



کاربرد اولئوژل‌های حاوی ترکیبات زیست‌فعال طبیعی در صنایع غذایی و دارویی

فاطمه یوسفی قمیشلو^۱، مهدی طبرسا^{۱،۲*}، نفیسه سادات موسوی^۱، فاطمه رمضان^۱

۱- گروه فراوری محصولات شیلاتی، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
۲- گروه ترکیبات زیست‌فعال، دانشکده علوم و فناوری‌های بین رشته‌ای، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

*صندوق پستی: ۱۵۴-۱۴۱۱۵، تهران، ایران
m.tabarsa@modares.ac.ir

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

چکیده

این پژوهش به بررسی جامع و تحلیلی پیشرفت‌های اخیر در زمینه طراحی، تولید، مشخصه‌یابی و کاربرد اولئوژل‌های حاوی ترکیبات زیست‌فعال طبیعی در صنایع غذایی می‌پردازد. مطالعه حاضر با مرور نظام‌مند پژوهش‌های انجام‌شده، روش‌های گوناگون به‌دام‌اندازی ترکیبات زیست‌فعال در ماتریس اولئوژل را بررسی کرده و تأثیر این ترکیبات بر خواص فیزیکی و پایداری اولئوژل‌ها را تحلیل می‌کند. اولئوژل‌ها به‌عنوان سامانه‌های ساختاردهی‌شده مبتنی بر فاز روغنی، قابلیت بالایی در حفظ پایداری، افزایش ویژگی‌های عملکردی و ارتقای ارزش تغذیه‌ای محصولات غذایی دارند. این سامانه‌ها به‌طور مؤثری امکان کپسوله‌سازی و انتقال ترکیبات زیست‌فعالی همچون پلی‌فنول‌ها، اسیدهای چرب امگا ۳، ویتامین‌های محلول در چربی، اسیدهای آمینه ضروری، اسانس‌های طبیعی و پروتئین‌ها را فراهم کرده و از آن‌ها در برابر تخریب اکسیداتیو و شرایط نامساعد دستگاه گوارش محافظت می‌کنند. کاربرد اولئوژل‌ها در فرآورده‌هایی مانند محصولات نانوائی و گوشتی، ضمن حفظ ویژگی‌های رئولوژیکی، بافتی و فیزیکوشیمیایی، به بهبود شاخص‌های تغذیه‌ای منجر شده است. همچنین، این رویکردها موجب افزایش فراهمی زیستی، رهایش کنترل‌شده و پایداری ترکیبات زیست‌فعال، و نیز افزایش عمر ماندگاری اولئوژل‌ها می‌شود. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، چالش‌هایی نظیر بهینه‌سازی فرایند اولئوژلاسیون، کنترل ویژگی‌های ساختاری و افزایش مقیاس‌پذیری صنعتی همچنان مطرح است. بنابراین، انجام پژوهش‌های هدفمند به‌منظور رفع محدودیت‌های موجود و توسعه کاربردهای صنعتی این سامانه‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

کلمات کلیدی: اولئوژل، ترکیبات زیست‌فعال، جایگزین چربی، ویژگی‌های عملکردی

۱- مقدمه

۲- جایگزین‌های چربی

ترکیب منحصربه‌فرد و خواص فیزیکوشیمیایی چربی‌های جامد، شامل پایداری ساختاری، رفتار ذوب کنترل‌شده، و توانایی ایجاد قوام و بافت مطلوب، سبب شده است که این مواد به‌عنوان اجزای کلیدی در فرمولاسیون‌های مختلف صنایع غذایی، آرایشی بهداشتی و دارویی به‌طور گسترده مورد بهره‌برداری قرار گیرند [۱]. با این وجود، میزان بالای چربی‌های اشباع و ترانس در فرمولاسیون‌های حاوی این فراورده‌ها به شدت با بیماری‌های قلبی-عروقی و سایر اختلالات متابولیک، از جمله چاقی و دیابت نوع ۲ مرتبط است [۲]. استراتژی‌های مختلفی با هدف جایگزینی چربی‌های ترانس و اشباع با مواد تشکیل‌دهنده زیستی سالم‌تر، مانند صمغ‌ها، پلی‌دکستروز، نشاسته، سلولز، آب پنیر، لاکتوگلوبولین‌ها، سفیده تخم‌مرغ، سویا و سایر موارد مورد بررسی و استفاده قرار گرفته است [۳]. با این حال، یک نقص رایج این جایگزین‌ها، ناتوانی آن‌ها در تکرار خواص حسی چربی‌های جامد سنتی است که اغلب انتظارات مصرف‌کننده را برآورده نمی‌کند و منجر به نارضایتی از محصول نهایی می‌شود [۴]. این محدودیت‌ها نشان می‌دهند که توسعه‌ی سامانه‌های جایگزین چربی صرفاً به ایجاد ساختار و بافت مشابه چربی‌های متداول محدود نمی‌شوند، بلکه این سامانه‌ها باید بتوانند کارکردهای تغذیه‌ای و زیست‌فعال نیز ارائه دهند. در این راستا، صنایع غذایی به‌دلیل پتانسیل ترکیبات زیست‌فعال برای ادغام در محصولات غذایی، به‌ویژه با هدف فراهم کردن مزایای سلامت‌بخش فراتر از نیازهای تغذیه‌ای پایه انسانی، توجه روزافزونی به این ترکیبات نشان داده‌اند. ترکیبات زیست‌فعال، از جمله پلی‌فنول‌ها، کاروتنوئیدها، اسیدهای چرب امگا-۳، امگا-۶ و امگا-۹ و ویتامین‌ها، به‌دلیل توانایی بالقوه خود در کاهش التهاب و استرس اکسیداتیو و همچنین حمایت از سلامت شناختی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۵]. از این رو، این ترکیبات به یکی از اجزای کلیدی در توسعه غذاهای عملکردی تبدیل شده‌اند. با این حال، از آنجا که ترکیبات زیست‌فعال ممکن است در حین فرایند تولید و نگهداری تخریب شوند، افزودن آن‌ها به مواد غذایی با برخی چالش‌ها همراه است [۶].

به‌طور کلی، جایگزین‌های چربی در صنعت غذا به دو دسته اصلی جایگزین‌های چربی^۱ و تقلیدکننده‌های چربی^۲ تقسیم می‌شوند [۷]. جایگزین‌های چربی، سیستم‌های کلوئیدی مبتنی بر لیپیدهای گیاهی هستند که با اصلاح فراوری، بافتی مشابه چربی‌های معمولی ایجاد می‌کنند. این سیستم‌ها ضمن حفظ ساختار لیپیدی، ویژگی‌های رئولوژیکی مانند قوام و رفتار ذوب را بازتولید کرده و همزمان از طریق اصلاح ترکیب اسیدهای چرب، ارزش تغذیه‌ای بهتری فراهم می‌سازند، در مقابل، تقلیدکننده‌های چربی از مواد غیرلیپیدی تشکیل شده‌اند و صرفاً ویژگی‌های حسی چربی را شبیه‌سازی می‌کنند. این گروه شامل سیستم‌های مبتنی بر کربوهیدرات (مانند نشاسته اصلاح‌شده و اینولین)، مبتنی بر پروتئین (مانند میکروژل‌های پروتئینی) و سیستم‌های کامپوزیتی (نظیر کمپلکس‌های پروتئین-پلی‌ساکارید) است [۸]. تفاوت اصلی این دو دسته در حضور یا عدم حضور لیپید است؛ جایگزین‌های چربی می‌توانند عملکردهای قطبی و غیرقطبی چربی را بازتولید کنند، در حالی که تقلیدکننده‌ها عمدتاً از طریق اتصال آب، بافت چربی را تقلید کرده و قادر به ایفای نقش‌هایی مانند انتقال حرارت یا حمل ترکیبات طعمی نیستند [۹]. از این رو، تمرکز پژوهش‌های اخیر بر توسعه جایگزین‌های ساختارمند با عملکرد لیپیدی و چگالی کالری پایین معطوف شده است. در همین راستا امروزه، سیستم‌های ژل-مولسیون^۳ به‌عنوان ترکیباتی امیدوارکننده برای جایگزینی چربی جامد در صنایع غذایی، با هدف کاهش اثرات نامطلوب چربی‌های جامد بر سلامت انسان، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. این سیستم‌ها که به‌عنوان اولئوژل^۴ نیز شناخته می‌شود، شامل مواد جامد ساختار یافته با مقدار زیادی روغن محبوس شده در یک شبکه سه‌بعدی از مولکول‌های ژلاتور تعریف می‌شوند جایگزین سالمی برای چربی‌ها هستند [۱۰]. طبق تعریف، یک اولئوژل حداقل از

¹ Fat replacers² Fat mimetics³ Gel-emulsion⁴ Oleogel

کیفیت حسی مطلوب را حفظ کنند و خشکی و سفتی ناشی از افزودن پودرهای پروتئینی کاهش دهند [۴-۱].

۳- طبقه‌بندی ترکیبات زیست‌فعال در اولئوژل (بر اساس حالیت)

ترکیبات زیست‌فعال بارگذاری‌شده در اولئوژل‌ها را می‌توان بر اساس حالیت و رفتار آنها در روغن/آب، به سه گروه اصلی تقسیم کرد (شکل ۱):

الف) ترکیبات آگریز (لیپوفیل): این ترکیبات به دلیل سازگاری ترمودینامیکی با فاز روغنی، به آسانی درون شبکه اولئوژل جای می‌گیرند و نیازی به حامل واسط ندارند. شواهد حاکی از آن است که بیشتر مطالعات منتشرشده بر روی این دسته متمرکز شده‌اند [۱۴].

ب) ترکیبات آب‌دوست (هیدروفیل): بارگذاری این ترکیبات به دلیل دافعه با فاز پیوسته روغنی، نیازمند راهکارهای واسطه‌ای مانند ریزپوشانی در ماتریکس عامل ژل‌کننده یا تشکیل سیستم بایژل^۵ است.

ج) ترکیبات آمفی‌فیل: این گروه نه تنها به عنوان ترکیب زیست‌فعال عمل می‌کنند، بلکه گاهی به عنوان عامل ژل‌کننده یا تثبیت‌کننده شبکه نیز ظاهر می‌شوند [۱۵]. این طبقه‌بندی مستقیماً تعیین می‌کند که از کدام روش بارگذاری باید استفاده شود.

۴- طبقه‌بندی اولئوژل‌ها بر اساس ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی

طبقه‌بندی فیزیکوشیمیایی اولئوژل‌ها، مبتنی بر تحلیل هم‌زمان ساختار در سه مقیاس نانو، میکرو و ماکرو است که هر یک با روش‌های تحلیلی متناسب خود قابل بررسی هستند و در مجموع تصویری جامع از رفتار این سامانه‌های پیچیده ارائه می‌دهند. در مقیاس نانومتری، واحدهای بنیادی سازنده و برهم‌کنش‌های مولکولی تشکیل‌دهنده شبکه‌ی ژل، مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

این برهم‌کنش‌ها که عمدتاً شامل پیوندهای هیدروژنی درون مولکولی و بین مولکولی، نیروهای واندروالس و برهم‌کنش‌های آب‌گریز هستند، با استفاده از طیف‌سنجی

دو جزء تشکیل شده است؛ عامل ژل‌کننده (ژلاتور)^۱ که تحرک مولکولی کمتری دارد، و حلال که رفتار مایع از خود نشان می‌دهد. ماهیت شیمیایی حلال، که می‌تواند قطبی یا غیرقطبی باشد، تعیین‌کننده دو دسته اصلی ژل‌های امولسیون است، که شامل هیدروژل‌ها^۲ (برای فازهای آبی) و ارگانوژل‌ها^۳ (برای فازهای آلی یا حلال‌های غیرقطبی) هستند. هنگامی که فاز آلی مورد استفاده، روغن خوراکی باشد، ارگانوژل را اولئوژل می‌نامند. در کاربردهای غذایی و دارویی، روغن‌های خوراکی متداولی نظیر روغن کانولا، روغن زیتون و روغن آفتابگردان به عنوان حلال برای تهیه اولئوژل‌ها به کار می‌روند [۱۱]. علاوه بر این، ژلی که از ترکیب دو ژل مجزا حاصل شود، بیوژل (یا بیگل)^۴ نامیده می‌شود. بیوژل اساساً یک سیستم نیمه‌جامد دو فازی است که از دو ژل متمایز تشکیل شده است. در این ساختار، ژل‌هایی با قطبیت‌های متفاوت، معمولاً یک هیدروژل و یک اولئوژل، ترکیب می‌شوند [۱۲]. در این سیستم، اولئوژل می‌تواند نقش فاز پراکنده را ایفا کند. در حالی که، هیدروژل فاز پیوسته را تشکیل می‌دهد، یا بالعکس. این ژل ترکیبی، خواص کلیدی هر دو نوع هیدروژل و اولئوژل را در خود ادغام کرده و آن را به یک سیستم چندمنظوره برای انتقال عوامل لیپوفیلیک و هیدروفیلیک تبدیل می‌کند. انواع ژلاتورها شامل انواع موم‌ها (موم زنبور عسل، موم برنج، موم کارنوبا)، مونوگلیسریدها، اسیدهای چرب، استرول‌های گیاهی و استرها و فاز حلال، شامل انواع مختلف روغن‌های گیاهی است [۱۳]. مکانیسم عمل این سیستم‌ها به این صورت است که ژلاتورها با تشکیل یک شبکه پیوسته سه‌بعدی، روغن را در ساختار خود به دام می‌اندازند و از مهاجرت و خروج آن در طی فرایندهای پخت و نگهداری جلوگیری می‌کنند. این ویژگی نه تنها باعث پایداری سیستم می‌شود، بلکه ویژگی‌های حسی مشابه چربی در محصول نهایی ایجاد می‌کند. در نهایت این ساختارها می‌توانند با شبیه‌سازی عملکرد چربی‌های جامد، بدون استفاده از اسیدهای چرب اشباع، بافتی نرم و مرطوب ایجاد کرده،

¹ Gelator

² Hydrogels

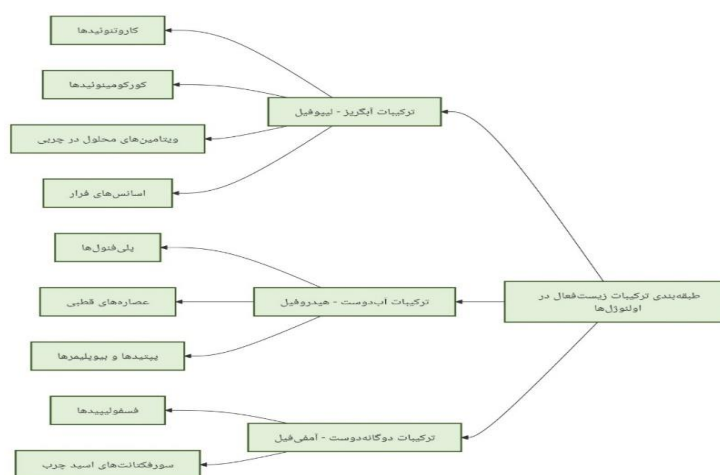
³ Organogels

⁴ Biogel (Bigel)

⁵ Bigel

اولئوژل‌ها به‌عنوان یک پارامتر وابسته به شرایط محیطی در هر سه مقیاس ساختاری قابل بررسی است و ویژگی ثابتی محسوب نمی‌شود. این پارامتر به ترکیب شیمیایی ساختاردهنده، نوع روغن گیاهی و شرایط فرایند (دما، سرعت سرمایش و اعمال برش) وابسته است [۱۹]. در سیستم‌های پروتئینی و پلی‌ساکاریدی، بار سطحی تابعی از pH و قدرت یونی بوده و بر پایداری امولسیون و استحکام نهایی ژل تأثیر می‌گذارد. همچنین، ترکیب اسیدهای چرب روغن (طول زنجیره‌ی کربنی و سطح غیراشباعیت) از عوامل مؤثر بر خواص اولئوژل و رفتار آن در ماتریس‌های غذایی محسوب می‌شود [۲۰]. در نتیجه، طبقه‌بندی فیزیکوشیمیایی اولئوژل‌ها باید بر اساس هر سه مقیاس ساختاری انجام شود و بار سطحی به‌عنوان پارامتری وابسته به شرایط محیطی در نظر گرفته شود. این رویکرد چندبعدی برای طراحی اولئوژل‌های مناسب با خواص مطلوب و کاربرد موفق در محصولات غذایی ضروری بوده و می‌تواند به توسعه‌ی محصولات جدید با مشخصات تغذیه‌ای بهبودیافته کمک شایانی کند.

۵- روش‌های بارگذاری ترکیبات زیست‌فعال در اولئوژل‌ها



شکل ۱ طبقه‌بندی ترکیبات زیست‌فعال در اولئوژل‌ها

تبدیل فوریه مادون‌قرمز (FTIR) و پراش پرتو ایکس (XRD) قابل شناسایی و بررسی می‌باشند [۱۶]. در واقع، ساختارهای اولیه (مقیاس آنگستروم تا نانومتر) و پیوندهای بین اتم‌ها را می‌توان در مقیاس نانومتری تعیین کرد؛ زیرا پارامترهای هندسی آن‌ها مانند مساحت سطح و حجم، مستقیماً تحت تأثیر سرعت خنک‌شدن و برش در طول ژل‌شدن قرار می‌گیرند [۱۷]. در مقیاس میکرومتری، ریخت‌شناسی تجمعات شامل میسل‌ها، وزیکول‌ها، فیبریل‌ها، کریستال‌ها و ساختارهای لوله‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد که حاصل خودآرایی واحدهای نانومقیاس هستند. این تجمعات با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) قابل مشاهده هستند. در این سطح، رابطه‌ی مستقیم بین اندازه و ریخت‌شناسی کریستال‌ها با استحکام نهایی ژل به اثبات رسیده است، به‌گونه‌ای که کریستال‌های ریزتر با توزیع یکنواخت‌تر، شبکه‌های فشرده‌تر و محکم‌تری ایجاد می‌کنند [۱۶]. ژل حاصل در این محدوده تا مقیاس میلی‌متری قابل مشاهده است و به پیچیدگی شبکه‌ها اشاره دارد که با روغن مایع را به دام می‌اندازد یا ژلاتور را از محلول رسوب می‌دهند؛ خواص فیزیکوشیمیایی و حسی اولئوژل حاصل در این حوزه بسیار مهم و مورد توجه است [۱۸]. بار سطحی

دو گروه اصلی، روش‌های مخصوص ترکیبات آلی‌گیز و روش‌های مخصوص ترکیبات آب‌دوست تقسیم کرد [۲۱].

انتخاب روش بارگذاری بر پایداری ساختاری اولئوژل و الگوی رهایش تأثیر می‌گذارد و می‌توان این روش‌ها را به

۵-۱ روش‌های مخصوص ترکیبات آگریز

۵-۱-۱ حل مستقیم

در این روش، ترکیب زیست‌فعال پیش از افزودن عامل ژل‌کننده، در روغن مایع حل می‌شود؛ این فرایند گاهی در دمای بالا انجام می‌شود. این روش، ساده‌ترین شیوه بارگذاری ترکیبات زیست‌فعال در اولئوژل‌ها است، اما برای ترکیبات حساس به حرارت، مانند بتاکاروتن، در دماهای بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند خطر تخریب را افزایش دهد. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای [۲۲] کورکومین به همراه موم سبوس برنج در روغن ذرت در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد حل شد. نتایج نشان داد که افزودن کورکومین منجر به افزایش سختی و آنتالپی ذوب اولئوژل شد؛ با این حال، در غلظت‌های بالای کورکومین (بیش از ۵۰ درصد) شبکه کریستالی تضعیف شد.

۵-۱-۲ پراکندگی به کمک حلال آلی

در این روش، ترکیب ابتدا در اتانول یا استون حل می‌شود، با روغن مخلوط می‌شود و سپس حلال تبخیر می‌شود. در پژوهشی [۲۳] از این روش برای واردسازی عصاره فنولی خردل در روغن آفتابگردان استفاده شد.

۵-۱-۳ تثبیت به کمک عامل ژل‌کننده یا سورفکتانت

در این روش، یک سورفکتانت (مانند PGPR) یا یک عامل ژل‌کننده (مانند لسیتین) به مخلوط اضافه می‌شود تا پراکندگی ترکیب آگریز را تسهیل کند. مطالعات نشان دادند که افزودن PGPR در اولئوژل حاوی رسوراترول (بر پایه β -سیتوسترول/لسیتین) باعث افزایش مدول الاستیک و ظرفیت نگهداری روغن می‌شود [۲۴].

۵-۱-۴ روش قالب امولسیون (روش غیرمستقیم)

ابتدا یک امولسیون روغن در آب (O/W) تهیه می‌شود که فاز روغنی حاوی ترکیب زیست‌فعال است. سپس، فاز آبی با خشک کردن انجمادی حذف شده و اولئوژل متخلخل به جا می‌ماند. این روش برای ترکیبات حساس به حرارت ایده‌آل است. در پژوهشی [۲۵] با استفاده از روش قالب امولسیون با فاز داخلی بالا (HIPE) و کمپلکس سدیم کازینات-کوئرتستین، اولئوژلی با ظرفیت نگهداری روغن

بالای ۹۹٫۹ درصد و فعالیت آنتی‌اکسیدانی چشمگیر تولید کردند.

۵-۲ روش‌های مخصوص ترکیبات آب‌دوست

۵-۲-۱ ریزپوشانی مستقیم در ماتریکس عامل ژل‌کننده

ترکیب آب‌دوست در فاز آبی حل شده، با عامل ژل‌کننده مذاب (مثلاً موم زنبور عسل) و لسیتین مخلوط می‌شود تا امولسیون آب در روغن (W/O) تشکیل شود. پس از خشک کردن انجمادی، یک عامل ژل‌کننده بارگذاری شده به دست می‌آید، که در روغن گرم حل شده و طی سرد شدن، اولئوژل نهایی را می‌سازد. در پژوهشی [۲۶] با این روش پلی‌فنول چای را در اولئوژل موم زنبور عسل وارد کردند.

۵-۲-۲ تشکیل کمپلکس پلیمری

پروتئین (مثل سفیده تخم‌مرغ) با پلی‌ساکارید (مثل زانتان) در حضور ترکیب آب‌دوست، یک کمپلکس برهمکنش‌دهنده تشکیل می‌دهد. این کمپلکس بعد از لیوفیلیزاسیون، به‌عنوان عامل ساختاری در روغن پراکنده می‌شود. در پژوهشی مرتبط [۲۷]، گالیک اسید از طریق این مسیر در ساختار اولئوژل وارد شد. نتایج نشان داد که این فرایند موجب کاهش اندازه قطرات، افزایش پتانسیل زتا و بهبود چشمگیر پایداری اکسیداتیو در مقایسه با اولئوژل بدون کمپلکس بود.

۵-۲-۳ سیستم بایژل

در این روش، ترکیب آب‌دوست درون هیدروژل (برای مثال، ژلاتین ماهی) بارگذاری می‌شود و ترکیب آگریز درون اولئوژل (مثلاً لسیتین/روغن آفتابگردان)، سپس دو فاز با نسبت مشخص مخلوط می‌شوند. گزارشات علمی موجود [۲۸] نشان دادند که تغییر نسبت اولئوژل به هیدروژل از ۷:۳ به ۳:۷، رهایش کاتچین (آب‌دوست) را از حدود ۵۳ درصد به بیش از ۷۰ درصد افزایش می‌دهد. در حالی که، رهایش کوئرتستین (آگریز) روند معکوس دارد. این ویژگی، بایژل را به سکویی قدرتمند برای رهایش کنترل‌شده و هم‌زمان دو ترکیب با حلالیت متفاوت تبدیل می‌کند.

۶- کاربردهای اولئوژل‌ها در صنایع غذایی و دارویی

۶-۱ کاربردهای صنایع غذایی

در پژوهش‌های اخیر به‌طور گسترده‌ای، ترکیبات زیستی مختلف مانند پروتئین‌ها (نظیر ایزوله پروتئین سویا و پروتئین آب‌پنیر)، پلی‌ساکاریدها (مانند پکتین، آلژینات و کاراگینان) و همچنین ساختارهای ترکیبی حاصل از آن‌ها، در فرمولاسیون اولئوژل‌های پایدار و دارای کاربرد صنعتی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند [۲۹]. برای مثال، یک تهیه‌شده با اولئوژل قالب HIPE حاوی کوئرستین [۲۵] ضمن ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بالا، کاهش سختی و حفظ حجم مخصوص را نشان داد. همچنین، مافین حاوی بتاکاروتن (۰,۰۲ درصد) در اولئوژل موم کاندلیلا / GMS [۳۰] پس از ۱۴ روز عدد پراکسید به مراتب پایین‌تری نسبت به روغن خالص داشت. نتایج حاصل از مطالعات مختلف حاکی از آن است که ژل‌های امولسیون، در صناعی چون تولید آنالوگ‌های گوشت، محصولات نانویی و فراورده‌های لبنی پتانسیل کاربردی قابل توجهی دارند. در فراورده‌های گوشتی نیز نتایج قابل توجهی گزارش شده است: برگر گوشت خوک حاوی کورکومین (۰,۲ درصد) در اولئوژل موم زنبور عسل [۳۱] پس از پخت، TBARS را تا ۵۰ درصد نسبت به چربی حیوانی کاهش داد. همچنین، ناگت مرغ سرخ شده با پوشش اولئوژل حاوی اسانس آویشن (۲ درصد) و موم کارنائوبا [۳۲] نصف شدن عدد پراکسید و کاهش چشمگیر جذب روغن حین سرخ شدن را به همراه داشت. این سامانه‌ها نه تنها به بهبود ویژگی‌های بافتی و حسی محصولات نهایی کمک می‌کنند، بلکه منجر به ارتقاء پروفایل لیپیدی آن‌ها نیز می‌شوند [۳۳]. علاوه بر کاربردهای ذکرشده، اولئوژل‌ها به‌طور گسترده در محصولات نانویی مانند کیک اسفنجی نیز استفاده شده‌اند. مطالعات نشان داده است که جایگزینی ۷۵ تا ۱۰۰ درصد مارگارین با اولئوژل موم کاندلیلا/روغن کانولا، ضمن بهبود ویژگی‌های حسی و ریخت‌شناسی، منجر به افزایش مطلوبیت عطر و کاهش حس چرب‌بودن دهان در کیک اسفنجی شده است [۳۴]. متغیرهای متعددی، از جمله جنس دیواره، نسبت روغن به آب، فرایند کپسوله‌سازی و شرایط pH می‌توانند بر ویژگی‌های عملکردی سیستم اولئوژل نهایی تأثیر بگذارند [۳۵]. با این حال، بیش از ۹۰ درصد مطالعات کنونی در

سطح برون‌تنی (شبیه‌سازهای گوارش) انجام شده و فقدان داده‌های بالینی بر روی انسان، یکی از موانع اصلی برای اثبات ادعاهای سلامت‌بخشی و اخذ تأییدیه‌های قانونی است. به‌طور کلی، پیشرفت در توسعه جایگزین‌های چربی مبتنی بر ترکیبات زیست‌فعال مستلزم رفع چند شکاف تحقیقاتی اساسی است. برای پیشرفت در این حوزه، درک عمیق مکانیسم‌های مولکولی مونتاژ و رفتار این سیستم‌ها با روش‌های پیشرفته ضروری است. همچنین، ارزیابی‌های جامع درباره ایمنی، پایداری اکسیداتیو، سرنوشت گوارشی، اثرات متابولیکی و تحلیل چرخه عمر زیست‌محیطی هنوز ناکافی است. از نظر ساختاری نیز سهم شبکه‌های بیوپلیمری در برابر قطرات تجمع‌یافته و همچنین تقلید بو و رهایش طعم به‌خوبی روشن نشده و نیازمند روش‌های ارزیابی حسی استاندارد است [۳۶].

۶-۲ کاربردهای صنایع دارویی

اولئوژل‌ها به‌دلیل ماهیت لیپیدی و توانایی بالای خود در به دام انداختن ترکیبات آبریز، به‌عنوان سامانه‌های نویدبخش برای تحویل داروهای نامحلول در آب (مانند کورکومین، بتاکاروتن و رزوراترول) در نظر گرفته می‌شوند [۳۴]. نتیجه مطالعات برون‌تنی متعدد نشان داده است که اولئوژل‌ها می‌توانند فراهمی زیستی این ترکیبات را در طی هضم شبیه‌سازی‌شده به‌طور قابل توجهی افزایش دهند [۳۷]. به‌عنوان نمونه، اولئوژل حاوی مخلوط بتاسیتوسترول و لسیتین نشان داده است که می‌تواند رسوراترول را با راندمان بالا کپسوله کرده و از تخریب اکسیداتیو آن در شرایط شبیه‌سازی‌شده گوارش جلوگیری کند [۱۴]. همچنین، اولئوژل‌های تهیه‌شده از طریق روش قالب امولسیون و بایژل‌ها، به‌عنوان سامانه‌های سدیم-جامد دو فازی، پتانسیل بالایی برای کاربردهای دارویی عرضه و انتقال همزمان ترکیبات آبریز و آب‌دوست نشان داده‌اند [۲۱]. با این حال، پژوهش‌ها نشان می‌دهند که مطالعات در زمینه کاربردهای دارویی اولئوژل‌ها، عمدتاً در مرحله برون‌تنی باقی‌مانده و فقدان گسترده داده‌های درون‌تنی و کارآزمایی‌های بالینی انسانی، بزرگترین مانع برای اثبات ادعاهای سلامت‌بخشی و ترجمه صنعتی این فناوری به حوزه داروسازی است. بنابراین، تحقیقات آتی در این زمینه باید بر روی مطالعات فارماکوکینتیک و

مخلوط کردن مستقیم یک اولئوژل کننده، مانند موم یا فیتواسترول، با روغن مایع در دمای مشخص برای رسیدن به ژل است و در واقع این روش یک رویکرد ساده و پرکاربرد برای ترکیب ترکیبات زیست‌فعال آگریز در اولئوژل‌ها است. ترکیبات زیست‌فعال قبل از فرایند ژل شدن در فاز روغن مایع حل می‌شوند [۳۸]. در حالی‌که، در روش غیرمستقیم تولید اولئوژل ابتدا با کمک یک عامل ژل کننده، امولسیون یا آئروژل تشکیل شده و سپس از طریق آگیری یا جابجایی روغن مایع، اولئوژل تولید می‌شود. ساده‌ترین روش غیرمستقیم، تکنیک قالب امولسیون است که طی آن، امولسیون غلیظ روغن در آب (O/W) تشکیل و تثبیت شده، لایه سطحی از طریق پیوند عرضی یا تشکیل کمپلکس سخت می‌شود، در مرحله بعد فاز آبی خشک شده و در نهایت با برش ملایم محصول خشک، اولئوژل نهایی به دست می‌آید. این روش بیشتر برای ترکیبات زیست‌فعال که در روغن محلولیت کمی دارند مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ترکیب زیست‌فعال مورد نظر در یک حلال آلی سازگار (به‌عنوان مثال، اتانول یا استون) حل می‌شوند و سپس با روغن مایع در یک روش پراکندگی به کمک حلال برای تولید اولئوژل زیست‌فعال مخلوط می‌شوند. اختلاط یکنواخت فاز روغنی و حلال زیست‌فعال با هم زدن یا فراصوت انجام می‌شود [۳۹]. سورفکتانت‌ها و کو-اولئوژلاتورها (هم اولئوژل کننده، عامل ژل کننده کمکی) به‌عنوان اجزای ضروری در تولید اولئوژل شناخته می‌شوند.

سمیت‌شناسی در مدل‌های حیوانی و نهایتاً انسان متمرکز شود تا پتانسیل واقعی اولئوژل‌ها به‌عنوان حامل‌های دارویی به اثبات برسد.

۷- خلأ مطالعات درون‌تنی و چارچوب پیشنهادی برای پژوهش‌های آینده

همان‌طور که اشاره شد، فقدان مطالعات درون‌تنی گسترده، به‌ویژه کارآزمایی‌های بالینی انسانی، بزرگ‌ترین خلأ تحقیقاتی در زمینه اولئوژل‌های حاوی ترکیبات زیست‌فعال است. برای پر کردن این خلأ، پژوهش‌های آینده باید بر روی موارد زیر متمرکز شوند:

- طراحی مطالعات فارماکوکینتیک و فارماکودینامیک در مدل‌های حیوانی بزرگ‌تر (مانند خوک یا خرگوش) پیش از ورود به فاز انسانی.

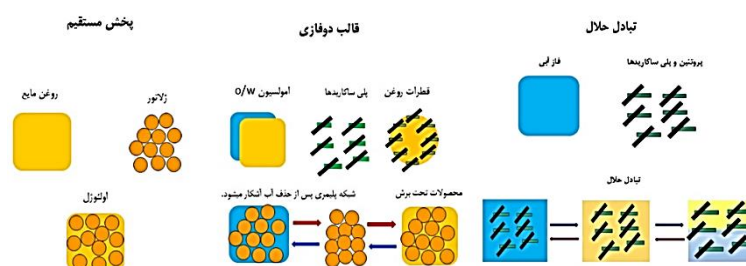
- ارزیابی سمیت‌شناسی طولانی‌مدت و ایمنی اولئوژل‌ها در شرایط برون‌تنی، به‌ویژه برای اولئوژل‌کننده‌های جدید.

- مقایسه مستقیم فراهمی زیستی ترکیبات زیست‌فعال بارگذاری‌شده در اولئوژل با حامل‌های مرسوم (مانند نانوامولسیون‌ها و لیپوزوم‌ها) در محیط برون‌تنی.

- طراحی کارآزمایی‌های بالینی تصادفی و کنترل‌شده بر روی داوطلبان انسانی برای اثبات ادعاهای سلامت‌بخشی اولئوژل‌های غنی‌شده با ترکیبات زیست‌فعال (مانند کاهش کلسترول، بهبود جذب آنتی‌اکسیدان).

۸- روش‌های ساخت اولئوژل‌ها

دو فرایند فیزیکی اصلی مستقیم و غیرمستقیم برای تولید اولئوژل وجود دارد (شکل ۲). روش مستقیم شامل



شکل ۲ روش‌های ساخت اولئوژل‌ها

زنجیره‌ای یا ایجاد پیوندهای عرضی، ساختار شبکه‌ای می‌سازند. این ترکیبات توانایی تشکیل خودآرای متنوع (تجمعات، فیبریل‌ها و شبکه‌ها) دارند. پروتئین‌ها به‌عنوان گزینه‌ای ایده‌آل برای جایگزینی چربی‌های جامد در صنایع غذایی، با ایجاد شبکه‌های سه‌بعدی از طریق تجمع ذرات، روغن مایع را به دام انداخته و اولئوژل تولید می‌کنند؛ استحکام نهایی اولئوژل به شدت به اندازه و میزان آب‌گریزی تجمعات پروتئینی بستگی دارد [۴۴].

۹- ارزیابی سیستم‌های تحویل اولئوژل مهندسی شده مبتنی بر ترکیبات زیست‌فعال: کاربردها و چالش‌ها

در پژوهش‌های اخیر، ترکیبات زیستی مختلفی از جمله پروتئین‌ها (مانند ایزوله پروتئین سویا و پروتئین آب‌پنیر)، پلی‌ساکاریدها (مانند پکتین، آلژینات و کاراگینان) و همچنین ساختارهای ترکیبی حاصل از آن‌ها، به‌طور گسترده در فرمولاسیون اولئوژل‌های پایدار و دارای کاربرد صنعتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۲۹]. نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که ژل‌های امولسیون، پتانسیل کاربردی قابل‌توجهی در صنایعی چون تولید آنالوگ‌های گوشت، محصولات نانوایی و فراورده‌های لبنی دارند. این سامانه‌ها نه‌تنها به بهبود ویژگی‌های بافتی و حسی محصولات نهایی کمک می‌کنند (شکل ۳)، بلکه منجر به ارتقاء پروفایل لیپیدی آن‌ها نیز می‌شوند [۳۳].

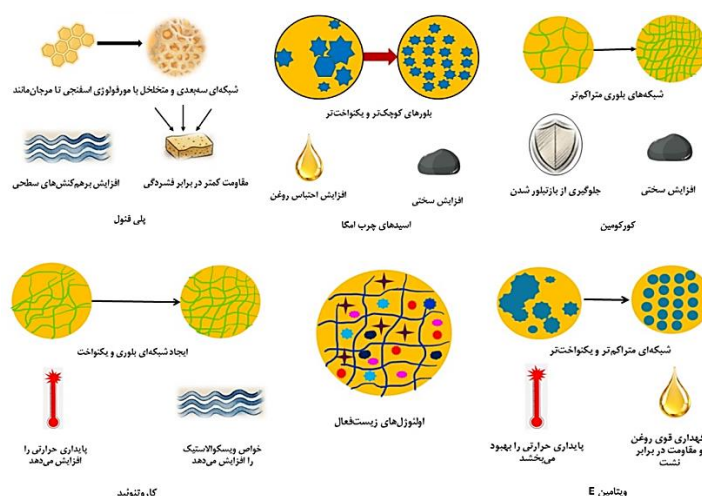
علاوه بر این، میزان اثر گذاری در فرمولاسیون غذایی و دارویی و رهایش و دسترسی زیستی ترکیبات زیست‌فعال موجود در فرمولاسیون سیستم‌های ژلی تحت تأثیر عوامل مختلفی، مانند نوع و غلظت ژلاتورها، نسبت ژلاتور به روغن، نوع آنتی‌اکسیدان و آبگریزی آن قرار دارد. متغیرهای متعددی، از جمله جنس دیواره، نسبت روغن به آب، فرایند کپسوله‌سازی و شرایط pH می‌توانند بر ویژگی‌های عملکردی سیستم اولئوژل نهایی تأثیر بگذارند [۳۵].

به‌طور کلی، پیشرفت در توسعه جایگزین‌های چربی مبتنی بر ترکیبات زیست‌فعال مستلزم رفع چند شکاف تحقیقاتی اساسی است.

کو-ژلاتورها (هم اولئوژل کننده، عامل ژل کننده کمکی) مواد اضافی هستند که در کنار اولئوژل کننده اولیه برای افزایش یا اصلاح فرایند اولئوژلاسیون کار می‌کنند. آنها تثبیت ترکیبات زیست‌فعال آبگریز را در ماتریس اولئوژل افزایش می‌دهند [۴۰]. کپسوله‌سازی اولئوژل‌ها می‌تواند بار بیشتری از ترکیبات زیست‌فعال را در خود جای دهد و در عین حال پراکندگی و پایداری آنها را تضمین کند. اولئوژل‌ها با به دام انداختن مواد زیست‌فعال در شبکه‌های سه‌بعدی خود، از اکسیداسیون جلوگیری کرده، ترکیبات را تثبیت و آزادسازی آنها را کنترل می‌کنند [۴۱]. اگرچه تحقیقات در مورد پتانسیل اولئوژل‌ها به‌عنوان سیستم‌های رسانش مواد مغذی خوراکی نسبتاً ناشناخته مانده است، اما همین ویژگی‌ها، کاربرد آنها را به‌ویژه برای افزایش حلالیت و فراهمی زیستی ریزمغذی‌های محلول در چربی افزایش می‌دهد. اولئوژل کننده‌ها به‌عنوان اجزای ساختاری اصلی، بر اساس وزن مولکولی به دو دسته تقسیم می‌شوند که هر دسته دارای ساختار سه‌بعدی ویژه خود است.

دسته اول، اولئوژل کننده‌های با وزن مولکولی پایین، مانند موم‌ها، اسیدهای چرب، الکل‌ها و فیتواسترول‌ها هستند که از طریق خودآرایی، سه ساختار بلوری، فیبری یا لوله‌ای تشکیل می‌دهند. برای نمونه، این ترکیبات در غلظت‌های پایین (۱ تا ۴ درصد وزنی) با ایجاد شبکه‌ای سه‌بعدی، روغن‌های مایع و ترکیبات زیست‌فعال را محصور می‌کنند [۴۲]. فیتواسترول‌های گیاهی که به‌خوبی شناخته شده‌اند و موجب کاهش کلسترول می‌شوند، مولکول‌های استرولی با یک حلقه استرولی، گروه هیدروکسیل در موقعیت C-3 و زنجیره جانبی آلیفاتیک آب‌گریز هستند [۴۳]. این ترکیبات با نقطه ذوب بالا، طی اولئوژلاسیون از طریق پیوندهای هیدروژنی، ساختارهای بلوری (با کریستال‌های پلی‌مورف β و β' تأییدشده توسط پراش پرتو ایکس) تشکیل می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که در دماهای زیر ۶۵ درجه سانتی‌گراد ویژگی‌های شبه‌جامد نشان داده و با سرد شدن مجدداً به ژل تبدیل می‌شوند. افزودن این ترکیبات به اولئوژل می‌تواند LDL را تا حدود ۵ تا ۱۹ درصد کاهش دهد [۴۲].

دسته دوم، اولئوژل کننده‌های با وزن مولکولی بالا، مانند پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌ها، هستند که با درهم‌تنیدگی



شکل ۳ تأثیر ترکیبات زیست‌فعال بر خواص فیزیکی اولئوژل‌ها برای پیشرفت در این حوزه، درک عمیق مکانیسم‌های مولکولی مونتاژ و رفتار این سیستم‌ها با روش‌های پیشرفته ضروری است. همچنین، ارزیابی‌های جامع درباره ایمنی، پایداری اکسیداتیو، سرنوشت گوارشی، اثرات متابولیکی و تحلیل چرخه عمر زیست‌محیطی هنوز ناکافی است. از نظر ساختاری نیز سهم شبکه‌های بیوپلیمری در برابر قطرات تجمع‌یافته و همچنین تقلید بو و رهایش طعم به‌خوبی روشن نشده و نیازمند روش‌های ارزیابی حسی استاندارد است [۳۶].

کمک می‌کنند؛ این اثر به‌ویژه در صورت استفاده هم‌زمان با مواد فعال سطحی بیشتر نمایان می‌شود [۴۵]. جدول ۱ خلاصه‌ای از طیف ترکیبات زیست‌فعال استفاده شده در فرمولاسیون اولئوژل‌ها را ارائه می‌دهد.

۱۰- اولئوژل‌های مهندسی شده مبتنی بر ترکیبات زیست‌فعال

پلی‌ساکاریدها نقش مهمی در فرمولاسیون اولئوژل‌ها دارند ایفا می‌کنند و به‌عنوان عوامل غلیظ‌کننده با افزایش ویسکوزیته فاز آبی، به بهبود پایداری فیزیکی سامانه

جدول ۱ طیف ترکیبات زیست‌فعال به‌کاررفته در اولئوژل‌ها را به‌همراه میزان اثر بخشی هر یک نشان می‌دهد.

منبع	اثر بخشی	اولئوژل فرموله شده با ترکیب زیست‌فعال
[46]	استحکام ژل بالا، الاستیسیته و ظرفیت اتصال عالی به روغن را نشان می‌دهند.	اولئوژل‌های تهیه‌شده با صمغ زانتان
[47]	افزایش استحکام مکانیکی و ظرفیت اتصال روغن، افزودن بهبود ویژگی‌های رئولوژیکی خمیر را بهبود داد، افت پخت را ۳۰ درصد کاهش داد و حجم مخصوص کیک را افزایش داد و ساختار گلوئن مترآمتری ایجاد کرد.	اولئوژل تهیه‌شده با اولئوژل پروتئین میوفیبریلار در ساختار کیک اسفنجی
[48]	ظرفیت اتصال روغن قوی و خواص رئولوژیکی مطلوبی را نشان دادند. این اولئوژل‌ها، همچنین میزان آزادسازی بالای اسیدهای چرب آزاد را در مراحل اولیه هضم آزمایشگاهی نشان دادند.	متیل سلولز به‌عنوان اولئوژل‌کننده با آلژینات سدیم، صمغ زانتان و k-کاراگینان
[49]	اولئوژل‌هایی با ظرفیت نگهداری روغن عالی (از دست دادن روغن ۳.۲ درصد پس از نگهداری طولانی‌مدت)، آزادسازی کارآمد اسید چرب آزاد در طول هضم و استحکام ژل قوی مشاهده شد.	کمپلکس‌های پروتئین-پلی‌ساکاریدی: پلی‌ساکارید دانه پوست تمر هندی همراه با ژلاتین

۱۱- چالش‌های موجود در این زمینه

اولئوژل‌ها همچنان وجود دارند. افزایش تقاضای مصرف‌کنندگان برای محصولات غذایی سالم‌تر و دارای برچسب پاک، فرصت مناسبی برای توسعه و کاربرد گسترده‌تر اولئوژل‌ها فراهم کرده است. در این راستا، اولئوژل‌ها می‌توانند به‌عنوان رویکردی امیدبخش برای کاهش مصرف چربی‌های جامد و بهبود ویژگی‌های تغذیه‌ای محصولات غذایی مورد استفاده قرار گیرند. از این‌رو، مطالعات آینده باید بر بهینه‌سازی استراتژی‌های فرمولاسیون و بهبود درک مصرف‌کننده برای تسهیل پذیرش گسترده‌تر صنعتی متمرکز شوند. علاوه بر این، انجام مطالعات نظام‌مند درباره پذیرش مصرف‌کننده و ارزیابی عملکرد اولئوژل‌ها در شرایط واقعی تولید و نگهداری، می‌تواند به تسهیل انتقال این فناوری از مقیاس آزمایشگاهی به کاربردهای صنعتی کمک کند [۵۴].

۱۲- پیشنهاد و آینده‌نگری

علی‌رغم چالش‌های پیش رو، مسیر روشنی برای دستیابی به پتانسیل کامل اولئوژل‌ها وجود دارد. غلبه بر موانع و محدودیت‌های فعلی مستلزم تمرکز بر اصلاح و بهینه‌سازی دقیق و هدفمند عوامل کلیدی در عملکرد این سامانه‌ها است. از جمله فرصت‌های راهبردی در این زمینه، می‌توان به سیستم‌های هم‌تحویلی^۳ اشاره کرد که در آن دو ترکیب زیست‌فعال با حلالیت متفاوت در یک بایژل ترکیب می‌شوند. برای مثال، در بایژل حاوی کورکومین (در اولئوژل) و اپی‌گالوکاتچین گالات (EGCG) (در هیدروژل)، گزارش شده است که فراهمی زیستی EGCG بیش از ۸۵ درصد حفظ شده، در حالی که کورکومین به‌صورت کنترل‌شده رها شده است [۵۵]. همچنین، مهندسی شبکه برای افزایش دسترسی زیستی از طریق کاهش اندازه ذرات اولئوژل به مقیاس نانو (نانوامولسیون) جذب بتاکاروتن را تا ۱۱٫۵ برابر افزایش داده است [۵۶]. عواملی مانند نوع و غلظت عامل ژل‌کننده، ترکیب روغن پایه، پارامترهای فراوری نظیر سرعت خنک‌کننده و شدت برش، همگی نقش

اولئوژلاسیون، به‌دلیل محدودیت‌های قانونی، نگرانی‌های بهداشتی، و مسائل زیست‌محیطی مرتبط با چربی پالم اهمیت یافته است و به‌عنوان روشی امیدوارکننده برای جایگزینی چربی‌های ترانس و اشباع در محصولات غذایی مطرح شده است. اما با وجود کاربردهای موفق در دسته‌بندی‌های مختلف مواد غذایی و نتایج مطلوب در حفظ یا بهبود کیفیت محصول، اولئوژل‌ها همچنان با محدودیت‌های قابل توجهی روبه‌رو هستند. یکی از مهمترین چالش‌ها، پایداری اکسیداتیو در حین فراوری است؛ زیرا بیشتر اولئوژل‌کننده‌ها (به‌ویژه اتیل سلولز و موم‌ها) برای حل شدن در روغن به دمای بالا (۱۴۰-۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) نیاز دارند. قرار گرفتن در معرض این دما باعث تسریع اکسیداسیون روغن‌های غنی از PUFA و تخریب ترکیبات حساس به حرارت می‌شود [۲۶]. این چالش‌های کلیدی شامل نیاز به توسعه بیشتر تکنیک‌های اولئوژلاسیون و بهینه‌سازی فرایندهای تولید در مقیاس صنعتی است [۵۰]. همچنین، تداخل ترکیب زیست‌فعال با شبکه عامل ژل‌کننده از دیگر چالش‌ها است: برای نمونه، بتاکاروتن در غلظت بالای ۰٫۲ درصد با نفوذ بین لایه‌های کریستالی موم زنبور عسل، سفتی و مدول الاستیک اولئوژل را کاهش می‌دهد [۵۱]. از سوی دیگر، موم‌ها (به‌ویژه کارنابا^۱ و کاندلیلا^۲)، حس مومی و چسبندگی در دهان ایجاد می‌کنند که برای محصولات پخش‌شدنی مانند مارگارین نامطلوب است [۵۲]. با این حال، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که با بهینه‌سازی فرمولاسیون و نسبت جایگزینی، می‌توان این حس مومی را مدیریت کرد. برای مثال، در مطالعه‌ای بر روی کیک اسفنجی، نمونه‌های حاوی ۵۰ تا ۱۰۰ درصد اولئوژل موم کاندلیلا، به‌عنوان بهترین نمونه‌ها از نظر حس چرب بودن دهان و طعم ارزیابی شدند [۵۳]. همچنین، چالش‌های دیگری مربوط به پایداری اکسیداتیو، پذیرش حسی، مقرون به صرفه بودن و امکان‌سنجی افزایش مقیاس تولید، به عنوان موانعی در توسعه و کاربرد صنعتی

^۱ Carnauba wax^۲ Candelilla Wax^۳ Co-delivery

تعیین‌کننده‌ای در خواص نهایی اولئوژل ایفا می‌کنند [۵۷]. در زمینه فناوری‌های نوین، اولئوژل‌ها به دلیل رفتار ویسکوالاستیک، ماده اولیه ایده‌آلی برای چاپ سه‌بعدی مواد غذایی هستند. به عنوان مثال، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که اولئوژل‌های حاوی فیتواسترول غنی‌شده با مونوگلیسرید، خواص رئولوژیکی مناسبی برای استفاده به عنوان جوهر در چاپ سه‌بعدی با اهداف تغذیه‌ای دارند. همچنین، پاستیل‌های حاوی کورکومین بر پایه اولئوژل پکتین و تری‌گلیسرید با زنجیره متوسط با موفقیت چاپ سه‌بعدی شده و به عنوان سیستم‌های تحویل خوراکی عمل کرده‌اند. علاوه بر این، ریزپوشانی با فاز روغنی اولئوژله شده می‌تواند مشکل نشت روغن از میکروکپسول‌ها را حل کند [۵۸]. این متغیرها به طور مستقیم بر ظرفیت اتصال به روغن، پایداری حرارتی و خصوصیات بافتی تأثیر می‌گذارند؛ ویژگی‌هایی که برای تقلید موفقیت‌آمیز نقش چربی‌ها در کاربردهای مرسوم غذایی، کاملاً حیاتی هستند. آینده اولئوژل‌ها در صنعت غذا، با تحقیقات آتی که بر افزایش سازگاری، ثبات و مقیاس‌پذیری آن‌ها در طیف وسیعی از سیستم‌های غذایی متمرکز باشد، ترسیم خواهد شد [۵۷ و ۵۸]. دستیابی به جایگزینی کامل چربی‌های ناسالم، نیازمند نوآوری‌های مستمر در تکنیک‌های تولید و فرمولاسیون است تا بتوان از مزایای تغذیه‌ای و عملکردی اولئوژل‌ها در مقیاس صنعتی بهره‌مند شد و به توسعه محصولات غذایی سالم‌تر و پایداری‌یاری رساند [۵۹].

۱۳- بحث و نتیجه‌گیری

اولئوژل‌ها، به عنوان جایگزینی نوین برای چربی‌های سنتی در صنایع غذایی (نانوایی، مارگارین، گوشتی، شیرینی جات) مطرح شده‌اند. این ساختارها با کاهش چربی‌های اشباع و ترانس، ضمن حفظ بافت مطلوب، ارزش غذایی روغن‌های پایه را نیز حفظ می‌کنند. بنابراین، اولئوژل‌ها جایگزینی سالم‌تر، بدون افت کیفیت محصول ارائه می‌دهند. علاوه بر جایگزینی چربی، اولئوژل‌ها به عنوان حامل‌های مؤثری برای ترکیبات عملکردی زیست‌فعال عمل می‌کنند. بر اساس شواهد موجود، انتخاب روش بارگذاری باید بر اساس حلالیت و حساسیت حرارتی

ترکیب زیست‌فعال انجام شود. برای ترکیبات آبریز مقاوم به حرارت، حل مستقیم در دمای بالا مناسب است؛ برای ترکیبات آبریز حساس مانند بتاکاروتن، روش تمپلیت امولسیون همراه با خشک کردن انجمادی توصیه می‌شود؛ و برای ترکیبات آب‌دوست، ریزپوشانی در ماتریکس عامل ژل‌کننده یا تشکیل کمپلکس پلیمری و در صورت نیاز به رهایش تفکیکی، سیستم بایزل کارآمد است [۲۱-۱۴]. این ترکیبات شامل پلی‌فنول‌ها، امگا-۳، ویتامین‌ها، اسیدهای آمینه و پروتئین‌ها هستند. این پژوهش، پیشرفت‌های اخیر در فرمولاسیون، شناسایی و کاربرد اولئوژل‌ها را مورد بررسی قرار داد. تمرکز اصلی بر پتانسیل آن‌ها به عنوان سیستم‌های حامل در ماتریس‌های غذایی و دارویی است. مطالعات نشان داده‌اند که اولئوژل‌ها می‌توانند پایداری و فراهمی زیستی را افزایش دهند. همچنین، از تخریب اکسیداتیو و گوارشی ترکیبات زیست‌فعال محافظت کنند. با این حال، وجود غلظت آستانه (معمولاً بین ۰/۱ تا ۰/۵ درصد وزنی) برای ترکیبات زیست‌فعال ضروری است. افزایش غلظت فراتر از این محدوده، می‌تواند به جای تقویت شبکه اولئوژل، آن را تضعیف کند. انجام آزمون‌های مکانیکی (سختی، G') و میکروسکوپ نوری قطبی برای یافتن این آستانه الزامی است [۱۴]. ادغام اولئوژل‌ها در محصولات چربی‌دار نان و گوشت، خواص فنی-عملکردی و تغذیه‌ای برتر یا معادل را به ارمغان می‌آورد. با این حال، بهینه‌سازی روش‌های فراوری و انتخاب اولئوژل‌کننده‌ها ضروری است. اولئوژل‌های بستر امیدوارکننده برای جایگزینی چربی و انتقال کنترل‌شده مواد زیست‌فعال فراهم می‌کند. با تأکید بر شواهد درون‌تنی موجود، اولئوژل‌ها پتانسیل قابل توجهی در افزایش فراهمی زیستی داروهای آبریز (تا ۸۰ برابر) و رهایش پایدار ترکیبات زیست‌فعال دارند. با این حال، فقدان کارآزمایی‌های بالینی انسانی یک مانع جدی است. همسویی این فناوری با روندهای غذایی گیاهی، برجسب پاک و سلامت‌محور، اهمیت آن را دوچندان می‌کند، در نتیجه تحقیقات آتی باید بر غلبه بر محدودیت‌ها (به‌ویژه کمبود مطالعات درون‌تنی)، تولید در مقیاس بزرگ و ادغام کامل در نسل بعدی محصولات غذایی و دارویی متمرکز کنند.

۱۴-منابع

- [1] Borriello A, Miele NA, Masi P, Cavella S. Rheological properties, particle size distribution and physical stability of novel refined pumpkin seed oil creams with oleogel and lucuma powder. *Foods*. 2022;11(13). doi:10.3390/foods11131844.
- [2] Fakhri-Aldeen F, Slman WJ, Abas WF. Fortification of some food products (cake) for the preschool aged children. *Int J Sci Res*. 2017;6(8):1642-1647.
- [3] Puşcaş A, Mureşan V, Socaciu C, Muste S. Oleogels in food: A review of current and potential applications. *Foods*. 2020;9(1). doi:10.3390/foods9010070.
- [4] Sikand G, Kris-Etherton P, Boulos NM. Impact of functional foods on prevention of cardiovascular disease and diabetes. *Curr Cardiol Rep*. 2015;17(6):39.
- [5] Michalak M, Pierzak M, Kręcis B, Suliga E. Bioactive compounds for skin health: A review. *Nutrients*. 2021;13(1):203.
- [6] Hu G, Qiu M. Machine learning-assisted structure annotation of natural products based on MS and NMR data. *Nat Prod Rep*. 2023.
- [7] Rashidinejad A. The road ahead for functional foods: Promising opportunities amidst industry challenges. *Future Postharvest Food*. 2024;1(2):266-273.
- [8] He Q, Li X, Liu C, Liu Z, Zhou S, Li Y, Ma T. Application and research progress of dietary fiber-based fat substitutes in food systems. *Food Res Int*. 2025;117876.
- [9] Zhou L, Kang D, Wang J, Cai J, Xing L, Zhang W. Effects of ultrasound-assisted emulsification and carboxymethyl cellulose addition on the rheological and microstructure properties of myofibrillar protein-soybean oil emulsion gel. *Food Bioprod Process*. 2024;144:203-213.
- [10] Annual Review of Food Science and Technology. 2024 Jun;15(1):355-379. doi:10.1146/annurev-food-072023-034403. Epub 2024 Jun 20.
- [11] *Food Res Int*. 2017 Jul;97:307-317. doi:10.1016/j.foodres.2017.04.022. Epub 2017 Apr 23. PMID:28578056. Review.
- [12] Francavilla A, Corradini MG, Joye IJ. Bigels as delivery systems: Potential uses and applicability in food. *Gels*. 2023;9(8):648.
- [13] Pehlivanoğlu H, Demirci M, Toker OS, Konar N, Karasu S, Sagdic O. Oleogels, a promising structured oil for decreasing saturated fatty acid concentrations: Production and food-based applications. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2018;58(8):1330-1341.
- [14] Ferdaus, M.J.; Mahmud, N.; Talukder, S.; Silva, R.C.d. Characteristics and Functional Properties of Bioactive Oleogels: A Current Review. *Gels* 2025, 11, 69.
- [15] Zhang, H., Yang, X., Zhong, R., Huo, Y., Zhu, Y., & Liang, P. (2023). Antioxidative properties of fish roe peptides combined with polyphenol on the fish oil oleogel. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(4), 1714–1726.
- [16] Puşcaş, A., Mureşan, V., & Muste, S. (2021). Application of analytical methods for the comprehensive analysis of oleogels—A review. *Polymers*, 13(12), 1934.
- [17] Acevedo, N. C. (2018). Characterization of the nanostructure of triacylglycerol crystal networks. In *Structure-Function Analysis of Edible Fats* (pp. 1-19). AOCS Press.
- [18] Patel, A. R. (2017). A colloidal gel perspective for understanding oleogelation. *Current Opinion in Food Science*, 15, 1-7.
- [19] Yu, J., Zhang, Y., Zhang, R., Gao, Y., & Mao, L. (2024). Stabilization of oil-in-water high internal phase emulsions with octenyl succinic acid starch and beeswax oleogel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 254, 127815.
- [20] Hashemi, B., Varidi, M., Assadpour, E., Zhang, F., & Jafari, S. M. (2024). Natural oleogelators for the formulation of oleogels by considering their rheological and textural perspective; a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 129149.
- [21] Pinto, T. C., Martins, A. J., Pastrana, L., Pereira, M. C., & Cerqueira, M. A. (2021). Oleogel-based systems for the delivery of bioactive compounds in foods. *Gels*, 7(3), Article 86.
- [22] Dent, T., Hallinan, R., Chitchumroonchokchai, C., & Maleky, F. (2022). Rice bran wax structured oleogels and in vitro bioaccessibility of curcumin. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 99(4), 299–311.

- [23] Martinovic, N., Polak, T., Ulrih, N. P., & Abramovic, H. (2020). Mustard seed: Phenolic composition and effects on lipid oxidation in oil, oil-in-water emulsion and oleogel. *Industrial Crops and Products*, 156, Article 112851.
- [24] Qiu, H., Qu, K., Zhang, H., & Eun, J. B. (2023). Characterization and comparison of physical properties and in vitro simulated digestion of multi-component oleogels with different molecular weights prepared by the direct method. *Food Hydrocolloids*, 142, Article 108850.
- [25] Santos, M. A. S., Magalhaes, A. E. R., Okuro, P. K., Steel, C. J., & Cunha, R. L. (2024). High internal phase emulsion-template oleogels stabilized by sodium caseinate: quercetin complexes and potential application in pound cakes. *Journal of Food Engineering*, 366, Article 111860.
- [26] Shang, J., Zhong, F., Zhu, S., Huang, D., & Li, Y. (2021). Formation, structural characteristics and physicochemical properties of beeswax oleogels prepared with tea polyphenol loaded gelators. *Food & Function*, 12(4), 1662–1671.
- [27] Yan, Y., Chen, S., Deng, L., Duan, Y., Huang, Z., Gong, D., & Zhang, G. (2024). Construction and characterization of egg white protein-gallic acid-xanthan gum based emulsion and oleogel. *Food Hydrocolloids*, 150, Article 109720.
- [28] Xie, D., Hu, H., Huang, Q., & Lu, X. (2023). Influence of oleogel/hydrogel ratios and emulsifiers on structural and digestion properties of food-grade 3D printed bigels as carriers for quercetin and catechin. *Food Hydrocolloids*, 144, Article 108948.
- [29] Saffold AC, Acevedo NC. The effect of mono-diglycerides on the mechanical properties, microstructure, and physical stability of an edible rice bran wax-gelatin biphasic gel system. *J Am Oil Chem Soc*. 2022;99(11):1033-1043.
- [30] Jeong, S., Lee, S., & Oh, I. (2021). Development of antioxidant-fortified oleogel and its application as a solid fat replacer to muffin. *Foods*, 10(12), 3059.
- [31] Gomez-Estaca, J., Pintado, T., Jimenez-Colmenero, F., & Cofrades, S. (2020). The effect of household storage and cooking practices on quality attributes of pork burgers formulated with PUFA- and curcumin-loaded oleogels as healthy fat substitutes. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 119, Article 108909.
- [32] Oyom, W., Mahmud, N., Islam, J., Valizadeh, S., Awuku, R. B., Ibrahim, S. A., & Tahergorabi, R. (2024). Enhancing the oxidative stability, physicochemical and sensory quality of deep-fat fried chicken nuggets using thyme essential oil-loaded oleogel coatings. *Progress in Organic Coatings*, 186, Article 107977.
- [33] Abdullah, Liu L, Javed HU, Xiao J. Engineering emulsion gels as functional colloids emphasizing food applications: a review. *Front Nutr*. 2022;9:890188. doi:10.3389/fnut.2022.890188. PMID:35656162. PMCID:PMC9152362.
- [34] Silva, S. S., Rodrigues, L. C., Fernandes, E. M., Lobo, F. C. M., Gomes, J. M., & Reis, R. L. (2022). Tailoring natural-based oleogels combining ethylcellulose and virgin coconut oil. *Polymers*, 14(12), 2473.
- [35] Lazăr AR, Pușcaș A, Tanislav AE, Mureșan V. Bioactive compounds delivery and bioavailability in structured edible oils systems. *Compr Rev Food Sci Food Saf*. 2024;23(6):e70020. doi:10.1111/1541-4337.70020. PMID:39437192.
- [36] Valoppi F, Palla C. The future of oleogels between challenges and opportunities. In: *Advances in oleogel development, characterization, and nutritional aspects*. 2024. p. 675-685.
- [37] Günal-Koroğlu, D., Gultekin Subasi, B., Saricaoglu, B., Karabulut, G., & Capanoglu, E. (2024). Exploring the frontier of bioactive oleogels in recent research. *Trends in Food Science & Technology*, 151, Article 104613.
- [38] Pinto TC, Sabet S, Kazerani García A, Kirjoranta S, Valoppi F. Oleogel preparation methods and classification. In: *Advances in oleogel development, characterization, and nutritional aspects*. Cham: Springer International Publishing; 2024. p. 77-114.
- [39] Martins AJ, Vicente AA, Cunha RL, Cerqueira MA. Edible oleogels: An opportunity for fat replacement in foods. *Food Funct*. 2018;9(2):758-773.
- [40] Chen K, Zhang H. Fabrication of oleogels via a facile method by oil absorption in the aerogel templates of protein-polysaccharide

- conjugates. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2020;12(6):7795-7804. doi:10.1021/acsami.9b21435. Epub 2020 Jan 28. PMID:31961642.
- [41] Parisi D, Adasme MF, Sveshnikova A, Moreau Y, Schroeder M. Drug repositioning or target repositioning: a structural perspective of drug-target-indication relationship for available repurposed drugs. *bioRxiv*. 2019;715094.
- [42] Ferdaus MJ, Mahmud N, Talukder S, Silva RCD. Characteristics and functional properties of bioactive oleogels: A current review. *Gels*. 2025;11(1):69.
- [43] Wang Y, Liu S, Zhang L, Nagib A, Li Q, Geng R, et al. Formation, characterization, and application of natural bioactive phytosterol-based oleogels: A review. *Food Chem*. 2024;454:139821.
- [44] Wang Z, Chandrapala J, Truong T, Farahnaky A. Multicomponent oleogels prepared with high- and low-molecular-weight oleogelators: ethylcellulose and waxes. *Foods*. 2023;12(16):3093.
- [45] Davidovich-Pinhas M. Oleogels: a promising tool for delivery of hydrophobic bioactive molecules. *Ther Deliv*. 2016;7(1):1-3.
- [46] Quintana-Martinez S, Morales-Cano A, García-Zapateiro L. Rheological behaviour in the interaction of lecithin and guar gum for oil-in-water emulsions. *Czech J Food Sci*. 2018;36(1).
- [47] Feng Z, He D, Zhang L, Li Q, Xue C, Yi X, et al. Preparation of myofibrillar protein oleogels by emulsion template method: application of fat substitute for sponge cakes. *LWT*. 2025;216:117350.
- [48] Xu Y, Sun H, Lv J, Wang Y, Zhang Y, Wang F. Effects of polysaccharide thickening agent on the preparation of walnut oil oleogels based on methylcellulose: characterization and delivery of curcumin. *Int J Biol Macromol*. 2023;232:123291.
- [49] Xie F, Ren X, Zhu Z, Luo J, Zhang H, Xiong Z, et al. Tamarind seed polysaccharide-assisted fabrication of stable emulsion-based oleogel structured with gelatin: preparation, interaction, characterization, and application. *Food Hydrocoll*. 2023;142:108761.
- [50] Günel-Köroğlu D, Subasi BG, Saricaoglu B, Karabulut G, Capanoglu E. Exploring the frontier of bioactive oleogels in recent research. *Trends Food Sci Technol*. 2024;151:104613.
- [51] Barragán-Martínez, L.P.; Alvarez-Poblano, L.; Vernon-Carter, E.J.; Alvarez-Ramirez, J. Effects of β -Carotene on the Color, Textural, Rheological and Structural Properties of Canola Oil/Beeswax Oleogel. *Food Meas*. 2022, 16, 3946–3956.
- [52] Wang, Z.; Chandrapala, J.; Truong, T.; Farahnaky, A. Multicomponent Oleogels Prepared with High- and Low-Molecular-Weight Oleogelators: Ethylcellulose and Waxes. *Foods* 2023, 12, 3093.
- [53] Mehany T, Zannou O, Oussou KF, Chabi IB, Tahergorabi R. Innovative oleogels: developing sustainable bioactive delivery systems for healthier foods production. *Food Chem X*. 2025;102768.
- [54] Lu, Y., Zhong, Y., Guo, X., Zhang, J., Gao, Y., & Mao, L. (2022). Structural modification of O/W bigels by glycerol monostearate for improved co-delivery of curcumin and epigallocatechin gallate. *ACS Food Science and Technology*, 2(6), 975–983.
- [55] Fan, Y.; Gao, L.; Yi, J.; Zhang, Y.; Yokoyama, W. Development of β -Carotene-Loaded Organogel-Based Nanoemulsion with Improved In Vitro and In Vivo Bioaccessibility. *J. Agric. Food Chem*. 2017, 65, 6188–6194.
- [56] Manzoor S, Masoodi FA, Rashid R, Naqash F, Ahmad M. Oleogels for the development of healthy meat products: a review. *Appl Food Res*. 2022;2(2):100212.
- [57] O'Sullivan, C. M., Davidovich-Pinhas, M., Wright, A. J., Barbut, S., & Marangoni, A. G. (2017). Ethylcellulose oleogels for lipophilic bioactive delivery – effect of oleogelation on in vitro bioaccessibility and stability of beta-carotene. *Food & Function*, 8(4), 1438–1451.
- [58] Flöter E, Wettlaufer T, Conty V, Scharfe M. Oleogels—their applicability and methods of characterization. *Molecules*. 2021;26(6):1673.
- [59] Zambrano JC, Vilgis TA. Tunable oleosome-based oleogels: influence of polysaccharide type for polymer bridging-based structuring. *Food Hydrocoll*. 2023;137:108399.

Application of oleogels containing natural bioactive compounds in the food and pharmaceutical industries

Fatemeh Yousefi Qomishloo¹, Mehdi Tabarsa^{1, 2*}, Nafiseh Sadat Mousavi¹, Fatemeh Ramezan¹

1. Department of Fisheries Products Processing, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

2. Department of Bioactive Compounds, Faculty of Interdisciplinary Sciences and Technology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

m.tabarsa@modares.ac.ir

Receipt: 2026/06/10

Accepted: 2026/06/20

Abstract

This study provides a comprehensive and analytical review of recent advances in the design, production, characterization, and application of oleogels containing natural bioactive compounds in the food industry. The present study systematically reviews the existing literature, investigating various encapsulation methods of bioactive compounds within the oleogel matrix and analyzing the impact of these compounds on the physical properties and stability of oleogels. Oleogels, as structured systems based on the oil phase, demonstrate a high capacity for maintaining stability, enhancing functional properties, and improving the nutritional value of food products. These systems effectively enable the encapsulation and delivery of a wide range of bioactive compounds, including polyphenols, omega-3 fatty acids, fat-soluble vitamins, essential amino acids, natural essential oils, and proteins, while protecting them against oxidative degradation and unfavorable gastrointestinal conditions. The application of oleogels in products such as bakery and meat items has been shown to improve nutritional indices while preserving rheological, textural, and physicochemical properties. Furthermore, these approaches enhance the bioavailability, controlled release, and stability of bioactive compounds, as well as extend the shelf life of oleogels. Despite significant progress, challenges remain regarding the optimization of the oleogelation process, control of structural properties, and industrial scalability. Therefore, targeted research is necessary to address existing limitations and develop industrial applications of these systems.

Keywords: Oleogel, Bioactive compounds, Fat substitute, Functional properties