مقاله پژوهشی
نشریه علوم آبزی پروری

Research Article
www.aquaculturesciences.ir

تولید و ارزیابی میکروکپسول‌های حاوی امگا-۳ جهت غنی‌سازی سس گوجه‌فرنگی

هانیه رستم‌زاد*، آریا باباخانی، زینب فکوری، محدثه اسمعیل‌زاده

گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه سرا، ایران.
*نویسنده مسئول hrostamzad@guilan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۵/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۹

چکیده

استفاده از روغن امگا-۳ در رژیم غذایی دارای فواید بسیاری برای سلامتی انسان‌ها می‌باشد اما به‌دلیل طعم و بوی نامطلوب جهت استفاده از آن در غنی‌سازی مواد غذایی مختلف ابتدا باید از انتشار بو و طعم آن جلوگیری کرد. بدین‌منظور، ریزپوشانی روشی مطلوب و کاربردی می‌باشد. از سویی دیگر سس گوجه فرنگی از چاشنی‌هایی است که موارد مصرف زیادی دارد و غنی‌سازی آن توسط امگا-۳ می‌تواند سبب بهبود ارزش تغذیه‌ای این ماده غذایی پرمصرف شود. بنابراین در تحقیق حاضر، ابتدا اقدام به تولید میکروکپسول‌های حاوی امگا-۳ حاصل از روغن ماهی شد و با توجه به نوع کاربری میکروکپسول‌ها از دیواره ترکیبی ژلاتین-صمغ عربی استفاده شد. جهت دستیابی به بهترین نسبت هسته به دیواره میکروکپسول‌ها، سه تیمار ۵، ۶ و ۷ درصد مورد ارزیابی قرار گرفتند. آزمون‌های روغن سطحی، روغن انکپسوله، روغن کل، پایداری، کرمی شدن، رهایش و برآورد اندازه روی میکروکپسول‌های تهیه شده صورت گرفت. طبق آزمون‌های انجام شده روی میکروکپسول‌های تولیدشده، نتایج نشان داد که بالاترین بازدهی ریزپوشانی در تیمار ۶ درصد (هسته به دیواره میکروکپسول‌ها) مشاهده شد و این تیمار از لحاظ میزان روغن سطحی و همچنین رهایش کنترل‌شده کم‌ترین مقدار را داشت ($P\leq$۰/۰۵). بنابراین با توجه به نتایج آزمون‌های انجام شده، تیمار ۶ درصد برای غنی‌سازی سس گوجه‌فرنگی انتخاب شد و در مرحله بعد غنی‌سازی سس گوجه‌فرنگی با غلظت‌های مختلف (۰/۵، ۱، ۱/۵و ۲ درصد) میکروکپسول‌ها انجام شد. سپس آزمون‌های چربی کل و ارزیابی حسی جهت بررسی پذیرش سس غنی شده انجام گرفت. با توجه به نتایج ارزیابی‌های انجام شده، غنی‌سازی سس گوجه‌فرنگی با میکروکپسول‌های حاوی امگا-۳ تا غلظت ۱/۵ درصد مطلوب بوده و سس تولیدی از ویژگی‌های حسی خوب و قابل قبولی برخوردار بوده است ($P\leq$۰/۰۵). از این‌رو استفاده از میکروکپسول‌های تولیدی در تهیه سس گوجه‌فرنگی جهت غنی‌سازی و بهبود ارزش غذایی آن پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: اکسیداسیون، امگا-۳، ریزپوشانی، غنی‌سازی.

مقدمه

در سال‌های اخیر تکنولوژی‌هایی در عرصه صنایع غذایی گسترش یافته اند، که منجر به ایجاد محصولاتی با کیفیت و مدت نگهداری بالا شده است. از جمله این تکنولوژی‌ها، ریزپوشانی می‌باشد (Bakry *et al.*, 2016). ریزپوشانی نوعی تکنولوژی برای به دام انداختن ترکیبات غذایی، آنزیمی در غشایی از جنس مواد غذایی مجاز درون کپسول‌های کوچک می‌باشد که محتویات خود را تحت سرعت کنترل شده، با یک تحریک خاص و در یک زمان مشخص رها می‌سازند. این تکنولوژی از اکسیداسیون مواد در مدت تولید و نگه‌داری و ایجاد بو و طعم نامطلوب جلوگیری کرده و مانع از دست رفتن ارزش تغذیه‌ای و متابولیکی آن می‌شود. در این تکنیک انواع طعم‌ها، اسانس‌ها، روغن‌ها، آنزیم‌ها و میکروارگانیسم‌ها می‌توانند با استفاده از پلیمرهای زیستی مانند کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها، چربی‌ها پوشش داده شوند (Bakry *et al.*, 2016). از جمله مواد تشکیل‌دهنده دیواره، می‌توان به چربی‌ها، کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و پلیمرهایی که در صنعت غذا تائید شده‌اند، اشاره نمود. کربوهیدرات‌ها به‌دلیل دارا بودن خصوصیات فیزیکوشیمیایی مطلوب از جمله حلالیت و ذوب شدن، اندازه‌های مختلف و قیمت پایین بهترین انتخاب جهت کاربردهای ریزپوشانی هستند. برای

مثال مالتودکسترین و شربت گلوکز دارای مقاومت بالایی در برابر اکسیداسیون هستند اما نمی‌توانند به خوبی از مواد فرار حفاظت کنند (Malleswari *et al.*, 2016). از جمله مواد تشکیل دهنده هسته می‌توان به روغن‌ها، مواد ضدمیکروبی، ویتامین‌ها، مواد معدنی، آنتی‌اکسیدان‌ها، رنگ‌ها، بافرهای شیرین‌کننده، موادمغذی، آنزیم‌ها، اسیدها، مخمرها اشاره نمود. انتخاب پوشش‌ها و دیواره‌ها می‌تواند بسیار با اهمیت باشد؛ زیرا باید سامانه‌های پایداری (از نظر فازی) را تولید کنند و نیز بتوانند ماده زیست‌فعال مورد نظر را با بالاترین بازدهی، پوشش دهند و در شرایطی مثل آنچه در معده حاکم است، مانع از گسیختگی و تخریب کامل دیواره شوند تا جزء مورد نظر در روده کوچک بتواند رهایش یابد و جذب شود. باید اشاره کرد که ترکیبات زیست‌فعال می‌توانند به‌صورت ترکیبات پایدار شده در نوشیدنی‌ها (با دیواره‌ها و امولسیون کننده‌ها) و یا به‌صورت پودر، ریزپوشانی شوند و با روش‌های خشک کردن انجمادی یا پاششی در مواد غذایی هدف بکار روند (Bakry *et al.*, 2016). از مزایای ریزپوشانی می‌توان به حفاظت مواد حساس و ناپایدار در برابر شرایط محیطی و جلوگیری از فراریت طی دوران انبارداری، بهتر شدن قابلیت فرایند (بهبود حلالیت، جریان‌پذیری و پخش‌پذیری)، مقاومت در برابر واکنش‌های مخرب همچون اکسیداسیون، دهیدراسیون، بررسی آسان و بدون خطر مواد سمی، حفاظت طعم یا مزه، تثبیت (در خصوص آنزیم و برخی از میکروارگانیسم)، رهایش کنترل شده و هدف‌دار داروها، جابه‌جایی مواد مایع به‌صورت جامد، کاربرد آسان و استحکام محصول در حین و بعد از تولید اشاره نمود (Malleswari *et al.*, 2016). روغن ماهی منبع اصلی اسیدهای چرب امگا-۳ است که بر سلامت انسان تأثیر می‌گذارد و امروزه افزایش مصرف اسیدهای چرب امگا-۳ توصیه می‌شود (Kolanowski *et al.*, 2006). اسیدهای چرب امگا-۳ به‌دلیل داشتن مواد مغذی برای سلامتی ضروری هستند و از آن‌جا که بدن انسان نمی‌تواند آن‌ها را تولید کند، استفاده از آن‌ها در رژیم غذایی ضروری است.

غنی‌سازی محصولات غذایی با امگا-۳ به‌طور قابل ملاحظه‌ای سطح و عملکرد PUFA را در رژیم غذایی و بافت‌های انسانی بهبود می‌بخشد؛ با این‌حال، به‌دلیل حساسیت بالای روغن ماهی نسبت به اکسیداسیون، مواد غذایی غنی‌شده را نمی توان برای مدت طولانی نگهداری کرد، مگراینکه شرایط ویژه نگهداری مانند از بین بردن کلیه عوامل تقویت کننده اکسیداسیون اسیدهای چرب چند-زنجیره‌ای اشباع نشده (PUFA) به‌ویژه دسترسی به هوا لحاظ شده باشد؛ در غیر این صورت، امگا-۳ ممکن است به‌راحتی به پراکسیدهای سمی و سایر فرآورده‌های جانبی اکسیداسیون روغن که منجر به تهدید سلامتی انسان می‌شود، تبدیل شود (Kolanowski *et al.*, 2006). بنابراین برای به‌دست آوردن حداکثر فواید سلامتی و به حداقل رساندن یا جلوگیری از فرایند اکسیداسیون، معمولاً دو فرآیند انجام می‌شود: افزودن یک آنتی‌اکسیدان به روغن‌ها و فرآیند ریزپوشانی (Hamed *et al.*, 2022).

غنی‌سازی مواد غذایی باPUFA به‌دلیل حلالیت کم در آب، تمایل آن‌ها به اکسید شدن سریع و فراهمی زیستی متغیر آن‌ها چالش برانگیز است (Kagami *et al.*, 2003). این چالش‌ها را می‌توان با استفاده از فناوری‌های کپسوله‌سازی پیشرفته، که معمولاً شامل ترکیب روغن‌های امگا-۳ در ذرات کلوئیدی با طراحی خوب ساخته شده از مواد غذایی، مانند لیپوزیم‌ها، قطرات امولسیون، حامل‌های لیپید نانوساختار، یا میکرو ژل‌ها است، برطرف کرد. این پراکندگی‌های کلوئیدی غنی شده با امگا-۳ را می‌توان به‌صورت مایع استفاده کرد یا می‌توان آن‌ها را به شکل پودری تبدیل کرد که حمل و نگه‌داری آن‌ها را تسهیل نموده و موجب افزایش عمرمفید آن‌ها می‌شود (Kallladathvalappil *et al.*, 2021).

با توجه به مطالب فوق و ارزش بالای امگا-۳ در سلامتی انسان‌ها و همچنین به‌دلیل مصرف بالای

سس گوجه‌فرنگی توسط اقشار جامعه خصوصاً کودکان و نوجوانان، در تحقیق حاضر تولید سس گوجه‌فرنگی فراسودمند با استفاده از امگا-۳ ریزپوشانی شده، صورت گرفت. بدین‌منظور، ابتدا تیمارهای مختلف ریزکپسول‌ها تهیه شده و پس از انجام آنالیزهای مربوطه از بهترین تیمار ریزکپسول‌های تولیدی جهت غنی‌سازی سس گوجه‌فرنگی استفاده شد.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در دو مرحله اصلی انجام شد:

۱- در مرحله اول اقدام به تولید امولسیون حاوی امگا-۳ (سیگما) با دیواره ترکیبی ژلاتین (سیگما)-صمغ عربی (اولین (Olin)-شانکسی، چین) شد. جهت دستیابی به بهترین ریزکپسول، درصدهای مختلف (۵، ۶ و ۷) هسته (امگا-۳) به دیواره (ژلاتین-صمغ عربی) مورد بررسی قرار گرفت.

- بررسی ویژگی‌های امولسیون‌های تولیدی مانند: پایداری، کرمی شدن و اندازه‌گیری ذرات امولسیون
- خشک کردن انجمادی امولسیون‌ها و تولید پودر
- بررسی کیفیت پودرهای تولید شده مانند: اندازه‌گیری روغن سطحی ریزکپسول‌ها، روغن کپسوله شده، بازدهی ریزپوشانی، رهایش کنترل‌شده و نگهداری مواد هسته
- تعیین بهترین تیمار پودرهای تولید شده جهت افزودن به سس گوجه‌فرنگی

۲- در مرحله دوم پس از بررسی ویژگی‌های ریزکپسول‌های تولیدی، بهترین تیمار انتخاب شد و از آن جهت غنی‌سازی سس گوجه‌فرنگی استفاده شد. در این مرحله از ۴ غلظت مختلف (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲) ریزکپسول ها در غنی‌سازی سس استفاده شد و آزمون‌های لازم روی آن‌ها اعمال شد تا بهترین غلظت غنی‌سازی مشخص گردد.

۱) مرحله اول: تولید ریزکپسول‌های حاوی امگا-۳:

آماده‌سازی میکروکپسول‌های حاوی امگا-۳ بر اساس روش Tamjidi و همکاران (۲۰۱۳)، انجام شد. در ابتدای کار محلول ۱۰ درصدی ژلاتین-آب (وزنی/وزنی) و همچنین محلول ۲ درصدی صمغ عربی-آب (وزنی/وزنی) تولید شد. سپس ۹۳/۷ گرم از محلول ۱۰ درصد ژلاتین به دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد رسانده شد؛ درصدهای مختلفی از امگا-۳ در محلول ژلاتین به مدت ۵ دقیقه با دور ۳۰۰۰ مخلوط گردید؛ سپس محلول صمغ عربی به امولسیون اضافه شد. pH محلول را توسط محلول ۵۰ درصد اسید استیک به ۴ رسانده، سپس با دور ۶۰۰ rpm به‌مدت ۱۵ دقیقه تا رسیدن به دمای اتاق هم‌زده شد.

آنالیز ویژگی‌های امولسیون‌های تولید شده

بررسی پایداری امولسیون و کرمی شدن:

جهت اندازه‌گیری شاخص پایداری و کرمی شدن در امولسیون‌ها، تغییرات فازی در امولسیون‌هایی که در لوله‌های آزمایش نگهداری می‌شدند، مورد بررسی قرار گرفت. پس از ساخت امولسیون در مرحله قبل، ۱۵ میلی‌لیتر امولسیون در لوله های آزمایش با ارتفاع ۱۶ سانتی‌متر و قطر داخلی ۱/۵ سانتی‌متر ریخته شد، درب لوله‌ها کاملاً با فویل آلومینیوم بسته شد و در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. شاخص پایداری و کرمی شدن امولسیون‌های تولیدی در زمان صفر و روزهای ۲، ۷ و ۲۰ پس از نگهداری محاسبه شد. در طول نگهداری به مدت ۲۰ روز، مشاهده شد که امولسیون‌ها به سه قسمت شامل یک لایه بالایی کدر، لایه میانی و لایه‌ای شفاف در پایین لوله آزمایش تفکیک شدند. مجموعه ارتفاع لایه کدر بالایی و لایه شفاف پایینی اصطلاحاً لایه سرم نامیده می‌شود و با داشتن ارتفاع کل امولسیون اولیه، به‌کمک روابط ۱ و ۲ می‌توان شاخص پایداری کرمی شدن امولسیون‌ها را محاسبه کرد (Huang *et al.*, 2001; Lea *et al.*, 2012).

رابطه ۱

$$\text{پایداری امولسیون (٪)} = \frac{\text{ارتفاع امولسیون باقی مانده}}{\text{ارتفاع امولسیون اولیه}} \times ۱۰۰$$

رابطه ۲

$$\text{شاخص کرمی شدن (٪)} = \frac{\text{ارتفاع لایه سرمی}}{\text{ارتفاع کل امولسیون}} \times ۱۰۰$$

بررسی اندازه ذرات امولسیون

اندازه ذرات امولسیون با استفاده از دستگاه پراکندگی نور دینامیک (DLS) (مدل Zetasizer Series Nano، شرکت Malvern، ساخت آمریکا) برآورد شد (Garcia-Moreno et al., 2016).

تولید پودر از امولسیون‌ها: در این مرحله از روش خشک کردن انجمادی برای خشک کردن امولسیون‌ها و تبدیل آن‌ها به پودر استفاده شد. بدین‌منظور، مخلوط به‌دست‌آمده در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد منجمد شده و در دستگاه فریز درایر با فشار ۰/۸ mbar خشک گردیدند. فرآیند خشک شدن امولسیون‌های منجمد در خشک‌کن انجمادی، ۴۸ ساعت به طول انجامید. توده‌های اسفنجی حاصل با استفاده از دستگاه خردکن به پودر یکنواختی تبدیل شدند (شعبانپور و همکاران، ۱۳۹۶). امولسیون‌ها پس از خشک شدن جمع‌آوری شده و سپس در ظروف پلاستیکی تیره و کاملاً دربسته نگهداری شدند. به‌منظور بررسی کیفیت پودرهای تولید شده؛ بازدهی ریزپوشانی، رطوبت پودرها، چگالی حجمی (Bulk Density) و زمان جذب آب کامل پودرها اندازه‌گیری شدند.

آزمون‌های مربوط به پودرهای تولید شده

اندازه‌گیری روغن سطحی ریزکپسول‌ها

ابتدا ۲/۵ گرم پودر با ۱۵ میلی‌لیتر هگزان به مدت ۲ دقیقه همزده شدند، سپس به مدت ۲۰ دقیقه در سرعت ۴۰۰۰ rpm سانتریفیوژ شدند. مایع رویی از کاغذ صافی عبور داده شد و سپس کاغذ صافی دو بار با هگزان شسته شد تا تمامی مایع چسبیده به کاغذ شسته و جدا شود. به‌منظور تبخیر کامل حلال، محلول فیلتر شده حاوی روغن سطحی، در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت قرار داده شد و میزان روغن سطحی بر اساس درصد از چربی کل پودرها (رابطه ۳) محاسبه گردید. (Hardas *et al.*, 2000).

رابطه ۳

$$\text{روغن سطحی} = \frac{\text{روغن بدست آمده پس از تبخیر حلال}}{\text{روغن کل پودر مورد آزمون}} \times ۱۰۰$$

اندازه‌گیری روغن‌کپسوله شده (Encapsulated oil): پودر عاری از چربی سطحی که در مرحله قبلی به‌دست آمد، با ۲ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط و به‌مدت ۱ دقیقه همزده شد. محلول حاصل با ۲۵ میلی‌لیتر از هگزان/ ایزوپروپانول (۱:۳) مواجهه داده شد و به مدت ۲۰ دقیقه در ۴۰۰۰ rpm سانتریفیوژ گردید. فاز آلی شفاف جمع‌آوری گردید و فاز آبی مجدداً با مخلوط حلال مواجهه داده شد. در نهایت فازهای آلی جمع‌آوری شده که حاوی روغن کپسوله شده بودند، در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تبخیر و روغن باقی‌مانده پس از توزین محاسبه گردید (Hardas *et al.*, 2000; Shu *et al.*, 2006).

بررسی بازدهی ریزپوشانی: بازدهی ریزپوشانی ریزکپسول‌ها با استفاده از مقادیر به‌دست آمده از دو آزمون فوق و بر اساس رابطه ۴ محاسبه گردید (Hardas *et al.*, 2000; Shu *et al.*, 2006).

رابطه ۴

$$\text{بازدهی روغن ریزپوشانی} = \frac{\text{روغن کپسوله شده}}{\text{روغن کل}} \times ۱۰۰$$

اندازه‌گیری رهایش کنترل‌شده و نگهداری مواد هسته: ۰/۱گرم از هر یک از ریزکپسول‌ها به لوله‌های آزمایش حاوی ۲ میلی‌لیتر محلول پپسین (۲mg/ml و pH=۲) اضافه شد. سوسپانسیون حاصل در حمام آبی ۳۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت قرار داده شد. نمونه‌ها از هر لوله آزمایش با فواصل زمانی۱ تا ۴ ساعت روی کاغذ صافی واتمن ریخته و خشک گردید. مقدار روغن رها شده طبق رابطه ۵ اندازه‌گیری شد (Drush and Berg, 2008).

رابطه ۵

$$\text{درصد رهایش} = \frac{\text{(روغن رها شده از میکروکپسول)}}{\text{(روغن نگهداری شده در های میکروکپسول خشک)}} \times ۱۰۰$$

مرحله دوم: افزودن ریزکپسول‌های تولید شده به سس گوجه‌فرنگی: سس گوجه‌فرنگی تجاری مربوط به یک مرحله ساخت به میزان ۵ کیلوگرم از یکی از

کارخانه‌های معتبر داخلی خریداری و مورد استفاده قرار گرفت. ریزکپسول‌ها با غلظت‌های مختلف (۰/۵، ۱، ۱/۵و ۲ درصد وزنی/وزنی) به سس اضافه گردید. نمونه‌ها به‌مدت ۱۰ دقیقه در دمای اتاق هم‌زده شد؛ سپس در ظروف شیشه‌ای ۲۵۰ گرمی بسته‌بندی شدند. آنالیزهایی که روی سس‌های حاوی ریزکپسول‌ها انجام گرفت، در زیر ارائه شده است:

اندازه‌گیری چربی کل: ۵ گرم از نمونه یکنواخت‌شده به‌مدت یک ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. سپس به‌منظور سرد شدن در دسیکاتور قرار داده شد. ۲ گرم از نمونه خشک شده را در کاغذ صافی پیچیده و کاغذ لوله شده در کارتوش قرار داده شد. کارتوش را در سیفون دستگاه سوکسله قرار داده و به مقدار دو برابر حجم سیفون دستگاه، اتر در بالن ریخته و با روشن کردن اجاق به‌مدت ۸-۶ ساعت چربی استخراج گردید. در آخرین مرحله استخراج اتر اضافی را خارج و اتر محتوی چربی در بالن سوکسله را به بشر ۱۰۰ میلی‌لیتری که قبلاً به وزن ثابت رسیده منتقل و بالن را با ۱۰ سی‌سی اتر مجدداً شسته و در بشر خالی شد. با قرار دادن بشر روی حمام بخار، اتر اضافی آن تبخیر شد. پس از قرار دادن بشر به‌مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد آن را در دسیکاتور گذاشته تا سرد شوند سپس درصد چربی را با استفاده از رابطه ۶ زیر محاسبه گردید.

رابطه ۶

$$۱۰۰ \times \frac{(\text{وزن بشر خالی} - \text{وزن بشر با چربی})}{\text{وزن نمونه}} = \text{گرم درصد چربی}$$

آنالیز حسی سس‌های حاوی ریزکپسول: سس‌های غنی شده با درصدهای مختلف ریزکپسول‌های حاوی امگا-۳ توسط ۱۲ ارزیاب آموزش دیده مورد بررسی حسی قرار گرفتند. جهت انجام ارزیابی حسی، نمونه‌های سس گوجه‌فرنگی کدگذاری شده و در اختیار ارزیاب‌ها قرار گرفت. نمونه‌ها از نظر رنگ، بو، طعم، بافت و پذیرش کلی ارزیابی شدند. در حین ارزیابی، از افراد خواسته شد، پس از خوردن هر نمونه دهان خود را با آب شست و شو دهند. برای ارزیابی حسی از روش هدونیک ۵ امتیازی استفاده گردید که در این روش امتیاز ۵ به نمونه عالی و امتیاز ۱ به نمونه خیلی بد تعلق می‌گیرد. آنالیز حسی نمونه‌ها در دو گروه انجام شد. در یک گروه سس‌ها به‌تنهایی مورد ارزیابی قرار گرفتند و در گروه دوم ارزیاب‌ها سس گوجه‌فرنگی غنی‌شده را با سیب‌زمینی سرخ کرده مورد ارزیابی قرار دادند (Amini *et al*., 2009; Panovska *et al*., 2019).

تجزیه و تحلیل آماری: تجزیه و تحلیل آماری نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های مختلف با استفاده از روش واریانس یک‌طرفه (One-way ANOVA) در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ انجام شد. مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۵٪ انجام گرفت. به‌منظور کاهش خطا، کلیه آزمون‌ها در ۳ تکرار انجام شد و نمودارها در نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۹ رسم گردید.

نتایج

نتایج آزمون پایداری و کرمی شدن: نتایج اندازه‌گیری پایداری ریزکپسول‌های تولیدی در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج نشان داد که در بین تیمارهای مورد بررسی، بهترین پایداری مربوط به تیمار ۵ درصد (هسته به دیواره) است. به‌طوری‌که در روز صفر بیش‌ترین پایداری امولسیون در تیمار ۵ درصد، ۹۸/۰۲ درصد اندازه‌گیری شد که در پایان روز بیستم میزان پایداری به ۹۳/۳۳ درصد رسید ($P\leq۰/۰۵$). کم‌ترین پایداری مربوط به تیمار ۷ درصد بود که در روز صفر میزان پایداری برابر با ۹۰ درصد بوده و در روز بیستم به ۸۳/۷۰ درصد کاهش یافت ($P\leq۰/۰۵$). همان‌طور که در روش کار عنوان شد، در تحقیق حاضر، پایداری امولسیون‌های تولیدی به‌کمک شاخص کرمی شدن نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شاخص کرمی شدن در تیمارهای مورد بررسی بسیار پایین (نزدیک به صفر درصد) بوده و این نشان‌دهنده پایداری خوب امولسیون‌های تولیدی می‌باشد.

جدول ۱- اندازه‌گیری میزان پایداری میکروکپسول‌های تولیدی با درصدهای مختلف هسته به دیواره (۵، ۶ و ۷).

روزهای نگهداری / درصد هسته به دیواره	روز صفر	روز دوم	روز هفتم	روز بیستم
۵	۹۸/۰±۰۲/۳۲ ^{Aa}	۹۷/۰±۳۳/۵۸ ^{Aa}	۹۵/۰±۶۷/۵۸ ^{Ab}	۹۳/۰±۳۳/۵۸ ^{Ac}
۶	۹۲/۰±۳۱/۶۸ ^{Ba}	۹۰/۱±۸۴/۴۷ ^{Ba}	۸۷/۱±۷۱/۸۸ ^{Bb}	۸۵/۲±۹۷/۷۰ ^{Bc}
۷	۹۰/۰۰±۰/۷۲ ^{Ca}	۸۸/۱±۷۶/۵۷ ^{Ca}	۸۵/۱±۹۱/۵۴ ^{Cb}	۸۳/۱±۷۰/۷۰ ^{Cc}

* داده‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در سطح احتمال ۵٪ فاقد تفاوت معنی‌دار باهم می باشند (*P*>۰/۰۵).

*حروف بزرگ متفاوت در ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در تیمارها می‌باشد.

*حروف کوچک متفاوت در سطرها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در روزهای صفر، ۲، ۷ و ۲۰ می‌باشد.

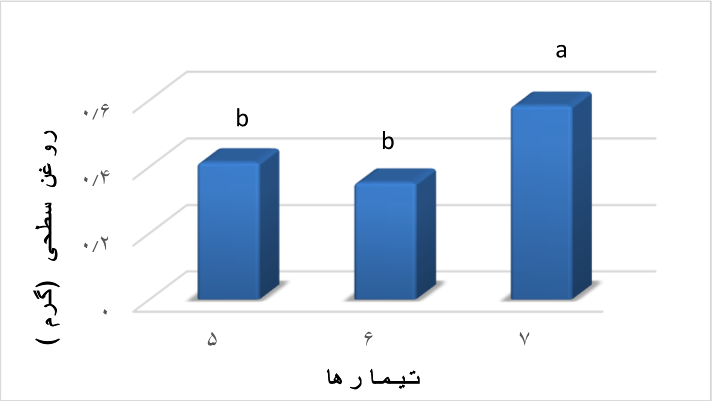
نتایج آزمون روغن سطحی: نتایج اندازه‌گیری روغن سطحی در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج حاصل از بررسی روغن سطحی ریزکپسول‌ها نشان داد که، تغییرات درصد امگا-۳ به دیواره تأثیر زیادی بر میزان روغن سطحی پودرهای تولیدی داشته است (*P*≤۰/۰۵). بر اساس نتایج، میزان روغن سطحی پودرهای تولیدی بین ۰/۳۶ تا ۰/۵۹ درصد در تیمارهای مختلف متفاوت است. با افزایش درصد روغن (تیمار ۷ درصد)، میزان روغن سطحی نیز افزایش یافت (*P*≤۰/۰۵) اما در تیمار ۵ و ۶ درصد اختلاف معنی‌دار آماری مشاهده نشد (*P*≥۰/۰۵).

نتایج آزمون روغن کپسوله شده: نتایج حاصل از آزمون اندازه‌گیری روغن کپسوله شده (شکل ۲) نشان‌دهنده آن است که میزان روغن کپسوله شده پودرهای تولیدی بین ۰/۲۹ تا ۰/۴۷گرم در تیمارهای مختلف، متفاوت است. تغییرات درصد امگا-۳ بر میزان روغن کپسوله‌شده پودرهای تولیدی تأثیر داشته است، به‌طوری‌که افزایش درصد امگا-۳ (۷٪)، بر میزان تغییرات روغن کپسوله‌شده در سطح احتمال ۹۵٪ معنی‌دار بوده است (*P*≤۰/۰۵). اما در تیمارهای حاوی ۵ و ۶ درصد امگا-۳ اختلاف معنی‌دار آماری مشاهده نشد (*P*≥۰/۰۵).

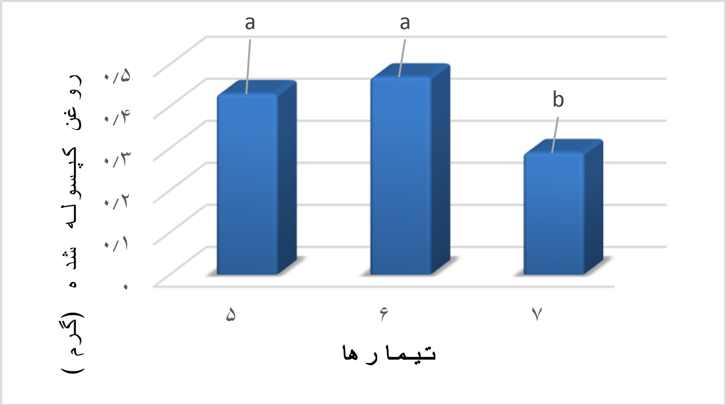
نتایج آزمون روغن کل: مقادیر روغن کل در شکل ۳ نشان داده شده است. میزان روغن کل در تیمارهای اندازه‌گیری شده بین ۱/۱۶ تا ۱/۶۳ گرم در بین تیمارهای مختلف، متفاوت بود. بیش‌ترین میزان روغن کل مربوط به تیمار ۷ درصد بود، درحالی‌که کم‌ترین میزان روغن کل مربوط به تیمار ۵ درصد گزارش شد (*P*≤۰/۰۵). از سنجش میزان روغن کل در اندازه‌گیری میزان بازدهی استفاده می‌گردد.

نتایج آزمون بازدهی ریزپوشانی: مقادیر بازدهی ریزپوشانی در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج آماری نشان داد که میزان بازدهی ریزکپسول‌های تولیدی در تیمارهای اندازه‌گیری شده بین ۵۵/۶۳ تا ۷۳/۰۳ درصد متفاوت است. تغییرات درصد امگا-۳ به دیواره تأثیر زیادی بر میزان بازدهی پودرهای تولیدی داشته است. به‌طوری‌که افزایش درصد امگا-۳ (۷ درصد)، بر میزان تغییرات روغن کپسوله شده در سطح احتمال ۹۵ درصد معنی‌دار بوده است (*P*≤۰/۰۵) اما در تیمار ۵ و ۶ درصد اختلاف معنی‌دار آماری مشاهده نشد (*P*≥۰/۰۵).

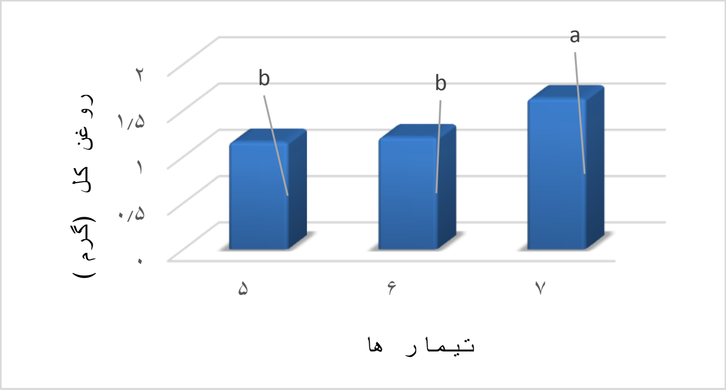
نتایج آزمایش رهایش کنترل‌شده مواد هسته: به‌منظور سنجش رهاسازی مواد هسته ریزکپسول‌های تولیدی؛ محیط شبیه‌سازی شده معده با استفاده از آنزیم پپسین استخراج شده از موکوس معده خوک و اسید سیتریک ۰/۱ مولار انجام شد. بر اساس نتایج (جدول ۲)، در هر کدام از تیمارهای حاوی امگا-۳ (۵، ۶ و ۷ درصد) میزان رهایش روغن در ساعات مختلف، اختلاف داشت (*P*≤۰/۰۵) و فقط در فاصله زمانی ۳ و ۴ اختلاف معنی‌دار آماری مشاهده نشد (*P*≥۰/۰۵). مقایسه رهایش اندازه‌گیری شده در بین تیمارهای با درصد مختلف روغن انکپسوله شده نشان داد که افزایش درصد امگا-۳ ریزپوشانی شده، سبب کاهش میزان رهایش شد (*P*≤۰/۰۵). در نتیجه بیش‌ترین رهایش در تیمار ۵ درصد به میزان ۱۳/۵۵ درصد بوده و بین تیمارهای ۶ و ۷ درصد اختلاف معنی‌دار آماری



شکل ۱- مقایسه میزان روغن سطحی میکروکپسول‌های تولیدی با درصدهای مختلف هسته به دیواره (۵، ۶ و ۷).



شکل ۲- مقایسه میزان روغن کپسوله‌شده ریزکپسول‌های تولیدی با درصدهای مختلف هسته به دیواره (۵، ۶ و ۷).

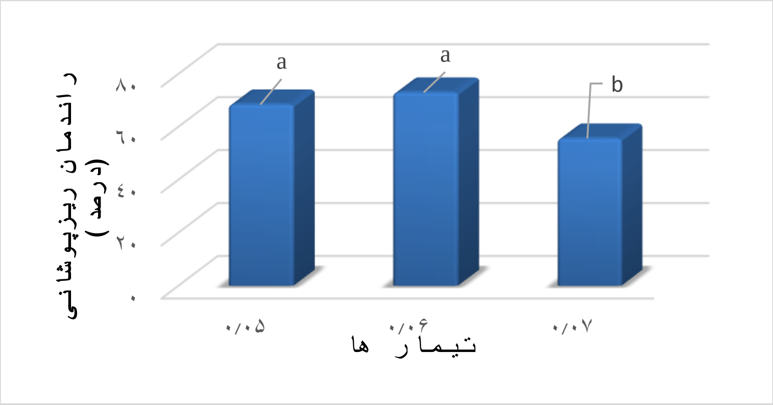


شکل ۳- مقایسه میزان روغن کل ریزکپسول‌های تولیدی با درصدهای مختلف هسته به دیواره (۵، ۶ و ۷).

دیده نشد ($P\geq$۰/۰۵).

نتایج آزمون اندازه‌گیری ذرات میکروکپسول‌های تولیدی: نتایج بررسی اندازه ذرات امولسیون نشان داد دامنه میانگین اندازه ذرات بین ۰/۱۵±۵/۵۵ میکرومتر در تیمار ۵ درصد، تا ۰/۲۳±۵/۸۵ میکرومتر در تیمار ۷ درصد است که اختلاف معنی‌دار بین دو تیمار را نشان داد ($P\leq$۰/۰۵). تیمار ۶ درصد دارای اندازه ۰/۲۰±۵/۵۹ میکرومتر بود که با دو تیمار ۵ و ۷ درصد اختلاف معنی‌دار نداشت ($P\geq$۰/۰۵).

با توجه به نتایج حاصله در اکثر آزمون‌ها تیمارهای ۵ و ۶ درصد نتایج بهتری نسبت به تیمار ۷ درصد نشان دادند و بین دو تیمار ۵ و ۶ درصد در آزمون‌های روغن سطحی، روغن انکپسوله، روغن کل، بازدهی و اندازه ذرات اختلاف معنی‌دار آماری وجود نداشت ($P\geq$۰/۰۵). بنابراین به‌منظور انتخاب یک تیمار جهت استفاده در سس گوجه‌فرنگی از تیمار ۶ درصد استفاده شد، زیرا با وجود نداشتن اختلاف معنی‌دار با تیمار ۵ درصد از میزان بالاتری روغن امگا-۳ برخوردار بوده و



شکل ۴- مقایسه میزان بازدهی ریزپوشانی ریزکپسول‌های تولیدی با درصدهای مختلف هسته به دیواره (۵، ۶ و ۷).

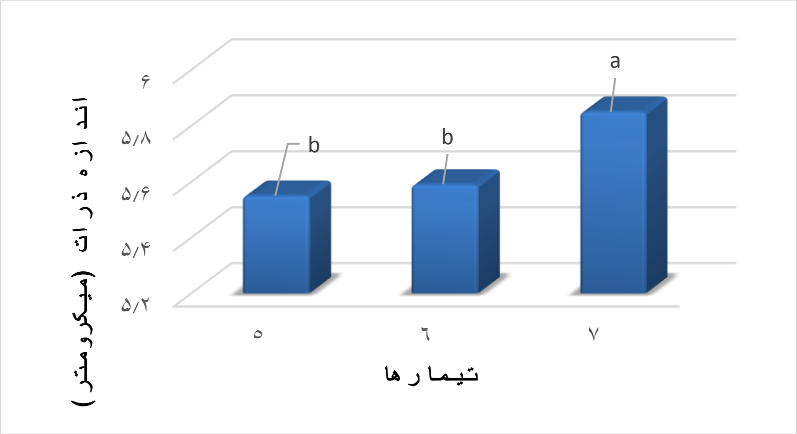
جدول۲- رهایش کنترل‌شده مواد هسته در ریزکپسول‌های تولید شده با درصدهای مختلف هسته به دیواره (۵، ۶ و ۷)

تیمارها / درصد هسته به دیواره	زمان (ساعت)			
	۱	۲	۳	۴
۵	۱۳/۵۵±۱/۹۱ ^{Aa}	۱۱/۸۰±۰/۶۵ ^{Ab}	۱۰/۲۶±۰/۹۵ ^{Ac}	۱۰/۰۱±۱/۰۱ ^{Ac}
۶	۹/۰۷±۰/۱۰ ^{Ba}	۸/۵۵±۱/۶۵ ^{Bb}	۶/۵۲±۰/۶۳ ^{Bc}	۶/۵۰±۲/۲۴ ^{Bc}
۷	۸/۸۲±۰/۱۲ ^{Ba}	۷/۶۰±۰/۹۳ ^{Bb}	۷/۵۱±۱/۱۷ ^{Bc}	۷/۱۵±۰/۷۸ ^{Bc}

*داده‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در سطح احتمال ۵٪ فاقد تفاوت معنی‌دار باهم می‌باشند ($P>۰/۰۵$).

*حروف بزرگ متفاوت در ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در تیمارها می‌باشد.

*حروف کوچک متفاوت در سطرها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در ساعات ۱، ۲، ۳ و ۴ می‌باشد.

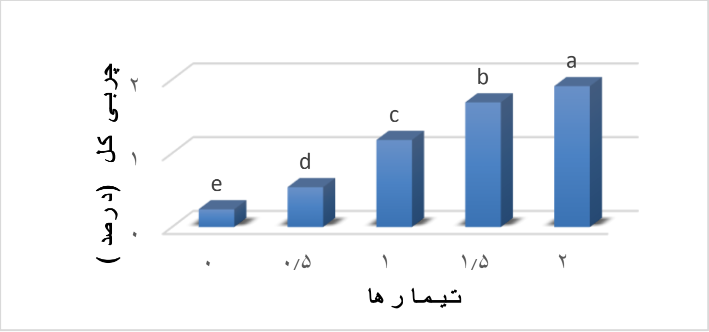


شکل ۵- مقایسه اندازه ذرات ریزکپسول‌های تولیدی میکروکپسول‌های تولیدی با درصدهای مختلف هسته به دیواره (۵، ۶ و ۷)

استفاده از آن جهت غنی‌سازی سس می‌تواند موجب نتایج مطلوب‌تری برای مصرف‌کننده شود.

نتایج آزمون چربی کل سس گوجه فرنگی غنی‌شده با ریزکپسول‌های حاوی ۶ درصد امگا-۳: نتایج بررسی چربی سس گوجه فرنگی در شکل ۶ ارائه شده است. بر اساس نتایج، محدوده میانگین چربی کل بین ۰/۲۴±۰/۰۲ درصد در تیمار شاهد تا ۱/۰±۹۱/۰۳درصد در تیمار ۲ درصد مشاهده شد. نتایج آنالیز آماری نشان داد که میزان چربی کل تیمارهای حاوی ۱، ۱/۵ و ۲ درصد با تیمار شاهد دارای اختلاف معنی‌دار بود ($P≤۰/۰۵$).

نتایج آزمون ارزیابی حسی سس گوجه‌فرنگی غنی‌شده با ریزکپسول های حاوی ۶٪ امگا-۳: ریزکپسول‌های حاوی ۶٪ امگا-۳ با غلظت‌های مختلف ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ به سس گوجه‌فرنگی آماده اضافه گردید و پارامترهای طعم و مزه، بو، رنگ، بافت و پذیرش کلی توسط گروه ارزیاب مورد سنجش قرار گرفت. آنالیز حسی نمونه‌ها در دو گروه انجام شد. در



شکل ۶- چربی کل سس گوجه‌فرنگی غنی‌شده با غلظت‌های متفاوت (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد) میکروکپسول حاوی امگا-۳.

جدول ۳- آنالیز حسی سس گوجه‌فرنگی غنی‌شده با غلظت‌های متفاوت (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد) ریزکپسول حاوی امگا-۳.

شاخص تیمار	طعم و مزه	بو	رنگ	بافت	پذیرش کلی
شاهد	۴/۰۸±۰/۹۰ ^{A}	۴/۴۱±۰/۸۰ ^{A}	۴/۴۱±۰/۷۹ ^{A}	۴/۱۶±۰/۷۲ ^{A}	۴/۲۵±۰/۸۷ ^{A}
۰/۰۵ درصد	۴/۰۰±۰/۷۴ ^{A}	۴/۰۰±۰/۸۵ ^{AB}	۴/۰۰±۰/۸۵ ^{AB}	۴/۰۰±۰/۶۰ ^{A}	۴/۰۰±۰/۸۵ ^{AB}
۱ درصد	۳/۳۷±۱/۲۳ ^{AB}	۳/۳۳±۱/۰۸ ^{B}	۳/۳۳±۱/۰۹ ^{B}	۳/۸۳±۰/۷۲ ^{AB}	۳/۴۱±۱/۲۴ ^{AB}
۱/۵ درصد	۳/۳۳±۱/۰۷ ^{AB}	۳/۵۸±۱/۱۰ ^{B}	۳/۵۸±۱/۱۰ ^{B}	۳/۷۵±۰/۷۵ ^{AB}	۳/۳۳±۱/۳۷ ^{AB}
۲ درصد	۲/۸۳±۱/۱۹ ^{B}	۳/۲۵±۰/۹۷ ^{B}	۳/۲۵±۰/۹۷ ^{B}	۳/۲۷±۰/۷۵ ^{B}	۳/۱۶±۱/۰۳ ^{B}

*داده‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در سطح احتمال ۵٪ فاقد تفاوت معنی‌دار با هم می‌باشند ($P>۰/۰۵$).

*حروف متفاوت در ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در تیمارها می‌باشد.

جدول ۴- آنالیز حسی سس گوجه فرنگی غنی شده با غلظت‌های متفاوت (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد) ریزکپسول حاوی امگا-۳ همراه با سیب‌زمینی.

شاخص تیمار	طعم و مزه	بو	رنگ	بافت	پذیرش کلی
شاهد	٤/٤١±۰/۶۷ ^{A}	۴/۳۳±۰/۷۸ ^{A}	۴/۵۰±۰/۸۰ ^{A}	۴/۱۶±۰/۷۲ ^{A}	۴/۳۳±۰/۶۵ ^{A}
۰/۵	۴/۴۱±۰/۶۷ ^{A}	۴/۲۵±۰/۷۵ ^{A}	۴/۲۵±۰/۷۵ ^{AB}	۴/۰۰±۰/۶۰ ^{A}	۴/۳۳±۰/۶۵ ^{A}
۱	۴/۱۶±۰/۹۴ ^{A}	۳/۷۵±۰/۸۷ ^{AB}	۳/۶۶±۰/۹۸ ^{B}	۳/۷۹±۰/۵۸ ^{A}	۳/۶۶±۰/۹۸ ^{A}
۱/۵	۳/۸۳±۱/۲۷ ^{A}	۳/۸۳±۱/۰۳ ^{AB}	۳/۹۱±۱/۰۰ ^{AB}	۳/۸۳±۰/۵۸ ^{A}	۳/۶۶±۱/۰۷ ^{A}
۲	۳/۰۸±۰/۶۷ ^{B}	۳/۲۵±۰/۷۵ ^{B}	۳/۵۸±۰/۹۰ ^{B}	۳/۲۷±۰/۷۵ ^{B}	۳/۵۸±۰/۷۹ ^{B}

*داده‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در سطح احتمال ۵٪ فاقد تفاوت معنی‌دار با هم می‌باشند ($P>۰/۰۵$).

*حروف متفاوت در ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در تیمارها می‌باشد.

یک گروه سس‌ها به تنهایی مورد ارزیابی قرار گرفتند (Amini *et al*., 2019) و در گروه دوم ارزیاب‌ها سس گوجه‌فرنگی غنی‌شده را با سیب‌زمینی سرخ کرده مورد ارزیابی قرار دادند (Panovska *et al*., 2009). بر اساس نتایج، بین درصدهای مختلف سس گوجه‌فرنگی (در صورت حضور یا عدم حضور سیب‌زمینی) در بین برخی از تیمارها اختلاف معنی‌دار گزارش گردید ($P≤۰/۰۵$، جدول‌های ۳ و ۴).

بحث و نتیجه‌گیری

پایداری امولسیون از جمله عواملی است که بر کارایی ریزپوشانی روغن و مواد طعم‌دهنده تأثیر می‌گذارد و سبب ثبات بهتر و کارایی بالاتر می‌گردد. امولسیون‌های ناپایدار، توانایی اندکی در حفظ و نگهداری مواد دارند. کرمی شدن نشانهٔ اولیهٔ عدم پایداری امولسیون‌های روغن در آب می‌باشد و منجر به دو فازشدن امولسیون می‌شود. فاز سرم پایینی کاملاً شفاف و متمایز و یا نیمه شفاف و لایهٔ دیگر کرمی می‌باشد. این پدیده با هم پیوستگی ذرات روغن به یکدیگر در فاز کرم ادامه یافته و سبب ایجاد لایهٔ روغنی بر سطح نمونه می‌گردد (شعبان‌پور و همکاران ۱۳۹۲؛ Dickinson, 2003). درتحقیق حاضر برای

تولید امولسیون پایدار با ژلاتین و صمغ عربی نیازی به استفاده از امولسیفایر وجود نداشت، زیرا ژلاتین ماده فعال سطحی بوده و قادر است در امولسیون‌های روغن در آب به‌عنوان امولسیفایر عمل نماید که ناشی از وجود نقاط آب گریز و زنجیره پپتیدی در ژلاتین می باشد. فعالیت سطحی و توانایی تشکیل فیلم توسط ژلاتین سبب شده تا در تولید امولسیون‌های مختلف بکار رود و ویژگی ژله‌ای شدن و پایداری آن در مرحله خشک‌کردن و ریزپوشانی آن نیز مطلوب می‌باشد (Karim *et al*., 2009).

در پژوهش حاضر میزان پایداری در درصدهای مختلف امگا-۳ (۵، ۶ و ۷ درصد)، تفاوت معنی‌داری نشان داد). به‌عبارتی دیگر، با افزایش میزان هسته (امگا-۳) نسبت به دیواره ریزکپسول‌ها (ژلاتین-صمغ عربی)، پایداری امولسیون کاهش یافته است. علاوه بر این، در طی دوره بررسی پایداری امولسیون (دوره ۲۰ روزه) تمامی تیمارها دچار افت پایداری شدند. نتایج به‌دست آمده با نتایج تحقیق یوسفی و همکاران (۱۳۹۱) تطابق دارد. در مطالعه آن‌ها، تأثیر میزان صمغ فارسی، روغن، پروتئین و pH بر پایداری امولسیون تهیه شده با فراصوت مورد سنجش قرار گرفت و در ارتباط با تأثیر میزان روغن بر پایداری امولسیون نتایج نشان داد با افزایش حجم فاز روغن از ۵ به ۱۵ درصد، پایداری امولسیون کاهش یافت، به‌طوری‌که در غلظت ۱۵ درصد فرایند کرمی شدن با سرعت بیشتری صورت گرفت که نشان‌دهنده غالب بودن تأثیر حجم فاز روغنی بر فرآیند کرمی‌شدن شدن امولسیون می‌باشد (Sun *et al*., 2009). به‌عبارت دیگر، پایداری سیستم با کاهش میزان فاز روغنی بهبود یافته است. علاوه بر این، در تحقیق حاضر، شاخص کرمی شدن امولسیون های تولیدی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نسبت‌های مورد مطالعه دارای کم‌ترین مقدار شاخص کرمی شدن، یعنی صفر درصد بودند. در این تحقیق هیچ نوع جدایی فاز و کرمی شدنی در طی نگهداری مشاهده نگردید. نتایج به‌دست‌آمده در مطالعه حاضر هم‌راستا با نتایج سایر محققین (شعبانپور و همکاران، ۱۳۹۲ Dickinson *et al*., 2003) بود.

علاوه بر موارد فوق، مقدار روغن سطحی یکی از فاکتورهای مهم در تعیین کیفیت پودرهای تولید شده است. روغن سطحی مسئول اکسیداسیون و همچنین کیفیت پودرها طی نگهداری است. در سال‌های اخیر به مطالعاتی که با هدف بهبود بازدهی ریزپوشانی در جهت خشک کردن طعم‌ها و روغن های غذایی انجام شده، توجه ویژه‌ای شده است. این بهبود از طریق به حداقل رساندن مقدار روغن کپسوله نشده‌ای که در سطح ذرات حضور دارد صورت می‌گیرد که در نتیجه از اکسیداسیون لیپید و از دست رفتن فراریت جلوگیری کرده و سبب افزایش عمر مفید محصول می‌شود (Mehrad *et al*., 2015). کارآیی ریزپوشانی تعیین کننده مقدار روغنی است که با موفقیت ریزپوشانی شده و باتوجه به میزان روغن سطحی و روغن کل محاسبه می‌شود. در واقع کارآیی ریزپوشانی نشان‌دهنده وجود روغن سطحی بر سطح ذرات پودر و توانایی دیواره در جلوگیری از خروج روغن انکپسوله شده می‌باشد. به‌طورکلی، پایداری ترکیبات با افزایش روغن انکپسوله شده افزایش می‌یابد و برای دستیابی به شرایط بهینه باید تا حد امکان سعی در افزایش کارایی ریزپوشانی نمود (Drush *et al*., 2012). علاوه بر محاسبه مقدار روغن کپسوله شده مقدار روغن سطحی هم دارای اهمیت است. روغن سطحی در میکروکپسول‌های تولید شده معمولاً به قسمتی از روغن گفته می‌شود که با حلال‌های آلی قابل استخراج است و نشان‌دهنده روغن موجود در سطح ذرات می‌باشد. حضور روغن در سطح ذرات پودر نشان می‌دهد، پودرهای ریزپوشانی شده از ویژگی مطلوبی برخوردار نیستند (Jafari *et al*., 2008). بازدهی ریزپوشانی بیان‌کننده مقدار روغنی است که با موفقیت توسط مواد پلیمری احاطه و ریزپوشانی شده که از استخراج آن توسط یک فرآیند شستشو با حلال جلوگیری می‌کند (Klinkesorn *et al*., 2006).

در پژوهش حاضر میزان روغن سطحی در ۳ تیمار

۵، ۶ و ۷ درصد (هسته / دیواره) در ریزکپسول‌ها مورد بررسی قرار گرفت، میزان روغن سطحی در تیمارهای مختلف بین ۰/۳۶±۰/۰۷ تا ±۰/۰۷ ۰/۵۹گرم اندازه‌گیری شد. هم‌چنین نتایج میزان روغن انکپسوله شده در تحقیق حاضر بین ۰/۲۹±۰/۰۳ تا ۰/۴۷±۰/۰۴ گرم بود. میزان بازدهی میکروکپسول‌های تولیدی نیز بین ۵۵/۶۳±۰/۲۳ تا ۷۳/۰۳±۰/۳۴ درصد قرار داشت. میزان پایین روغن سطحی و بالا بودن میزان بازدهی در ریزکپسول‌های تولیدی نشان می‌دهد که امگا-۳ به‌خوبی توسط دیواره صمغ عربی و ژلاتین ریزپوشانی شده است. نتایج نشان داد که میزان روغن سطحی، روغن انکپسوله و بازدهی تیمارهای ۵ و ۶ درصد با یک دیگر اختلاف معنی‌دار نداشتند، درصورتی‌که در هر سه آزمون مذکور تیمار ۷ درصد (هسته/دیواره) با تیمارهای دیگر دارای تفاوت معنی‌دار بود؛ در نتیجه می‌توان بیان داشت که با افزایش درصد امگا-۳ تا ۷ درصد، میزان روغن سطحی ریزکپسول‌های تولیدی افزایش، میزان روغن انکپسوله شده کاهش و در نتیجه میزان بازدهی نیز کاهش می‌یابد که با نتایج حاصل از مطالعهٔ شریفی و همکاران (۱۳۹۵)، Karaca و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت دارد.

در تحقیقات مذکور نیز تیمارهایی که دارای درصد روغن بیشتری بودند در مقایسه با سایر تیمارها بازدهی کمتر و روغن سطحی بیشتری داشتند. از سویی دیگر قابلیت حلالیت ریزکپسول‌ها در آب برای رهاسازی مواد هسته در محیط آبی به‌منظور قابلیت عملکرد ریزکپسول‌ها دارای اهمیت زیادی است (Lakkis, 2016). طراحی ریزکپسول‌ها نیازمند حلالیت کم آب و یا تأخیر در حلالیت می‌باشد. ریزپوشانی همیشه کلیدی به‌منظور برقراری عملکرد رهاسازی کنترل‌شده در محصولات غذایی است. در تحقیق حاضر، رهاسازی امگا-۳ در محلول پپسین (pH=۲) توسط تیمارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میزان رهاسازی مواد هسته در همه نمونه‌ها روند کاهشی داشته است، می‌توان گفت میزان رهایش به درصد امگا-۳ پوشش‌دهی شده و همچنین به‌مدت زمان باقی ماندن تیمارها در بن‌ماری بستگی دارد، به‌طوری‌که با افزایش درصد روغن ماهی و طولانی‌تر شدن زمان بررسی، میزان رهایش کاهش یافت. این نتایج با یافته‌های سایر محققین در خصوص رهایش مواد هسته مطابقت دارد (شعبانپور و همکاران، ۱۳۹۳؛ Mehrad *et al.*, 2015).

تهیهٔ یک امولسیون پایدار با ویژگی‌های مناسب مهم‌ترین مرحلهٔ فرایند ریزپوشانی است (Hosseini *et al.*, 2013). اندازه ذرات و توضیح آن‌ها، نقش مهمی در ویژگی‌های فیزیکی سیستم‌های کلوئیدی مانند پایداری در طی نگهداری، کدورت و ویژگی‌های رئولوژیکی دارد، همچنین بر ویژگی‌هایی همانند دسترسی زیستی، خواص ارگانولپتیکی و حسی فرآورده‌های غذایی حاوی آن مؤثر است. کاهش اندازه ذرات موجب افزایش نسبت سطح به حجم ذرات شده و بدین طریق بر ویژگی‌های فیزیکی، زیستی و حسی سیستم تأثیر می‌گذارد (عزیزانباری و همکاران، ۱۳۹۲). اندازهٔ ریزپوشانی، به‌منظور کاربردهای غذایی برای جلوگیری از حساسیت دهان به مواد غذایی و همچنین به‌منظور حفظ یکپارچگی محصول، باید کمتر از ۱۰۰ میکرومتر باشد (Kaushik *et al.*, 2015). در این پژوهش میانگین اندازه ذرات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند محدوده اندازه ذرات بین ۵/۵۵±۰/۱۵ در تیمار ۵ درصد تا ۵/۸۵±۰/۲۳ میکرومتر در تیمار ۷ درصد بود. به‌طورکلی عوامل مختلفی از قبیل نوع و غلظت مواد دیواره، نسبت بیوپلیمرها، دور هموژنایزر و درصد روغن بر اندازه ذرات تأثیرگذار هستند. در واقع نتایج نشان داد که افزایش درصد روغن موجب افزایش اندازه ذرات گردید. بهترین اندازه ذرات امولسیون مربوط به تیمار ۵ درصد به‌میزان ۵/۵۵ میکرومتر است که با تیمار ۶ درصد به میزان ۵/۵۹ میکرومتر اختلاف معنی دار نداشت. نتایج حاصل در این مطالعه با یافته‌های سایر تحقیقات انجام شده در مورد تأثیر نسبت هسته به دیواره در اندازه ذرات امولسیون مطابقت داشت. در آن تحقیقات نیز با افزایش نسبت هسته به مواد دیواره

موجب افزایش ذرات امولسیون شد (میرزایی کلایی و همکاران، ۱۳۹۸؛ جعفرپور و همکاران، ۱۳۹۵؛ Xiao *et al.*, 2014). پس از بررسی های انجام شده روی ریزکپسول‌های تولیدی از بهترین غلظت هسته به دیواره که در این پژوهش ریزکپسول‌های ۶٪ (امگا-۳ به دیواره ژلاتینی-صمغ عربی) بوده است، جهت غنی‌سازی سس گوجه فرنگی استفاده شد. انتخاب سس گوجه‌فرنگی به‌دلیل استفاده زیاد و متعدد آن در تغذیه مردم می‌باشد. بنابراین با غنی‌سازی این فرآورده پرمصرف می‌توان سبب بهبود ارزش تغذیه آن شد. از آنجا که سس گوجه‌فرنگی محصولی است که عموماً به‌صورت مجزا مصرف نمی‌شود و به‌صورت چاشنی همراه با برخی مواد غذایی استفاده می‌گردد، بنابراین در ارزیابی حسی علاوه بر ارزیابی سس گوجه‌فرنگی به‌صورت تنها، از ارزیاب‌ها تقاضا شد سس گوجه‌فرنگی غنی‌شده را با سیب‌زمینی سرخ شده نیز مورد ارزیابی قرار دهند. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان عنوان کرد که جز تیمار ۲ درصد که بالاترین میزان روغن ریزپوشانی شده را داراست، بقیه تیمارها از پذیرش قابل قبولی برخوردار بوده که بیانگر موفقیت در تولید پودر ریزپوشانی و محصور کردن عطر و مزه نامطلوب امگا-۳ دارد. در تیمار ۲ درصد به‌دلیل افزایش میزان روغن ریزپوشانی‌شده بیش‌ترین تفاوت در رنگ و بو نسبت به باقی تیمارها مشاهده شد. از آنجاکه طبق نظر ارزیاب‌ها تیمار ۰/۵درصد هیچ‌گونه اختلاف معنی‌دار با نمونه شاهد نداشت می‌توان نتیجه گرفت که نمونه سس گوجه‌فرنگی حاوی ۰/۵ درصد پودر انکپسوله بهترین پذیرش را دارا بود. در ارزیابی حسی سس گوجه‌فرنگی همراه با سیب‌زمینی نیز پارامتر طعم، بو و بافت فقط تیمار ۲ درصد دارای اختلاف معنی‌دار، با تیمار شاهد و باقی تیمارها بود و در باقی تیمارها اختلاف معنی‌دار در پارامترهای ذکرشده مشاهده نشد. در پارامتر پذیرش کلی کلیه درصدهای استفاده شده در سس گوجه‌فرنگی با تیمار شاهد فاقد اختلاف معنی‌دار بوده که این موضوع بیانگر رضایت کلی ارزیابان حسی از سس گوجه‌فرنگی فراسودمند تولیدی است.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به تولید ریزکپسول‌های حاوی روغن امگا-۳ با دیواره ترکیبی صمغ عربی و ژلاتین پرداخته شد. در این راستا از ۳ تیمار (نسبت‌های ۵، ۶ و ۷ درصد هسته به دیواره) استفاده شد. طبق آزمون‌های انجام شده روی ریزکپسول‌های تولید شده، نتایج نشان داد که میزان بازدهی ریزپوشانی تیمار ۶ درصد بالاترین مقدار بوده و این مقدار از لحاظ میزان روغن سطحی و همچنین رهایش کنترل شده کم‌ترین مقدار را نشان داد، که با توجه به اهمیت این آزمون‌ها می‌تواند دلیلی بر کیفیت بهتر تیمار ۶ درصد (هسته به دیواره) باشد. بنابراین با توجه به نتایج آزمون‌های مربوط به ریزکپسول‌ها، تیمار ۶ درصد برای غنی‌سازی سس گوجه فرنگی انتخاب شد و در ۴ غلظت ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد به سس گوجه‌فرنگی افزوده شد. با توجه به یافته‌های حاصل و ارزیابی‌های حسی انجام شده، افزودن ریزکپسول‌های حاوی روغن امگا-۳ به سس، تا میزان ۱/۵ درصد، تغییر طعم و مزه معنی‌داری ایجاد نمی‌کند بنابراین استفاده از آن‌ها در تهیه سس گوجه فرنگی فراسودمند جهت بهبود ارزش غذایی آن پیشنهاد می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب تقدیر و تشکر خود را از پارک علم و فناوری استان گیلان جهت حمایت مالی در قالب طرح کانون شکوفایی و خلاقیت اعلام میدارند.

منابع

جعفرپور، س.ع.، اصفهانی ر.، جعفری س.م. ۱۳۹۵. بررسی نانو ریزپوشانی اسیدچرب امگا-۳ به‌وسیله ژلاتین ماهی و صمغ عربی با استفاده از روش کوآسرواسیون. مجله علمی شیلات ایران. ۲: ۴۲-۲۹.

شریفی ا. ۱۳۹۶. انکپسوله کردن روغن ماهی و اسانس

میخک از طریق روش کواسرواسیون با استفاده از ژلاتین ماهی و صمغ عربی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ساری: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۵۵-۷۳.

شعبانپور ب.، مهراد ب.، پورعاشوری پ.، جعفری س.م. ۱۳۹۶. ارزیابی اثر ژلاتین ماهی، کاپا کاراگینان و روش‌های مختلف ریزپوشانی بر پایداری اکسایشی میکروکپسول‌های روغن ماهی. فصلنامه فناوری‌های نوین غذایی. ۵(۲): ۲۸۶-۲۷۱.

عزیزانباری چپا.، قنبرزاده بابک.، همیشه‌کار حامد.، حسینی م. ۱۳۹۲. نانو کمپلکس‌های ژلان-کازئینات به‌عنوان حامل اسیدهای چرب امگا سه: بررسی اندازه ذرات، رئولوژی و کارآیی انکپسولاسیون. فرآوری و نگهداری مواد غذایی. ۲: ۴۲-۱۹.

میرزایی کلایی ف.، جعفرپور س.ع. ۱۳۹۸. ریزپوشانی توأم روغن ماهی و ویتامین E به روش کوآسرواسیون ترکیبی و بهینه‌یابی کارایی آن با روش سطح پاسخ (RSM). پژوهش و نوآوری در علوم و صنایع غذایی. ۱: ۶۶-۵۳.

یوسفی ف.، عباسی ی.، عزت پناه ح. ۱۳۹۱. تأثیر میزان صمغ فارسی، روغن، پروتئین و پ هاش بر پایداری امولسیون تهیه شده با فراصوت. نشریه پژوهش و نوآوری در علوم و صنایع غذایی. ۱(۳): ۲۱۸-۱۹۹.

Amini M.D., Ghaderi-Ghahfrokhi M., Borhani B., Piran Z., Bagheri, M.S. 2019. Effects of sugar substation with high fructose corn syrup on the qualitative, rheological and sensorial characteristics of tomato ketchup sauce. *Iranian Journal of Nutrition Sciences and Food Technology* 14(2), 69-84.

Bakry A.M., Abbas S., Ali B., Majeed H., Abouelwafa M.Y., Mousa A., Liang L. 2016. Microencapsulation of oils: A comprehensive review of benefits, techniques, and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 15(1), 143-182.

Drusch S., Berg S. 2008. Extractable oil in microcapsules prepared by spray-drying: localisation, determination and impact on oxidation stability. *Food Chemistry* 109, 17-24.

Drusch S., Serfert Y., Berger A., Shaikh M.Q., Rätzke K., Zaporojtchenko V., Schwarz K. 2012. New insights into the microencapsulation properties of sodium caseinate and hydrolyzed casein. *Food Hydrocolloids* 27, 332-338.

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

García-Moreno P. J., Stephansen K., Kruijs J., Guadix A., M.Guadix E., Ioannis S.Chronakis L., Jacobsen C. 2016. Encapsulation of fish oil in nanofibers by emulsion electrospinning: Physical characterization and oxidative stability. *Journal of Food Engineering* 183, 39-49.

Hamed S., Hashim A., Abdelhay H., Abd-Elsalam E. 2022. Microencapsulation of omega-3 rich flaxseed and fish oil. *Egyptian Journal of Chemistry* 65(2), 623-638.

Hardas N., Danviriyakul S., Foley J.L., Nawar W.W., Chinachoti P. 2000. Accelerated stability studies of microencapsulated anhydrous milk fat. *Lebensmittel Wissenschaft and Technology Food Science and Technology* 33(7), 506-513.

Hosseini S.F., Zandi M., Rezaei M., Farahmandghavi F. 2013. Two-step method for encapsulation of oregano essential oil in chitosan nanoparticles: preparation, characterization and in vitro release study. Carbohydrate *Polymers* 95(1), 50-56.

Huang X., Kakuda Y., Cui W. 2001. Hydrocolloids in emulsions: particle size distribution and interfacial activity. *Food Hydrocolloids* 15(4-6), 533-542.

Jafari S.M., Assadpoor E., He Y., Bhandari B. 2008. Encapsulation efficiency of food flavors and oils during spray drying. *Drying Technology* 26(7), 816-835.

Kagami Y., Sugimura S., Fujishima N., Matsuda K., Kometani T., Matsumura Y. 2003. Oxidative stability, structure, and physical characteristics of microcapsules formed by spray drying of fish oil with protein and dextrin wall materials. *Journal of Food Science*. 68(7), 2248-2255.

Kalladathvalappil Venugoplalan V., Ramadevi Gopakumar L., Kizhakkeppurath Kumaran A., Sekhar Chatterjee N., Samon V., Peeralil SH., Mathew S., Mcclement J., Chandragiri Nagarajarao R. 2021. Encapsulation and protection of omega-3-rich fish oils using food-grade delivery systems. Foods 10(7), 1566.

Kaushik P., Dowling K., Barrow C.J., Adhikari B. 2015. Microencapsulation of omega-3 fatty acids: A review of microencapsulation and characterization methods. *Journal of Functional Foods*, 19, 868-881.

Klinkesorn U., Sophanodora P., Chinachoti P., Decker, E.A., McClements D.J. 2006.

eicosapentaenoic and docosahexaenoic acids in marine microorganisms. *Applied and Environmental Microbiology* 74(3), 570-574.

Shu B., Yu W., Zhao Y., Liu X. 2006. Study on microencapsulation of lycopene by spray drying. *Food Engineering* 76: 664-669.

Tamjidi F., Nasirpour A., Shahedi M. 2013. Mixture design approach for evaluation of fish oil microencapsulation in gelatin-acacia gum coacervates. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials* 62(8). 444-449.

Panovska Z., Stern P., Vachova A., LukeŠova D., PokorNý J. 2009. Textural and Flavour Characteristics of Commercial Tomato Ketchups. *Czech Journal of Food Sciences* 27(3). 165–170.

Pourashouri P., Shabanpour B., Razavi S.H., Jafari S.M., Shabani A., Aubourg S. 2014. Impact of wall materials on physicochemical properties of microencapsulated fish oil by spray drying. *Food and Bioprocess Technology* 51, 348-355.

Xiao Z., Liu W., Zhu, G., Zhou R., Niu Y. 2014. Production and characterization of multinuclear microcapsules encapsulating lavender oil by complex coacervation. *Flavour and Fragrance Journal* 29(3), 166-172.

Characterization of spray-dried tuna oil emulsified in two-layered interfacial membranes prepared using electrostatic layer-by-layer deposition. *Food Research International* 39: 449-457.

Lakkis, J.M. 2007. Encapsulation and controlled release technologies in food systems. pp. 1-11.

Malleswari K., Reddy R.D., Swathi M. 2016. Microencapsulation: a review a novel approach in drug delivery. *European Journal of Pharmaceutical and Medical Research* 3(6), 186-194.

Mehrad B., Shabanpour B., Jafari S.M., Pourashouri P. 2015. Characterization of dried fish oil from Menhaden encapsulated by spray drying. AACL Bioflux. 8(1), 57-69.

Karaca A.C., Nickerson M., Low N.H. 2013. Microcapsule production employing chickpea or lentil protein isolates and maltodextrin: Physicochemical properties and oxidative protection of encapsulated flaxseed oil. *Food Chemistry* 139(1-4), 448-457.

Kolanowski W., Laufenberg G. 2006. Enrichment of food products with polyunsaturated fatty acids by fish oil addition. *European Food Research and Technology* 222(3-4), 472-477.

Okuyama H., Orikasa Y., Nishida T. 2008. Significance of antioxidative functions of

Production and evaluation of microcapsules containing omega-3 to enrich tomato sauce

Haniyeh Rostamzad*, Aria Babakhani, Zeinab Fakouri, Mohadese Esmaeilzadeh

Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran.
*Corresponding author: hrostamzad@guilan.ac.ir

Received: 2022/8/9 Accepted: 2023/1/29

Abstract

The application of omega-3 in the diet has benefits for human health, but this oil does not have the proper taste and smell for use to enrich various foods, therefore it is necessary to avoid spreading its smell. For this purpose, micro-coating is a desirable and practical method. On the other hand, tomato sauce is a condiment that is consumed a lot, hence its enrichment with omega-3 can improve its nutritional value. In the present study, microcapsules containing of omega-3 are first prepared from fish oil. Depending on the use of the microcapsules, a combined wall of gelatin and gum arabic was used. Three teams (5, 6, and 7%) were evaluated to achieve the best percentage of walls to the core of the microcapsules. Measurements of surface oil, encapsulated oil, total oil, stability, release and size were done on the produced microcapsules. The results showed that the highest efficiency of microencapsulation was achieved with the 6% omega-3 treatment having the lowest surface oil and controlled release ($P \leq 0.05$), showing its better quality. According to the results, the treatment of 6% (core/wall) was chosen for the enrichment of the tomato sauce. In the next step, the tomato sauce was enriched with different concentrations (0.5, 1, 1.5 and 2%) were enriched and then fat and sensory evaluations were conducted to verify the acceptability of the prepared sauce. According to the results, the enrichment of tomato sauce with microcapsules containing up to 1.5% omega-3 has good and acceptable sensory properties ($P \leq 0.05$), suggesting its use in the production of tomato sauce to enrich and improve its nutritional value.

Keywords: Oxidation, Omega 3, Microcapsule, Enrichment.