., and King, M.J. Physical and nutritional properties of catfish roe spray dried protein powder and its application in an emulsion system. *Journal of Food Engineering*, 2009; 9(5), 76-81.
- [46] Yu, J., Ahmedna, M., and Goktepe, I. Peanut protein concentrate: Production and functional properties as affected by processing. *Food Chemistry*. 2007; 103(1), 121-129.
- [47] Reyhani Poul, S., Jafarpour, A., and Safari, R. Evaluation of oil fatty acid profile, functional properties and antioxidants activity of hydrolyzate produced from rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) viscera by application of protamex and neutrase enzymes. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*. 2018; 14(1), 162-176 [In Persian].
- [48] Gauthier, S. F., Paquin, P., Pouliot, Y., and Turgeon, S. Surface activity and related functional properties of peptides obtained from whey proteins. *Journal of Dairy Science*, 1993; 76(1), 321-328.
- [49] Chobert, J. M., Bertrand-Harb, C., and Nicolas, M. G. Solubility and emulsifying properties of caseins and whey proteins modified enzymically by trypsin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1988; 36(5), 883-892.
- [50] Wang, W., and Zhou, W. Characterisation of spray dried soy sauce powders made by adding crystalline carbohydrates to drying carrier. *Food Chemistry*. 2015; 168, 417-422.
- [51] Reyhani Poul, S., and Jafarpour, S. A. Effect of edible active film of chitosan containing fish protein hydrolysate (FPH) on chemical and microbial properties of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets during the refrigerated storage. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 16(4), 2020; 493-505.
- [52] Kurozawa, L. E., Park, K. J., and Hubinger, M. D. Effect of carrier agents on the physicochemical properties of a spray dried chicken meat protein hydrolysate. *Journal of Food Engineering*, 2009; 94(3-4), 326-333.



Scientific Research

Encapsulation of hydrolyzed protein of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) waste using maltodextrin and gum arabic, and evaluating the physicochemical properties of the resulting microcapsules

Mina Esmaeili^{1*}, Soheyl Reyhani Poul², Sakineh Yeganeh¹

1- Department of Fisheries, Faculty of Animal Sciences and Fisheries, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

2- PhD graduate, Department of Processing of Fishery Products, Faculty of Fisheries and Environment, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 2025/03/26

Review: 2025/10/19

Accepted: 2025/10/20

Keywords:

Hydrolyzed proteins,
Microencapsulation,
Gum Arabic,
Spray drying,
Bulk density,
Water activity

DOI: 10.48311/fsct.2026.84014.0

*Corresponding Author E-

M.esmaeili@sanru.ac.ir;
mina.smaily@gmail.com

The use of protective techniques such as encapsulation is essential to increase the efficiency of hydrolyzed proteins in the food and pharmaceutical industries. In this research, hydrolyzed protein from the viscera of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) was microencapsulated using three types of coatings (maltodextrin, gum arabic and maltodextrin/gum arabic in equal ratio) by the spray drying method, and the characteristics of the produced microcapsules were evaluated. The results showed that microcapsules with maltodextrin wall had the smallest particle size ($4.96 \pm 0.1 \mu\text{m}$), while samples with gum arabic wall showed the highest microencapsulation efficiency ($92.76 \pm 1.88\%$) ($p < 0.05$). Microencapsulation reduced the water activity, and the lowest amount (0.215 ± 0.01) was observed in microcapsules with maltodextrin wall ($p < 0.05$). Also, with microencapsulation, bulk density decreased and its lowest value was observed in microcapsules with gum arabic wall ($0.135 \pm 0.01 \text{ g/ml}$) ($p < 0.05$). The kinematic viscosity of microcapsules with maltodextrin wall and composite wall showed no significant difference at all investigated concentrations ($p > 0.05$), and the highest viscosity was recorded in microcapsules with gum arabic wall ($p < 0.05$). Microencapsulation of the hydrolyzed protein increased solubility and decreased hygroscopicity ($p < 0.05$). The highest levels of these two indices ($98.62 \pm 1.18\%$ and $30.17 \pm 0.95\%$, respectively) were observed in microcapsules with maltodextrin wall ($p < 0.05$). This research showed that microencapsulation of hydrolyzed proteins using the spray drying method and carriers based on maltodextrin and gum arabic improves some of their physicochemical properties, and the effect of the carrier type on these properties is significant.