مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران
سال شانزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، صفحات ۶۴-۵۵

بررسی خصوصیات ژل امولسیونی غنی شده با امگا-۳ با استفاده از هیدروکلوئیدهای محلول در آب و روغن بزرک

عباس جلیل زاده[۱]، پریسا نصیرپور تبریزی[۲]، صدیف آزادمرد دمیرچی[۳]، جواد حصاری[۳]، مریم خاکباز حشمتی[۳]

۱- نویسنده مسئول: استادیار گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، واحد ماکو، دانشگاه آزاد اسلامی، ماکو، ایران پست الکترونیک: jalilzadeh1387@gmail.com
۲- دانش آموخته دکتری، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز
۳- گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۹۹/۹/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۱۸

چکیده

سابقه و هدف: با آگاهی عموم مردم از مضرات مصرف زیاد اسیدهای چرب اشباع و *ترانس*، و نیز اهمیت دریافت اسیدهای چرب ضروری از طریق رژیم غذایی، تمایل به مصرف محصولات سالم‌تر روز به روز در حال افزایش است. کاهش چربی جامد و نیز چربی کل، خصوصیات محصول نهایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هدف از این پژوهش، تعیین ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی، رئولوژیکی و حسی ژل امولسیونی کم چرب غنی از اسیدهای چرب ضروری امگا-۳ به عنوان محصولی مالش‌پذیر و جایگزین سالم‌تری برای کره و مارگارین بود.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه ژل امولسیونی به روش افزودن فاز آبی حاوی هیدروکلوئیدها (صمغ دانه خرنوب، کاراگینان، زانتان و مالتودکسترین) و افزودنی‌ها (اسید سیتریک، سوربات پتاسیم و نمک) به فاز روغنی حاوی روغن بزرک (منبع غنی از اسیدهای چرب ضروری امگا-۳) و امولسیفایرها (منوآسیل‌گلیسرول و پلی‌گلیسرول پلی‌ریسینولئات) و هم زدن با دور بالا تهیه شد. در طول مدت ۶۰ روز نگهداری، ترکیب اسیدهای چرب، پایداری اکسیداسیونی، ویژگی‌های رئولوژیکی، گرماسنجی روبشی تفاضلی و ریزساختار ارزیابی شد. ویژگی‌های حسی ژل امولسیونی به عنوان جایگزینی برای کره و مارگارین توسط آزمون حسی ارزیابی شد.

یافته‌ها: ژل امولسیونی تهیه شده با ۱۹٪ روغن بزرک، ۱٪ امولسیفایر، ۰/۰۵٪ صمغ دانه خرنوب، ۲٪ کاراگینان، ۱/۴٪ کاراگینان و ۵٪ مالتودکسترین دارای پایداری اکسیداسیونی و حرارتی مطلوب، ویژگی جامد مانند، رقیق شونده با برش و تیکسوتروپیک بود. با وجود اینکه قطرات پراکنده روغن در انتهای دوره نگهداری شروع به ادغام کرده بودند؛ پیشرفت پدیده تا حدی نبود که موجب ناپایداری و جدا شدن فاز روغنی شود. ویژگی‌های حسی توسط ارزیاب‌ها، مطلوب گزارش شد.

نتیجه‌گیری: ژل امولسیونی تولید شده با استفاده از هیدروکلوئیدهای محلول در آب و روغن بزرک با داشتن چربی کل و اسیدهای چرب اشباع کمتر، می‌تواند به عنوان جایگزینی سالم‌تر برای کره و مارگارین و نیز حاملی برای انتقال اسیدهای چرب ضروری امگا-۳ به کار برده شود.

واژگان کلیدی: رئولوژی، امولسیون ژلی، هیدروکلوئید، روغن بزرک، امگا-۳

• مقدمه

مارگارین (کره گیاهی) امولسیون آب در روغن با ویژگی پلاستیک است که به عنوان جایگزینی برای کره حیوانی (با درصد بالای اسیدهای چرب اشباع) معرفی شده است. با این وجود، مارگارین نیز معایبی از جمله مقدار بالای درصد چربی (حداقل ۸۰ درصد) و نیز مقادیری از اسیدهای چرب *ترانس* دارد که برای سلامتی مضر است. مصرف بالای اسیدهای چرب اشباع و نیز *ترانس* با ابتلا به بیماری‌های مزمنی از جمله بیماری‌های قلبی-عروقی، سرطان و دیابت نوع II در ارتباط است (۱). برای تغذیه با یک رژیم غذایی سالم، سازمان غذا و کشاورزی و نیز سازمان بهداشت جهانی توصیه می‌کنند که

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-04-05]

مقدار مصرف چربی باید کمتر از ٪۳۰ کل انرژی دریافتی باشد. همچنین، مصرف اسیدهای چرب اشباع و *ترانس* باید به ترتیب کمتر از ۱۰٪ و کمتر از ۱٪ باشد (۳، ۲). متخصصین همچنین بر مصرف نسبت مناسبی از اسیدهای چرب امگا ۳ به امگا ۶ برای داشتن رژیم غذایی سالم تأکید دارند. به دلیل محدود بودن منابع غذایی برای دریافت اسیدهای چرب امگا-۳، مقدار مناسبی از این ترکیب زیست فعال دریافت نمی‌شود و عدم تعادل در مصرف اسیدهای چرب امگا-۳ و امگا-۶ باعث بروز بیماری‌های قلبی، عفونی و سرطان می‌شود (۴).

فرآیند ژل کردن امولسیون‌ها (ژل امولسیونی) و یا ژل کردن روغن‌های مایع (اولئوژل) یک تکنولوژی جدید برای ساختار دادن به روغن مایع و جایگزین کردن قسمتی یا تمام چربی جامد در محصولات غذایی از جمله مارگارین و پخشینه، بدون افزایش در اسیدهای چرب *ترانس* است. Hadnađev و همکاران (۲۰۱۱) با جایگزین کردن ۱۵٪ از چربی در پخشینه کم‌چرب قنادی یا ژل ۲۰٪ مالتودکسترین سیب زمینی و ذرت مومی به نتایج مطلوبی دست یافتند؛ اما با جایگزین کردن ۳۰ و ۵۰ درصد از چربی، معکوس شدن فاز اتفاق افتاد. آنها نشان دادند که با استفاده از ژل‌های مالتودکسترین به عنوان جایگزین چربی، درجه تیکسوتروپی، تنش تسلیم، ویسکوزیته ظاهری، مدول الاستیک و مقادیر سفتی افزایش یافت (۵). Do و همکاران (۲۰۱۶) پخشینه کم چربی را با استفاده از خمیر نشاسته تغییر یافته، روغن زیتون، زرده تخم مرغ، نمک، صمغ زانتان و طعم دهنده کره و با بهره‌گیری از تکنولوژی اولتراسوند تهیه کردند. آنها نشان دادند که با استفاده از فرمولاسیون‌های حاوی ۱۵ و ۲۰ درصد خمیر نشاسته تغییر یافته با α-گلوکونوترانسفراز، تولید پخشینه کم چرب روغن در آب بسیار پایدار با مالش‌پذیری قابل قبول امکان‌پذیر بود (۶).

یکی دیگر از کاربردهای ژل امولسیونی، استفاده برای انتقال ترکیبات زیست فعالی مانند اسیدهای چرب ضروری امگا-۳ است. Chen و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که پایداری اکسیداسیونی اسیدهای چرب امگا-۳ در میکروژل‌های آلژینات افزایش یافت (۷). Haug و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که اسیدهای چرب امگا-۳ (روغن ماهی) انتقال یافته توسط ژل‌های امولسیونی بر پایه ژلاتین در مقایسه با کپسول-های ژلی متداول، دارای دسترسی زیستی بالاتری بودند (۸). با توجه به مضرات مصرف چربی‌هایی مانند کره و مارگارین، افزایش روز افزون بیماری‌های مرتبط با مصرف مقادیر بالای اسیدهای چرب اشباع و *ترانس* و نیز ضرورت جبران دریافت ناکافی اسیدهای چرب امگا-۳ از طریق رژیم غذایی، معرفی محصولی مالش‌پذیر با درصد پایین چربی و مقادیر بالاتری از اسیدهای چرب غیراشباع و به خصوص امگا-۳ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از این پژوهش، تولید ژل‌های امولسیونی مالش‌پذیر حاوی اسیدهای چرب ضروری امگا-۳ با استفاده از هیدروکلوئیدهای دانه خرنوب، کاراگینان، زانتان و مالتودکسترین و نیز روغن بزرک برای استفاده به عنوان جایگزینی سالم برای چربی‌های مالش‌پذیری مانند کره و مارگارین و سپس تعیین ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، رئولوژیکی و حسی ژل امولسیونی به مدت ۶۰ روز (با در نظر گرفتن بهترین زمان نگهداری با حفظ پایداری ژل و بدون پس دادن روغن) بود.

• مواد و روش‌ها

مواد اولیه: دانه بزرک از بازار محلی تبریز خریداری شد. صمغ‌های مورد استفاده در فرمولاسیون عبارت بودند از: κ-کاراگینان (سیگما-آلدریچ، امریکا)، صمغ دانه خرنوب (GKM، ترکیه)، صمغ زانتان (فلوکا، سوئیس) و مالتودکسترین با معادل دکستروز ۱۰ (ماکندی، ترکیه). امولسیفایرهای پلی-گلیسرول پلی‌ریسینولئات و منوآسیل‌گلیسرول از شرکت پالسگارد دانمارک تهیه شدند. اسید سیتریک، سوربات پتاسیم، α-توکوفرول و سایر مواد شیمیایی مورد استفاده برای انجام آزمون‌ها از شرکت سیگما-آلدریچ امریکا تهیه شدند.

روش تهیه ژل امولسیونی: ژل امولسیونی به روش Patel و همکاران (۲۰۱۴) و با اندکی تغییر تهیه شد (۹). فازهای آبی و روغنی به طور جداگانه تهیه شدند. فرمولاسیون مورد استفاده برای تهیه ژل امولسیونی در این پژوهش بر اساس نتایج مطالعه پیشین که با هدف بهینه سازی مقادیر هیدروکلوئیدها انجام گرفته بود؛ انتخاب شد که در جدول ۱ ارائه شده است (۱۰). برای تهیه فاز آبی مخلوط هیدروکلوئیدها، نمک، اسید سیتریک و سوربات پتاسیم در آب حل شدند. فاز آبی در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد توسط همزن با دور بالای ۲۰۰۰۰ rpm (TP 18/10، IKA-Werke GmbH & Co، آلمان) همگن شد. برای تهیه فاز روغنی، ابتدا روغن از دانه‌های تمیز شده بزرک توسط پرس سرد (پرس مارپیچی، مدل ۸۵ میلی‌متر) با اعمال فشار ۱۰ MPa استخراج شد. فاز روغنی با حل کردن امولسیفایرهای پلی‌گلیسرول پلی‌ریسینولئات و منوآسیل-گلیسرول و نیز α-توکوفرول در روغن بزرک و حرارت دادن برای حل شدن امولسیفایرها تهیه شد. برای تهیه امولسیون، فاز روغنی به آرامی به فاز آبی افزوده شد و توسط همزن (سانی SMB-85، چین) ابتدا با سرعت پایین (سرعت ۱ درج

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-04-05]

شده روی دستگاه) به مدت ۵ دقیقه و سپس با سرعت بالای همزن (سرعت ۳ درج شده روی دستگاه) به مدت ۴۰-۳۰ ثانیه در دمای ۷۰-۶۵ درجه سانتی‌گراد مخلوط شد. پس از ژل شدن امولسیون با سرد شدن در دمای اتاق، به منظور انجام آزمایش‌های بعدی، در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد.

جدول ۱. فرمولاسیون ژل امولسیونی

ترکیبات	درصد وزنی
فاز آبی	
صمغ دانه خرنوب	۰/۰۵
κ-کاراگینان	۲
صمغ زانتان	۱/۴
مالتودکسترین	۵
نمک	۰/۱
سوربات پتاسیم	۰/۱
اسید سیتریک	۰/۰۳
آب	۷۱/۲۷
فاز روغنی	
روغن بزرک	۱۹
PGPR	۰/۴
DMG	۰/۶
α-توکوفرول	۰/۰۵
کل	۱۰۰

استخراج روغن از ژل امولسیونی: برای این منظور، از حلال‌های کلروفرم و متانول به نسبت ۲ به ۱ استفاده شد. پس از افزودن حلال، مخلوط به مدت ۳ دقیقه هم زده شد و به قیف جدا کننده انتقال داده شد. بعد از ۱۰ دقیقه، فاز پایینی که حاوی کلروفرم و روغن بود جدا شد. سپس حلال به روش تبخیر با اواپراتور از روغن جدا شد (۱۱).

تعیین الگوی اسیدهای چرب: الگوی اسیدهای چرب ژل امولسیونی توسط کروماتوگرافی گازی به روش فتحی-آچاچلویی و همکاران (۲۰۱۹) در روز تولید و ۶۰ روز پس از نگهداری در یخچال تعیین شد. به طور خلاصه، متیل استر اسیدهای چرب با استفاده از کروماتوگرافی گازی (GC-1000، DANI، ایتالیا) مجهز به آشکارساز یونیزاسیون شعله‌ای و بوسیله ستون مویی نوع BPX70 (SGE، آستین، تگزاس، امریکا) آنالیز شدند (۱۲).

ارزیابی پایداری اکسیداسیونی: برای ارزیابی پایداری اکسیداسیونی ژل امولسیونی اعداد پراکسید و تیوباربیتوریک اسید روغن استخراج شده از امولسیون ژلی در روزهای ۱، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ پس از تولید به ترتیب با روش‌های استاندارد شماره Cd ۸-۵۳ و Cd ۱۹-۹۰ تعیین شدند (۱۴، ۱۳).

اندازه‌گیری ویژگی‌های رئولوژیکی: برای اندازه گیری ویژگی‌های رئولوژیکی، رئومتر (Anton Paar، MCR301، اتریش) با صفحات موازی به قطر ۴۰ mm و فاصله پروب با نمونه ۱۰۰۰ µm استفاده شد (۱۵). پس از تعیین ناحیه ویسکوالاستیک خطی توسط آزمون روبش کرنش (۱۰۰٪ – ۰/۱) در فرکانس ۱ هرتز، آزمون روبش فرکانس در محدوده فرکانس ۱۰-۰/۱ هرتز در کرنش ثابت ۰/۱٪ انجام شد. ویسکوزیته در محدوده سرعت برشی s^{-1} ۱-۱۰۰ و همچنین توسط آزمون ۳ مرحله‌ای چرخشی (به ترتیب در سرعت‌های برشی s^{-1} ۰/۱، s^{-1} ۱۰ و مجدداً s^{-1} ۰/۱ هر کدام به مدت ۱۰ دقیقه) به ترتیب به منظور بررسی ویژگی رقیق شوندگی با برش و ویژگی تیکسوتروپیک اندازه‌گیری شد. آزمون روبش دما در محدوده دمایی ºC ۵-۸۰ انجام شد.

گرماسنجی روبشی تفاضلی: آنالیز حرارتی ژل امولسیونی توسط کالریمتری روبشی تفاضلی (DSC) (Perkin Elmer، Jade، امریکا) انجام گرفت. کالیبره کردن دستگاه با ایندیوم صورت گرفت و از پن آلومینیومی خالی به عنوان مرجع استفاده شد. نمونه‌ها با وزن تقریبی ۵ میلی‌گرم با سرعت ºC/min ۵ در دامنه دمایی ºC ۳۰ تا ºC ۲۰۰ آنالیز شدند (۱۶).

مطالعه ریزساختار: مطالعه ریزساختار ژل امولسیونی در دمای محیط (ºC ۲۵) و با استفاده از میکروسکوپ نوری (Olympus، CH30، ژاپن) در روزهای اول و آخر نگهداری انجام گرفت. قطره‌ای از ژل امولسیونی به صورت لایه بسیار نازک روی لام شیشه‌ای اعمال شد و روی آن توسط لامل پوشانده شد. ریزساختار ژل امولسیونی با بزرگنمایی ۴۰ × مطالعه شد (۱۷).

ارزیابی حسی: ارزیابی حسی بر روی ژل امولسیونی و نیز یک نمونه مارگارین کم‌چرب (۶۰ ٪ چربی، ۰/۲٪ نمک، ۱/۲ ٪ اسیدهای چرب ترانس) انجام گرفت. سفتی توسط ۱۴ داور نیمه آموزش دیده برای بررسی قابلیت استفاده به عنوان پخشینه کم کالری به روش علامتگذاری شدت ویژگی روی خطی به طول ۱۰ cm مورد ارزیابی حسی قرار گرفت (۱۸). مقبولیت مالش‌پذیری، طعم و رنگ توسط آزمون هدونیک ۹ طبقه‌ای انجام گرفت. ارزیابی پذیرش کلی نمونه‌ها توسط ۴۲

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-04-05]

داور نیمه آموزش دیده و با آزمون هدونیک ۹ طبقه‌ای (۹ = بسیار مطلوب و ۱ = بسیار نامطلوب) صورت گرفت.

آنالیز آماری: نتایج به صورت میانگین ۳ تکرار ± انحراف استاندارد گزارش شدند و توسط نرم‌افزار SPSS ۱۹ (SPSS Inc.، شیکاگو، ایلینوی) با مدل عمومی خطی و طرح کاملاً تصادفی آنالیز شدند. معنی‌داری اختلاف میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح ۵٪ بررسی شد. نتایج داده‌های ارزیابی حسی با استفاده از آزمون t مستقل برای مقایسه میانگین‌ها در سطح ۵٪ آنالیز شدند.

• یافته‌ها

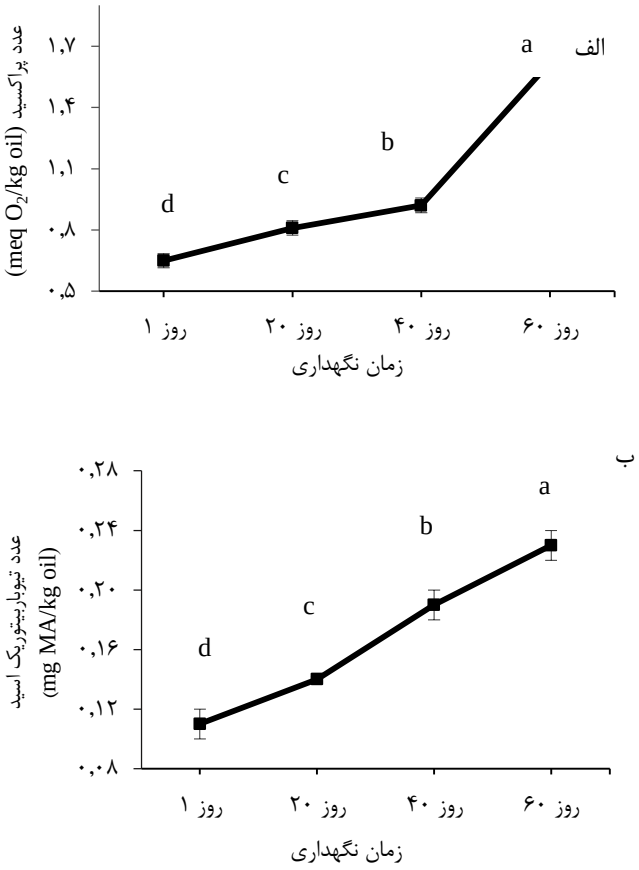
ترکیب اسیدهای چرب ژل امولسیونی: ترکیب اسیدهای چرب ژل امولسیونی در روز تولید و ۶۰ روز پس از نگهداری در جدول ۲ نشان داده شده است. ژل امولسیونی تولید شده با روغن بزرک دارای مقادیر بالایی از اسیدهای چرب غیراشباع (۹۰ درصد) و از نوع امگا-۳ (α-لینولنیک اسید، حدود ۵۸ درصد) بود. ژل امولسیونی دارای مقادیر پایین اسیدهای چرب اشباع (حدود ۹٪ از کل اسیدهای چرب) بود که اسید پالمیتیک (حدود ۶/۵٪) و استئاریک (حدود ۲٪) دارای بیشترین سهم در بین اسیدهای چرب اشباع بودند. اسید لینولنیک (٪ ۵۶/۹ – ۵۸/۹)، اولئیک (٪ ۱۹/۴ – ۱۸/۴) و لینولئیک (٪ ۱۲/۷ – ۱۲) بیشترین سهم را در بین اسیدهای چرب ژل امولسیونی به خود اختصاص می‌دادند. در انتهای دوره نگهداری اسیدهای چرب α-لینولنیک اسید و نیز لینولئیک اسید به طور معنی‌داری ($p < ۰/۰۵$) کاهش یافتند.

جدول ۲. ترکیب اسیدهای چرب ژل امولسیونی در روز تولید و ۶۰ روز پس از نگهداری در دمای ۴ °C

	روز تولید	۶۰ روز پس از نگهداری
اسید پالمیتیک (C16:0)	۶/۵ ± ۰/۰۵^{b}	۶/۸ ± ۰/۰۳^{a}
اسید استئاریک (C18:0)	۲/۱ ± ۰/۰۳^{a}	۲/۲ ± ۰/۰۲^{a}
اسید اولئیک (C18:1 n9)	۱۸/۴ ± ۰/۰۵^{b}	۱۹/۴ ± ۰/۰۴^{a}
اسید لینولئیک (C18:2 n6)	۱۲/۷ ± ۰/۰۵^{a}	۱۲ ± ۰/۱^{b}
اسید α-لینولنیک (C18:3 n3)	۵۸/۹ ± ۰/۱۲^{a}	۵۶/۹ ± ۰/۱۷^{b}
اسیدهای چرب اشباع	۸/۶ ± ۰/۰۹^{b}	۹ ± ۰/۰۴^{a}
اسیدهای چرب غیراشباع	۹۰ ± ۰/۱۹^{a}	۸۸/۳ ± ۰/۲۳^{b}

مقادیر، میانگین ۳ تکرار ± انحراف استاندارد است. حروف متفاوت در هر ردیف نشان دهنده تفاوت معنی‌دار ($p < ۰/۰۵$) با آزمون دانکن است.

پایداری اکسیداسیونی: همان طوری که از شکل ۱ مشخص است؛ اعداد پراکسید و تیوباربیتوریک در نمونه ژل امولسیونی در طول دوره نگهداری به طور معنی‌داری ($p < ۰/۰۵$) افزایش یافتند. افزایش عدد پراکسید تا روز ۴۰ نگهداری با شیب کمتری صورت گرفت ولی از روز ۴۰ تا روز ۶۰ نگهداری با شیب بیشتری افزایش یافت. به طوری که در انتهای دوره ۶۰ روزه نگهداری، عدد پراکسید ۲/۵ برابر افزایش یافت. عدد تیوباربیتوریک اسید با شیب یکنواخت‌تری در طول دوره ۶۰ روز نگهداری افزایش یافت و مقدار آن در انتهای نگهداری در حدود ۲ برابر مقدار اولیه بود.



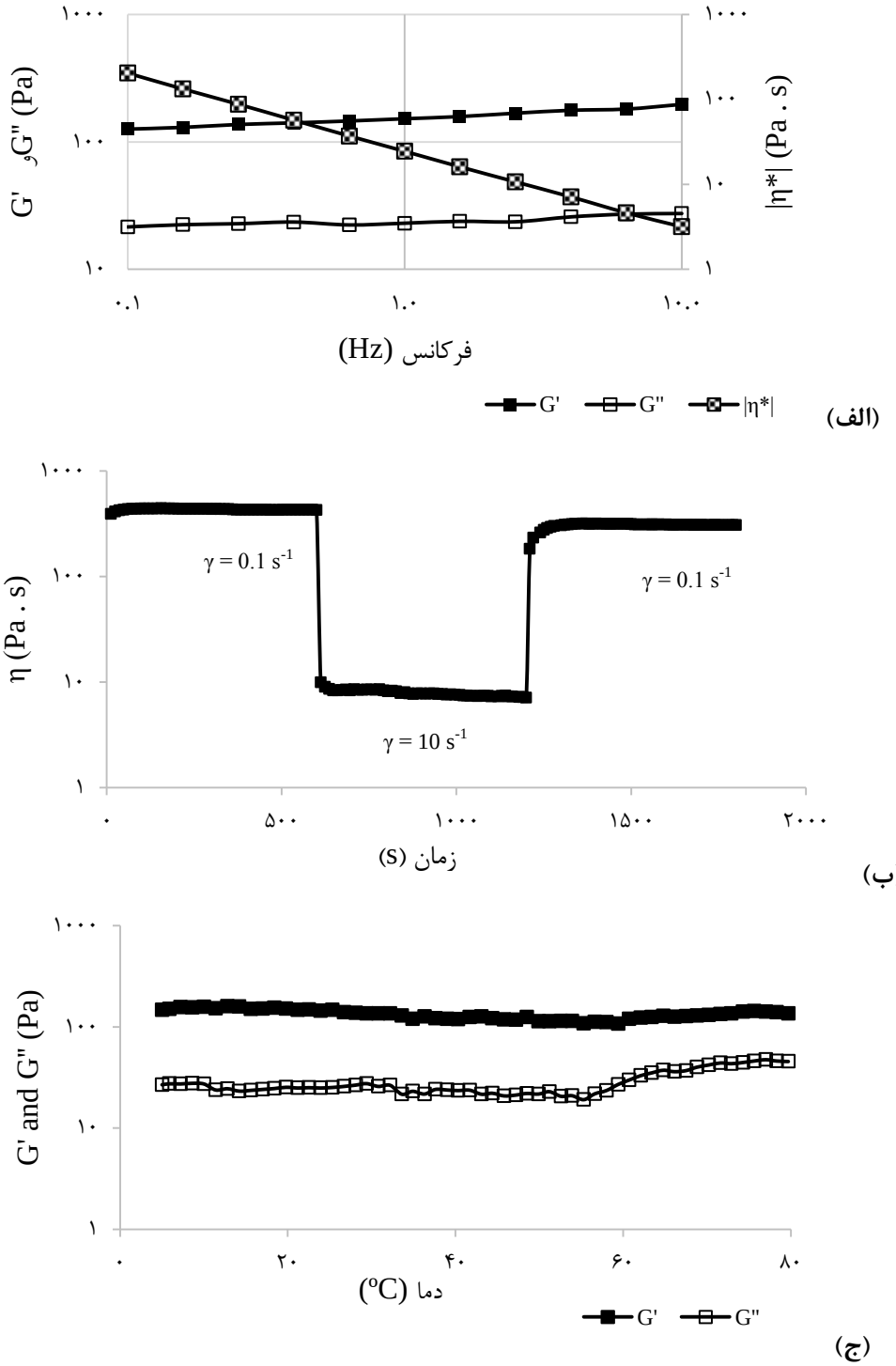
شکل ۱. (الف) عدد پراکسید و (ب) عدد تیوباربیتوریک اسید ژل امولسیونی در طول ۶۰ روز نگهداری در دمای ۴ °C (حروف متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار ($p < ۰/۰۵$) است).

ویژگی‌های رئولوژیکی ژل امولسیونی: همان طوری که از نتیجه آزمون روبش فرکانس در شکل ۲-الف مشخص است؛ ژل امولسیونی دارای مدول ذخیره (G') بزرگتر از مدول افت (G") در تمامی محدوده فرکانس مورد مطالعه (۱۰ – ۰/۱ هرتز) بود، که وابستگی کمی به فرکانس داشتند. در حالی که ویسکوزیته کمپلکس (η*) رابطه معکوس با فرکانس داشت و با افزایش فرکانس، از مقدار ویسکوزیته کمپلکس کاسته می‌شد. بررسی رفتار جریانی ژل امولسیونی توسط آزمون ۳ مرحله‌ای در سرعت‌های برشی ۰/۱ و ۱۰ s^{-1}، نشان داد که

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-04-05]

ویسکوزیته در سرعت برشی ثابت، با افزایش زمان اعمال برش، کاهش یافت. همچنین، با افزایش سرعت برشی از s^{-1} ۰/۱ به s^{-1} ۱۰، ویسکوزیته کاهش یافت. این آزمون ویژگی تیکسوتروپیک ژل امولسیونی را تأیید کرد. افزایش آنی ویسکوزیته بلافاصله پس از کاهش مجدد سرعت برشی (از s^{-1} ۱۰ به s^{-1} ۰/۱) نشان دهنده بازیابی خوب ساختار است. بازیابی ساختار برای ژل امولسیونی مورد مطالعه در حدود ۷۰٪ بود.

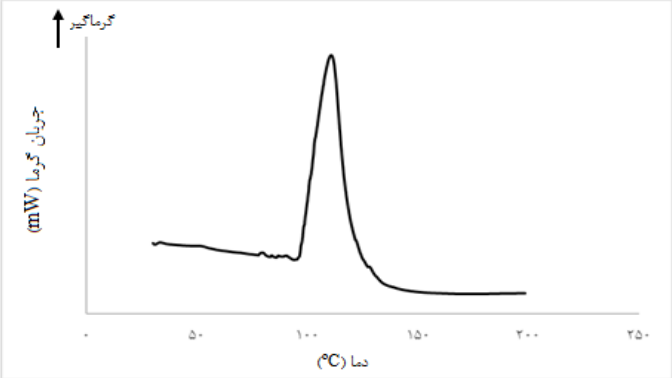
نتایج آزمون روبش دما نشان داد که در تمامی محدوده دمایی مورد مطالعه، مقادیر مدول ذخیره (G') حدود ۱۰ برابر بیشتر از مقادیر مدول افت (G") بود؛ که نشان می‌دهد ژل‌های امولسیونی در تمامی این محدوده دمایی، پایدار بودند و رفتار جامد مانند آنها تغییر نکرد. با افزایش دما نمودارهای G' و G" به یکدیگر نزدیک شدند.



شکل ۲. آزمون‌های (الف) روبش فرکانس، (ب) تیکسوتروپی و (ج) روبش دمای ژل امولسیونی

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-04-05]

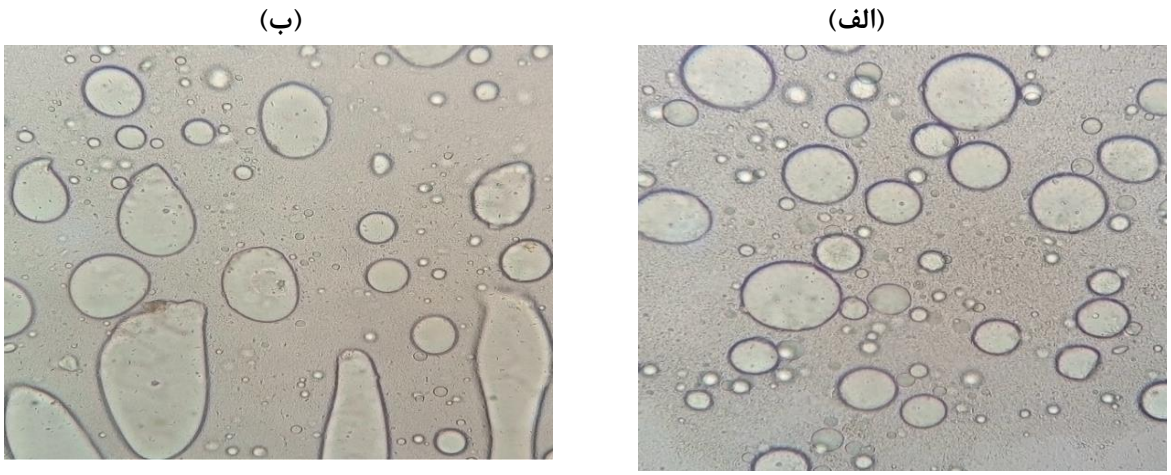
گرماسنجی روبشی تفاضلی ژل امولسیونی: همان‌طوری که از شکل ۳ مشخص است؛ منحنی DSC نمونه ژل امولسیونی یک پیک گرماگیر در محدوده ۱۱۰ °C داشت که از حدود ۹۵ °C شروع می‌شد. این نتیجه تأیید می‌کند که ژل امولسیونی در دماهای پایین پایدار است و تبدیل به سول نمی‌شود. پیک گرماگیر مشاهده شده در محدوده دمای ۱۱۰ °C می‌تواند مربوط به از دست دادن آب باشد.



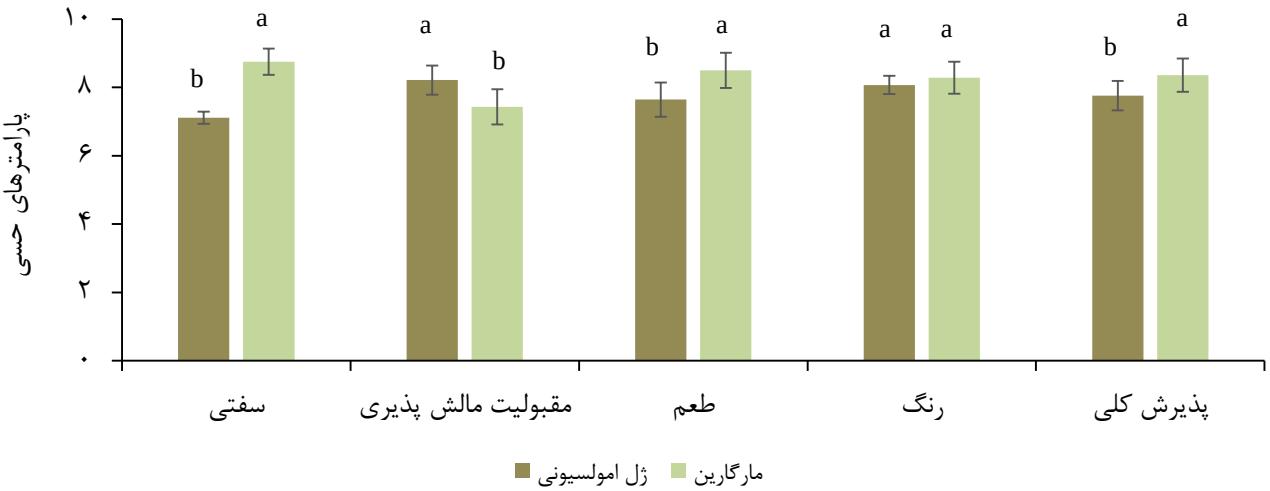
شکل ۳. منحنی DSC ژل امولسیونی

ساختار میکروسکوپیک ژل امولسیونی: ریز ساختار ژل امولسیونی تهیه شده با ترکیب هیدروکلوئیدها، در روز اول و روز ۶۰ نگهداری در شکل ۴ نشان داده است. همان طوری که از تصاویر مشخص است؛ قطرات روغن پراکنده در بستر ژلی فاز پیوسته در روز اول نگهداری نسبت به انتهای نگهداری ریزتر و بیشتر بودند. در انتهای دوره نگهداری مشاهده شد که قطرات بزرگتر و از تراکم و تعداد قطرات کاسته شده بود.

ارزیابی حسی: ژل امولسیونی تولید شده با استفاده از هیدروکلوئیدها دارای سفتی کمتری نسبت به مارگارین بود و امتیاز ۷/۱۱ را برای شدت سفتی دریافت کرد. ژل امولسیونی تولید شده به راحتی روی نان مالیده می‌شد و امتیاز ۸/۲۱ را از طرف ارزیاب‌ها برای مقبولیت مالش‌پذیری دریافت کرد. طعم و رنگ نمونه ژل امولسیونی از طرف ارزیاب‌ها مطلوب تلقی شد و به ترتیب امتیاز ۷/۶۵ و ۸/۱ را دریافت کرد.



شکل ۴. ریزساختار ژل امولسیونی (الف) در روز اول تولید و (ب) پس از ۶۰ روز نگهداری در دمای ۴ °C با بزرگنمایی ۴۰



شکل ۵. امتیازات مربوط به ارزیابی حسی ژل امولسیونی و مارگارین. (حروف متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار ($p < ۰/۰۵$) است)

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-04-05]

• بحث

ترکیب اسیدهای چرب ژل امولسیونی: مقادیر اسیدهای چرب ژل امولسیونی مشابه با مقادیر گزارش شده برای روغن بزرک بود (۱۹). با توجه به توصیه متخصصین مبنی بر دریافت نسبت متعادلی از اسیدهای چرب ضروری امگا-۶ به امگا-۳ و نیز محدودیت منابع غذایی حاوی امگا-۳ (ماهی، بزرک، گردو، کامولا، سویا و روغن‌های آنها)، ژل امولسیونی تولید شده می‌تواند به عنوانی غذایی فراسودمند برای دریافت امگا-۳، به جای دریافت مکمل‌های دارویی امگا-۳ استفاده شود (۴). از آنجایی که مقادیر کافی مصرف برای α-لینولنیک اسید برای مردان بزرگتر از ۱۴ سال g/d ۱/۶ و برای زنان بزرگتر از ۱۴ سال g/d ۱/۱ تعیین شده است و با در نظر گرفتن مقادیر بالای این اسید چرب در فاز روغنی ژل امولسیونی (بیش از ۵۰٪)، تنها مصرف مقادیر اندک از این ژل‌های امولسیونی می‌تواند نیاز روزانه به اسیدهای چرب α-لینولنیک را تأمین کند (۲۰). تلاش‌های مشابهی برای تولید مکمل‌های دارویی امگا-۳ از طریق ژل‌های امولسیونی نرم بر پایه ژلاتین صورت گرفته است. گزارش شده است که دسترسی زیستی اسیدهای چرب امگا-۳ با انتقال توسط ژل امولسیونی نسبت به کپسول‌های ژلی نرم بیشتر بود (۸). تغییر و کاهش در مقدار اسیدهای چرب چند غیراشباع لینولئیک اسید و α-لینولنیک اسید در طول نگهداری به علت حساسیت بیشتر این اسیدهای چرب به اکسیداسیون برای روغن‌های مختلفی از جمله بزرک و نیز مخلوط روغن‌های گیاهی مختلف گزارش شده است (۲۲، ۲۱).

پایداری اکسیداسیونی: از آنجایی که فاز روغنی ژل امولسیونی دارای بیش از ۹۰٪ اسید چرب غیراشباع در بین اسیدهای چرب خود بود مستعد اکسیداسیون در طول نگهداری بود. در نتیجه عدد پراکسید و عدد تیوباربیتوریک اسید که به ترتیب معیاری برای ارزیابی اکسیداسیون اولیه و اکسیداسیون ثانویه روغن‌ها هستند؛ در طول نگهداری افزایش یافتند. با وجود اینکه عدد پراکسید در پایان دوره نگهداری ۶۰ روزه ۲/۵ برابر روز تولید بود؛ ولی همچنان کمتر از حداکثر مقدار قابل قبول برای روغن‌های حاصل از پرس سرد بود ($<$۱۵ meq O_2/kg) (۲۳). یکی از علل پایداری اکسیداسیونی خوب ژل امولسیونی در طول مدت نگهداری می‌تواند به ساختار ژلی امولسیون تولید شده مربوط باشد. گزارش شده است که ژل امولسیونی می‌تواند برای انتقال اسیدهای چرب غیراشباع زیست فعال و نیز محافظت آنها از اکسیداسیون به کار برده شود (۲۴). نتایج مشابهی برای ژل‌های امولسیونی روغن زیتون بر پایه ژلاتین/آلژینات بدست آمده است. به این صورت که اکسیداسیون روغن زیتون با ژل کردن سیستم در مقایسه با امولسیون غیرژلی به تأخیر افتاد (۲۵). همچنین گزارش‌هایی مبنی بر ویژگی آنتی‌اکسیدانی صمغ‌های دانه خرنوب، کاراگینان و زانتان وجود دارد (۲۸-۲۶). هیدروکلوئیدهای آنیونی (مانند کاراگینان و زانتان) می‌توانند با شلاته کردن یون‌های فلزی با بار مثبت، پایداری اکسیداسیونی امولسیون روغن در آب را افزایش دهند. هیدروکلوئیدها قادر هستند با افزایش ویسکوزیته فاز آبی و کاهش سرعت انتقال اکسیژن به سطح قطرات روغن، اکسیداسیون را به تأخیر بیاندازند (۲۹). آنتی‌اکسیدان طبیعی افزوده شده به فاز روغنی ژل امولسیونی نیز می‌تواند در پایداری اکسیداسیونی محصول نهایی نقش داشته باشد.

ویژگی‌های رئولوژیکی ژل امولسیونی: رفتار پارامترهای ویسکوالاستیک در آزمون روبش فرکانس (بزرگتر بودن G' از G'' و شیب ملایم آنها و نیز رابطه معکوس ویسکوزیته کمپلکس با فرکانس) نشان می‌دهد که ژل امولسیونی دارای ویژگی جامد مانند و قدرت ژلی بالایی است (۱۵). حتی در مقادیر بالای فرکانس، G' و G'' همدیگر را قطع نکردند ($G'=G''$) که نشان می‌دهد ژل‌های امولسیونی از حالت ژلی به حالت سول تغییر نکردند و ژل با نیروهای داخلی نسبتاً قوی پایدار شده است (۹). نتایج مشابهی برای رفتار G' و G'' در ژل‌های امولسیونی تهیه شده با صمغ ژلان با آسیل بالا و نیز ژل‌های امولسیونی بر پایه سلولز بازساخته و صمغ کردلان با روغن آفتابگردان بدست آمده است (۳۱، ۳۰).

بازیابی ساختار در آزمون سه‌مرحله‌ای تیکسوتروپیک در ژل‌های امولسیونی در حدود ۷۰٪ بود. در نتیجه موافقی با این پژوهش، گزارش شده است که اولئوژل‌های تهیه شده با استفاده از هیدروکسی‌پروپیل متیل سلولز در ترکیب با کربوکسی‌متیل سلولز، صمغ زانتان، آلژینات سدیم، صمغ عربی، صمغ گوار، صمغ دانه بزرک، یا صمغ دانه خرنوب، ۷۰-۵۰ درصد از ساختار خود را در آزمون سه‌مرحله‌ای تیکسوتروپیک بازیافتند (۱۵). با این وجود، Patel و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که اولئوژل حاصل از هیدروکسی-پروپیل متیل‌سلولز دارای بازیابی ساختار چندانی نبود (۳۲). Lupi و همکاران (۲۰۱۵) نتایج مشابهی را با انجام آزمون روبش دما برای ژل‌های امولسیونی تهیه شده با پکتین با درجه متیلاسیون پایین و روغن زیتون گزارش کردند؛ با این تفاوت که G' و G'' در مورد ژل‌های امولسیونی تهیه شده با پکتین بعد از دمای بحرانی (حدود ۶۵-۶۰ °C) با شیب تندی کاهش یافت که می‌تواند با ذوب ژل پکتین و از هم پاشیدن امولسیون در ارتباط باشد (۳۳).

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-04-05]

گرماسنجی روبشی تفاضلی ژل امولسیونی: نتایج آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی نشان داد که ژل امولسیونی دارای دمای تبدیل ژل به سول در دماهای پایین نبود؛ که این امر دلیلی بر پایداری حرارتی ژل امولسیونی بود. پایداری حرارتی ژل امولسیونی حداقل تا دمای ۸۰ ^{o}C توسط آزمون روبش دما نیز تایید شده بود. به این صورت که در دماهای کمتر از ۸۰ ^{o}C، نمونه‌ها ذوب نشده و ویژگی الاستیک خود را حفظ کردند. در مطالعات دیگر، دو پیک اندوترم عمده در منحنی DSC مالتودکسترین گزارش شده است؛ اولی در محدوده دمای محیط تا ۱۵۰ ^{o}C و دومی در دماهای بالاتر از ۲۴۰ ^{o}C. پیک اول می‌تواند مربوط به از دست دادن آب جذب شده باشد و پیک دوم مربوط به ذوب و حتی تجزیه حرارتی نمونه باشد (۱۶). در مورد فیلم‌های حاصل از صمغ دانه خرنوب، زانتان و گلیسرول نیز پیک مشاهده شده در ۱۱۵/۶۹ ^{o}C، به تبخیر آب نسبت داده شده است (۳۴).

ساختار میکروسکوپیک ژل امولسیونی: مطالعات ریزساختار با میکروسکوپ نوری نشان می‌دهد که در انتهای دوره ۶۰ روزه نگهداری، تعدادی از قطرات با بهم پیوستن به یکدیگر، قطرات درشت‌تری را ایجاد کردند و از تعداد و تراکم آنها نسبت به روز تولید کاسته شد. تفکیک گرانشی، ادغام، انبوهش و رسیدگی استوالد مکانیسم‌هایی هستند که طی آنها، امولسیون ناپایدار شده و در موارد پیشرفت، موجب شکست امولسیون و جدا شدن فاز پراکنده می‌شوند (۳۵). پدیده ادغام تعدادی از قطرات، هر چند محدود، در مورد قطرات ژل امولسیونی در انتهای دوره نگهداری صورت گرفته بود ولی پیشرفت آن تا حدی نبود که فاز روغنی از امولسیون جدا شده و ژل روغن پس دهد.

ارزیابی حسی: سفتی و مالش‌پذیری دو ویژگی مهم برای کره، مارگارین، پخشینه و محصولات مشابه به حساب می‌آیند؛ که قابل ارزیابی با روش‌های حسی و همچنین دستگاهی هستند. سفتی حسی این محصولات مالش‌پذیر به صورت نیروی لازم برای ایجاد تغییر شکل در محصول تعریف می‌شود. مالش‌پذیری به صورت سهولت اعمال لایه نازکی از محصول با چاقو روی یک سطحی مانند نان تعریف می‌شود (۱۸). پارامترهای حسی ژل امولسیونی امتیاز بالایی را از طرف ارزیاب‌ها دریافت کردند. با وجود اینکه در فرمول ژل امولسیونی از رنگ استفاده نشده بود، ولی ژل امولسیونی به دلیل داشتن روغن بزرک در فرمول خود (دارای کاروتنوئیدها به صورت طبیعی) دارای رنگ زرد مطلوب و مشابه با کره بود. گزارش شده است که افزودن روغن بزرک به فرمولاسیون فیلم تهیه شده بر پایه امولسیون، باعث قرمزتر و زردتر شدن رنگ فیلم نهایی شد که از رنگ نارنجی-زرد روغن بزرک نشأت می‌گیرد (۳۶). با توجه به ویژگی‌های رئولوژیکی، فیزیکی-شیمیایی و حسی مطلوب ژل‌های امولسیونی و با در نظر گرفتن ظرفیت انتقال امگا-۳ توسط آن، پیشنهاد می‌شود اثرات بالینی مصرف طولانی مدت آن و نقش آن در رفع کمبود امگا-۳ و نیز اثر ممانعت کنندگی آن بر بیماری‌های قلبی و نیز چاقی مطالعه شود.

نتایج این پژوهش نشان داد که ژل امولسیونی تولید شده در بستر هیدروکلوئیدها و با استفاده از روغن بزرک، دارای پایداری اکسیداسیونی و حرارتی مطلوب، ویژگی جامد مانند، رقیق شونده با برش و تیکسوتروپیک بود. این ژل امولسیونی با داشتن مقادیر بالایی از اسید چرب α-لینولنیک در فاز روغنی خود و با محافظت از اکسیداسیون آن، حامل مناسبی برای انتقال امگا-۳ به بدن از طریق رژیم غذایی بود. با وجود اینکه قطرات پراکنده روغن در انتهای دوره نگهداری شروع به ادغام کرده بودند؛ پیشرفت پدیده تا حدی نبود که موجب ناپایداری و جدا شدن فاز روغنی شود. ویژگی‌های حسی ژل امولسیونی نیز به عنوان پخشینه و جایگزینی برای کره و مارگارین توسط ارزیاب‌ها، مطلوب تلقی شد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (شماره گرنت ۹۵۸۲۹۴۶۷) و دانشگاه تبریز انجام شده است.

• References

1. Wang Q, Afshin A, Yakoob MY, Singh GM, Rehm CD, Khatibzadeh S, et al. Impact of nonoptimal intakes of saturated, polyunsaturated, and trans fat on global burdens of coronary heart disease. Journal of the American Heart Association. 2016;5(1):e002891.
2. FAO. Fats and fatty acids in human nutrition. Report of an expert consultation, 10-14 November 2008, Geneva. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2010.
3. World Health Organization. Diet, nutrition, and the prevention of chronic diseases: report of a joint WHO/FAO expert consultation. WHO Technical Report Series, No 916. Genava: World Health Organization; 2003.
4. Simopoulos AP. The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids. Biomedicine & Pharmacotherapy. 2002;56(8):365-79.
5. Hadnađev M, Hadnađev TD, Torbica A, Dokić L, Pajin B, Krstonošić V. Rheological properties of maltodextrin based fat-reduced confectionery spread systems. Procedia Food Science. 2011;1:62-7.
6. Do VH, Mun S, Kim Y-L, Rho S-J, Park KH, Kim Y-R. Novel formulation of low-fat spread using rice starch modified by 4-α-glucanotransferase. Food Chemistry. 2016;208:132-41.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-04-05]

7. Chen F, Liang L, Zhang Z, Deng Z, Decker EA, McClements DJ. Inhibition of lipid oxidation in nanoemulsions and filled microgels fortified with omega-3 fatty acids using casein as a natural antioxidant. Food Hydrocolloids. 2017;63:240-8.
8. Haug IJ, Sagmo LB, Zeiss D, Olsen IC, Draget KI, Seternes T. Bioavailability of EPA and DHA delivered by gelled emulsions and soft gel capsules. European Journal of Lipid Science and Technology. 2011;113(2):137-45.
9. Patel AR, Rodriguez Y, Lesaffer A, Dewettinck K. High internal phase emulsion gels (HIPE-gels) prepared using food-grade components. RSC advances. 2014;4(35):18136-40.
10. Nasirpour-Tabrizi P, Azadmard-Damirchi S, Hesari J, Khakbaz Heshmati M, Savage GP. Production of a spreadable emulsion gel using flaxseed oil in a matrix of hydrocolloids. Journal of Food Processing and Preservation. 2020;44(8):e14588.
11. Goyal A, Sharma V, Upadhyay N, Singh A, Arora S, Lal D, et al. Development of stable flaxseed oil emulsions as a potential delivery system of ω-3 fatty acids. Journal of Food Science and Technology. 2015;52(7):4256-65.
12. Fathi-Achachlouei B, Azadmard-Damirchi S, Zahedi Y, Shaddel R. Microwave pretreatment as a promising strategy for increment of nutraceutical content and extraction yield of oil from milk thistle seed. Industrial crops and products. 2019;128:527-33.
13. AOCS. AOCS official method Cd 8-53. Peroxide Value—Acetic Acid-Chloroform Method. Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society. Champaign, IL: The American Oil Chemists' Society; 2000.
14. AOCS. AOCS Official method Cd 19-90. 2-Thiobarbituric acid value. Direct method. Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society. Champaign, IL: The American Oil Chemists' Society; 2007.
15. Meng Z, Qi K, Guo Y, Wang Y, Liu Y. Effects of thickening agents on the formation and properties of edible oleogels based on hydroxypropyl methyl cellulose. Food Chemistry. 2018;246:137-49.
16. Gharanjig H, Gharanjig K, Hosseinnezhad M, Jafari SM. Differential scanning calorimetry (DSC) of nanoencapsulated food ingredients. Characterization of nanoencapsulated food ingredients: Elsevier; 2020. p. 295-346.
17. Ng SP, Lai OM, Abas F, Lim HK, Tan CP. Stability of a concentrated oil-in-water emulsion model prepared using palm olein-based diacylglycerol/virgin coconut oil blends: Effects of the rheological properties, droplet size distribution and microstructure. Food research international. 2014;64:919-30.
18. Yılmaz E, Öğütcü M. Oleogels as spreadable fat and butter alternatives: Sensory description and consumer perception. Rsc Advances. 2015;5(62):50259-67.
19. Choo WS, Birch J, Dufour JP. Physicochemical and quality characteristics of cold-pressed flaxseed oils. Journal of Food Composition and Analysis. 2007;20(3-4):202-11.
20. Institute of Medicine. Dietary reference intakes for energy, carbohydrate, fiber, fat, fatty acids, cholesterol, protein, and amino acids. Washington, DC: The National Academies Press; 2005.
21. Li H, Fan Yw, Li J, Tang L, Hu Jn, Deng Zy. Evaluating and predicting the oxidative stability of vegetable oils with different fatty acid compositions. Journal of Food Science. 2013;78(4):H633-H41.
22. Hashempour-Baltork F, Torbati M, Azadmard-Damirchi S, Savage GP. Quality properties of sesame and olive oils incorporated with flaxseed oil. Advanced Pharmaceutical Bulletin. 2017;7(1):97.
23. Codex Alimentarius. Standard for named vegetable oils-CXS 210-1999. Codex Alimentarius. 2019.
24. Lu Y, Mao L, Hou Z, Miao S, Gao Y. Development of Emulsion Gels for the Delivery of Functional Food Ingredients: from Structure to Functionality. Food Engineering Reviews. 2019:1-14.
25. Sato A, Moraes K, Cunha R. Development of gelled emulsions with improved oxidative and pH stability. Food Hydrocolloids. 2014;34:184-92.
26. Sun C, Gunasekaran S, Richards MP. Effect of xanthan gum on physicochemical properties of whey protein isolate stabilized oil-in-water emulsions. Food Hydrocolloids. 2007;21(4):555-64.
27. Zhang B, Fang CD, Hao GJ, Zhang YY. Effect of kappa-carrageenan oligosaccharides on myofibrillar protein oxidation in peeled shrimp (Litopenaeus vannamei) during long-term frozen storage. Food Chemistry. 2018;245:254-61.
28. Sęczyk Ł, Świeca M, Gawlik-Dziki U. Effect of carob (Ceratonia siliqua L.) flour on the antioxidant potential, nutritional quality, and sensory characteristics of fortified durum wheat pasta. Food Chemistry. 2016;194:637-42.
29. Paraskevopoulou D, Boskou D, Paraskevopoulou A. Oxidative stability of olive oil–lemon juice salad dressings stabilized with polysaccharides. Food Chemistry. 2007;101(3):1197-204.
30. Jiang Y, Liu L, Wang B, Yang X, Chen Z, Zhong Y, et al. Polysaccharide-based edible emulsion gel stabilized by regenerated cellulose. Food Hydrocolloids. 2019;91:232-7.
31. Lorenzo G, Zaritzky N, Califano A. Rheological analysis of emulsion-filled gels based on high acyl gellan gum. Food Hydrocolloids. 2013;30(2):672-80.
32. Patel AR, Schatteman D, Lesaffer A, Dewettinck K. A foam-templated approach for fabricating organogels using a water-soluble polymer. Rsc Advances. 2013;3(45):22900-3.
33. Lupi FR, Gabriele D, Seta L, Baldino N, de Cindio B, Marino R. Rheological investigation of pectin-based emulsion gels for pharmaceutical and cosmetic uses. Rheologica Acta. 2015;54(1):41-52.
34. Kurt A, Toker OS, Tornuk F. Effect of xanthan and locust bean gum synergistic interaction on characteristics of biodegradable edible film. International Journal of Biological Macromolecules. 2017;102:1035-44.
35. Gharibzahedi SMT, Mousavi SM, Hamedi M, Khodaiyan F, Razavi SH. Development of an optimal formulation for oxidative stability of walnut-beverage emulsions based on gum arabic and xanthan gum using response surface methodology. Carbohydrate Polymers. 2012;87(2):1611-9.
36. Hopkins EJ, Chang C, Lam RS, Nickerson MT. Effects of flaxseed oil concentration on the performance of a soy protein isolate-based emulsion-type film. Food Research International. 2015;67:418-25.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-04-05]

Investigation of the Characteristics of Omega-3 Enriched Emulsion Gels Using Water-soluble Hydrocolloids and Flaxseed Oil

Jalilzadeh A[1], Nasirpour-Tabrizi P[2], Azadmard-Damirchi S[3], Hesari J[3], Khakbaz Heshmati M[3]*

*1- *Corresponding author: Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Maku Branch, Islamic Azad University, Maku, Iran. Email: jalilzadeh1387@gmail.com*

2- PhD Graduate, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received 5 Dec, 2020 **Accepted 18 Mar, 2021**

Background and Objectives: With public awareness of the dangers of consuming too much saturated and Trans fatty acids, as well as the importance of taking essential fatty acids through the diet, consumption of healthier products increases. It is noteworthy that decreases of solid fats as well as total fat affect characteristics of the final products. The aim of this study was to assess the physicochemical, rheological and sensory characteristics of low-fat emulsion gels rich in omega-3 essential fatty acids as spread and healthier alternatives to butter and margarine.

Materials & Methods: In this study, emulsion gels were prepared using Locust bean gum, carrageenan, xanthan and maltodextrin and flaxseed oil as a rich source of omega-3 essential fatty acids. During 60 days of storage, fatty acid composition, oxidation stability, rheological characteristics, differential scanning calorimetry and microstructure were investigated. Sensory attributes of the emulsion gels as substitutes for butter and margarine were evaluated using sensory analysis.

Results: Emulsion gels included acceptable oxidative and thermal stability, solid-like attribute, shear thinning and thixotropic. Although the dispersed oil droplets coalesced at the end of the storage, the phenomenon did not continue since it caused instability and separation of the oil phase. Sensory attributes were reported as desirable.

Conclusion: Prepared emulsion gels using water-soluble hydrocolloids and flaxseed oil containing lower total fat and saturated fatty acids can be used as healthier alternatives to butter and margarine as well as carriers for omega-3 essential fatty acids.

Keywords: Rheology, Emulsion gel, Flaxseed oil, Omega-3

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-04-05]