Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Food Processing and Preservation Journal

Print ISSN: 2423-3544
Online ISSN: 2423-3803

Iranian Association of Food Scientists and Technologists

A Review of Novel Methods for Producing Oleogels: Applications, Challenges and Future Perspectives

Kimia Sahba[1], Mohammad-Taghi Golmakani[2]*

[1] Ph.D. Student, Department of Food Science and Technology, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
[2] Professor, Department of Food Science and Technology, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
Email: golmakani@shirazu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 4/08/2025
Revised: 17/10/2025
Accepted: 06/12/2025

Keywords:
Oleogel
Fat Replacement
Gelators

ABSTRACT

Background and Objective: The food industry is constantly evolving to address the changing needs of consumers, scientific advancements, and regulatory requirements. Key challenges include providing healthy and sustainable food for a growing global population while ensuring the sustainability of raw materials, processes, and final products. Rising public awareness of the impact of diet on health and environmental concerns related to food production has increased demand for healthier and more sustainable alternatives. Lipids play a critical role in the physicochemical properties, structural integrity, and sensory quality of food products. However, traditional solid fats such as palm oil, coconut oil, butter, and margarine have been criticized for their high saturated and trans fatty acid content, which is linked to cardiovascular health risks, as well as their negative environmental impact, such as deforestation and greenhouse gas emissions. Oleogels have emerged as innovative substitutes for traditional solid fats, aiming to maintain the functional and sensory properties of food products while reducing adverse health effects and improving environmental sustainability.

Materials and Methods: Oleogels are produced using gelators or oleogelators, such as natural waxes (e.g., beeswax, carnauba wax), polysaccharides (e.g., cellulose), proteins, and low-molecular-weight compounds, which transform liquid oils into a gel-like structure. Production methods include thermal techniques (heating and cooling), chemical techniques (pH adjustments or salt addition), and mechanical techniques (shearing or emulsification). Gelators are categorized based on their dispersion methods in oil (direct, indirect, semi-direct) and their specific applications. Thermal methods are simple but require specialized equipment and high energy, while chemical methods may introduce additional complexity.

Results: Oleogels are used as semi-solid, self-sustaining pseudo-fats in products such as bread, cakes, chocolate, meat products, and dairy items. They maintain texture, appearance, and sensory properties without the need for unhealthy fats and have been successful in products like plant-based butters and chocolate. Additionally, oleogels enable the production of foods with adjustable calorie content. In comparison to traditional fats, which are favored due to

their crystalline structure, heat resistance, and familiar flavor, oleogels by utilizing unsaturated oils rich in essential fatty acids and natural gelling agents offer a healthier and more environmentally friendly alternative. Thermal methods for producing oleogels are considered simpler but require specialized equipment and high energy consumption; whereas chemical methods involve greater complexities.

Conclusion: Oleogels represent a significant step toward producing healthier, more sustainable foods that align with the needs of modern consumers. However, their success depends on overcoming technical and economic challenges, such as optimizing stability at various temperatures, reducing production costs, achieving industrial scalability, and ensuring sensory acceptance by consumers. Further research is needed to develop cost-effective gelling agents and enhance the functional properties of oleogels for industrial-scale applications.

Cite this article: Sahba, K., Golmakani, M.-T. 2026. A Review of Novel Methods for Producing Oleogels: Applications, Challenges and Future Perspectives. *Food Processing and Preservation Journal*, 18(1), 1-18.

© The Author(s)
https://doi.org/10.22069/fppj.2025.23943.1897
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

فرآوری و نگهداری مواد غذایی
شاپا چاپی: ۳۵٤٤-۲٤۲۳
شاپا الکترونیکی: ۳۸۰۳-۲٤۲۳

مروری بر روش‌های نوین تولید اولئوژل‌ها: کاربردها، چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده

کیمیا صهبا[۱]، محمدتقی گلمکانی[۲*]

[۱] دانشجوی دکتری، بخش علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
[۲] استاد، بخش علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، رایانامه: golmakani@shirazu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱٤۰٤/۰۵/۱۳
تاریخ ویرایش: ۱٤۰٤/۰۷/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱٤۰٤/۰۹/۱۵

واژه‌های کلیدی:
اولئوژل
جایگزین چربی
عوامل ژل ساز

چکیده

سابقه و هدف: صنعت غذا با چالش‌های تأمین غذای سالم و پایدار برای جمعیت رو به رشد، پاسخ به نیازهای متغیر مصرف‌کنندگان و الزامات نظارتی مواجه است. افزایش آگاهی عمومی از تأثیر رژیم غذایی بر سلامت و نگرانی‌های زیست‌محیطی، تقاضا برای جایگزین‌های سالم‌تر و پایدارتر را افزایش داده است. لیپیدها نقش کلیدی در ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی، ساختاری و حسی محصولات غذایی دارند اما چربی‌های جامد متداول مانند روغن پالم، کره و مارگارین به دلیل محتوای بالای اسیدهای چرب اشباع بالا برای مثال حدود ۵۰٪ در روغن پالم و همچنین وجود اسیدهای چرب ترانس در مارگارین که با بیماری‌های قلبی‌عروقی مرتبط هستند و به علت اثرات منفی زیست‌محیطی مانند تخریب جنگل‌ها و انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد انتقاد قرار گرفته‌اند. اولئوژل‌ها به‌عنوان جایگزین‌های نوآورانه معرفی شده‌اند تا ویژگی‌های عملکردی و حسی محصولات را حفظ کنند، اثرات منفی بر سلامتی را کاهش دهند و پایداری زیست‌محیطی را بهبود بخشند.

مواد و روش‌ها: اولئوژل‌ها با استفاده از عوامل ژل‌ساز یا اولئوژل‌سازها مانند موم‌های طبیعی مثل موم زنبور عسل و موم کارنوبا، پلی‌ساکاریدها مانند سلولز، پروتئین‌ها و ترکیبات کم‌وزن مولکولی تولید می‌شوند که روغن‌های مایع را به ساختاری ژل‌مانند تبدیل می‌کنند. روش‌های تولید شامل تکنیک‌های حرارتی (گرمایش و سرد کردن)، شیمیایی (تغییرات pH یا افزودن نمک) و مکانیکی (برش‌دهی یا امولسیون‌سازی) است. عوامل ژل‌ساز بر اساس روش‌های پخش در روغن (مستقیم، غیرمستقیم، نیمه‌مستقیم) و کاربرد خاصشان دسته‌بندی می‌شوند.

یافته‌ها: اولئوژل‌ها به‌عنوان شبه‌چربی‌های نیمه‌جامد و خودپایدار در محصولاتی مانند نان، کیک، شکلات، فرآورده‌های گوشتی و لبنیات استفاده می‌شوند. آن‌ها بافت، ظاهر و ویژگی‌های حسی را بدون نیاز به چربی‌های ناسالم حفظ می‌کنند و در محصولاتی مانند کره‌های گیاهی و شکلات موفقیت‌آمیز بوده‌اند. همچنین اولئوژل‌ها قابلیت تولید غذاهایی با کالری تنظیم‌شده را دارند. در مقایسه با چربی‌های سنتی که به دلیل ساختار بلوری، مقاومت حرارتی و طعم شناخته‌شده مورد استقبال قرار می‌گیرند، اولئوژل‌ها با بهره‌گیری از روغن‌های غیراشباع سرشار

از اسیدهای چرب ضروری و ژل‌سازهای طبیعی، گزینه‌ای سالم‌تر و دوستدار محیط زیست محسوب می‌شوند. روش‌های حرارتی برای تولید اولئوژل، ساده‌تر به شمار می‌روند اما مستلزم تجهیزات تخصصی و مصرف بالای انرژی هستند؛ در حالی که روش‌های شیمیایی، پیچیدگی‌های بیشتری را به همراه دارند.

نتیجه‌گیری: اولئوژل‌ها گامی مهم در جهت تولید غذاهای سالم‌تر، پایدارتر و متناسب با نیازهای مصرف‌کنندگان مدرن هستند. با این حال موفقیت آن‌ها به غلبه بر چالش‌های فنی و اقتصادی مانند بهینه‌سازی پایداری در دماهای مختلف، کاهش هزینه‌های تولید، مقیاس‌پذیری صنعتی و اطمینان از پذیرش حسی توسط مصرف‌کنندگان بستگی دارد. تحقیقات بیشتری برای توسعه عوامل ژل‌ساز مقرون به صرفه و بهبود ویژگی‌های عملکردی اولئوژل‌ها در مقیاس صنعتی مورد نیاز است.

استناد: صهبا، کیمیا؛ گلمکانی، محمدتقی. (۱۴۰۵). مروری بر روش‌های نوین تولید اولئوژل‌ها: کاربردها، چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده. *فرآوری و نگهداری مواد غذایی*، ۱۸(۱)، ۱۸-۱.

https://doi.org/10.22069/fppj.2025.23943.1897

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

صنعت غذا با چالش‌هایی نظیر بهبود رژیم‌های غذایی، پایداری زیست‌محیطی و پاسخ به تقاضای روبه‌رشد مصرف‌کنندگان برای محصولات غذایی سالم‌تر مواجه است. افزایش جمعیت جهانی و آگاهی عمومی از تأثیرات تغذیه بر سلامت، محققان و تولیدکنندگان را به جستجوی جایگزین‌های لیپیدی نوین سوق داده است که بتوانند ویژگی‌های حسی و عملکردی محصولات غذایی را حفظ کنند. چربی‌های جامد سنتی مانند کره، مارگارین و روغن پالم به دلیل دارا بودن مقادیر بالای اسیدهای چرب اشباع[1] و ترانس[2] که با مشکلات سلامت قلبی-عروقی و اثرات منفی زیست‌محیطی مرتبط هستند با محدودیت‌هایی روبه‌رو شده‌اند (۱). استفاده از روغن‌های مایع به‌جای این چربی‌ها اغلب به کاهش کیفیت بافت و حس چشایی منجر می‌شود که رضایت مصرف‌کنندگان را کاهش می‌دهد (۲).

از منظر پایداری اولئوژل‌ها با کاهش وابستگی به روغن‌های گرمسیری مانند روغن پالم که تولید آن‌ها با تخریب جنگل‌ها و انتشار گازهای گلخانه‌ای همراه است به کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک می‌کنند (۳). به همین دلیل تکنیک‌های ساختاردهی روغن و اولئوژل‌سازی به‌عنوان راهکارهایی نوآورانه مورد توجه قرار گرفته‌اند. روش‌های تولید اولئوژل شامل تکنیک‌های حرارتی (گرمایش و سرد کردن)، شیمیایی (تغییر pH یا افزودن نمک) و مکانیکی (برش‌دهی یا امولسیون‌سازی) است. روش‌های حرارتی ساده اما پرهزینه از نظر انرژی هستند در حالی که روش‌های شیمیایی ممکن است پیچیدگی‌های بیشتری به همراه داشته باشند (٤). اولئوژل‌ها در محصولاتی مانند نان، کیک، شکلات، فرآورده‌های گوشتی و لبنیات کاربرد دارند اما چالش‌هایی نظیر مقیاس‌پذیری صنعتی، کاهش هزینه‌های تولید، حفظ پایداری در دماهای مختلف و جلب رضایت حسی مصرف‌کنندگان همچنان وجود دارد (۵).

اولئوژل‌ها مواد نیمه‌جامدی و با حالت پلاستیکی هستند که از طریق به دام انداختن روغن‌های خوراکی در یک شبکه ژلی سه‌بعدی ساخته‌شده از عوامل ژل‌ساز یا ساختاردهنده تولید می‌شوند. این عوامل در غلظت‌های پایین استفاده شده و قادرند ساختاری مشابه چربی‌های جامد بدون نیاز به استفاده از چربی‌های ناسالم ایجاد کنند (٦). ژل‌سازها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: ژل‌سازهای با وزن مولکولی پایین[3] مانند موم‌ها، مونوگلیسریدها، استرول‌ها و لسیتین و ژل‌سازهای با وزن مولکولی بالا مانند پروتئین‌ها، مشتقات سلولزی و نشاسته‌ها. ژل‌سازهای با وزن مولکولی پایین معمولاً با فرآیندهای ساده مانند گرمایش و سرد کردن عمل می‌کنند در حالی که ژل‌سازهای با وزن مولکولی بالا نیازمند روش‌های فرآوری پیچیده‌تر برای تثبیت فاز روغنی هستند. انتخاب ژل‌ساز به نوع کاربرد، ویژگی مورد نظر و شرایط فرآوری بستگی دارد (۷).

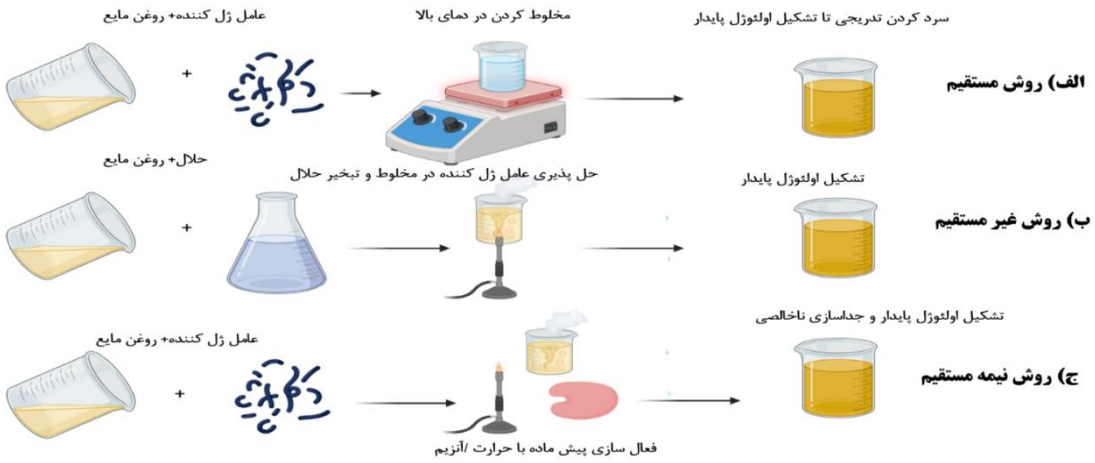
از منظر تغذیه‌ای، اولئوژل‌ها با استفاده از روغن‌های غنی از اسیدهای چرب غیراشباع چندگانه مانند روغن سویا، دانه کتان و ذرت مزایای سلامتی قابل‌توجهی ارائه می‌دهند. اسیدهای چرب غیراشباع چندگانه‌ها به بهبود متابولیسم کلسترول، تنظیم فشار خون، تقویت عملکرد عصبی و کاهش مقاومت به انسولین کمک می‌کنند. این ویژگی‌ها اولئوژل‌ها را به گزینه‌ای مطلوب برای تولید غذاهای سالم‌تر تبدیل کرده است (۸).

[1] Saturated Fatty Acid
[2] Trans Fatty Acid
[3] Low-Molecular-Weight Gelators
[4] High-Molecular-Weight Gelators
[5] Poly Unsaturated Fatty Acid

خواص فیزیکی اولئوژل‌ها از جمله بافت، پایداری حرارتی و رئولوژیکی به ترکیب شیمیایی روغن و ژل‌ساز، نسبت‌های آن‌ها و شرایط فرآوری وابسته است (۹). دستیابی به تعادل بین حلالیت و عدم حلالیت ژل‌ساز در روغن برای تشکیل ساختار ژلی ضروری است زیرا عدم تعادل ممکن است به رسوب ژل‌ساز یا حل شدن کامل آن منجر شود (۱۰).

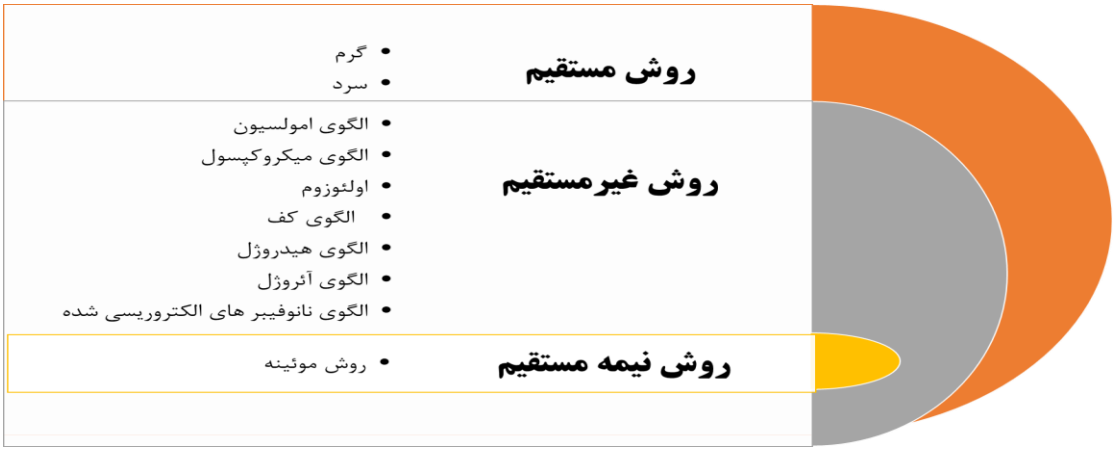
این مقاله با تمرکز بر ارزیابی جامع ویژگی‌های حرارتی، رئولوژیکی، بافتی، پایداری اولئوژل‌ها، بررسی استراتژی‌های تولید و ژل‌سازها از مقالات مروری پیشین که عمدتاً بر جنبه‌های پایه‌ای و آزمایشگاهی تأکید داشتند، متمایز است. تفاوت کلیدی آن در برجسته‌سازی چالش‌های اقتصادی، مقیاس‌پذیری صنعتی و محدودیت‌های فنی است که در بررسی‌های قبلی کم‌تر به‌طور سیستماتیک پوشش داده شده‌اند. این کار شکاف تحقیقاتی در انتقال دانش به کاربردهای عملی و تجاری‌سازی اولئوژل‌ها برای غذاهای سالم‌تر و پایدارتر را پر می‌کند.

روش‌های اولئوژل سازی: در میان عوامل ساختاری موجود برای روغن‌های خوراکی می‌توان بر اساس نوع روش مورد نیاز برای پراکندگی آن‌ها در روغن تمایز قائل شد. در این بخش با توجه به شکل (۱،۲) روش‌های مختلف اولئوژل‌سازی را بررسی می‌کنیم و آن‌ها را به سه دسته تقسیم می‌کنیم: روش‌های مستقیم که از افزودن یک یا چند ژل‌ساز به روغن برای ایجاد ساختار ژل‌مانند بدست می‌آید. روش‌های غیرمستقیم که از افزودن ژل‌سازها به یک حلال ثانویه معمولاً آب که باید از سیستم حذف شود تا اولئوژل به دست آید. روش‌های نیمه‌مستقیم که از افزودن ژل‌سازهایی به روغن که به تنهایی قادر به ساختاردهی به روغن نیستند و برای تشکیل اولئوژل نیاز به حضور مقدار کمی مایع ثانویه دارند (۱۱).



شکل۱- نمایش دسته بندی جریان روش‌های نوین ساخت اولئوژل (۱۰).

Figure 1. Display of the classification flow of modern oleogel production methods (10).



شکل۲- نمایش انواع روش‌های اولئوژل سازی (۱۰).

Figure 2. Display of types of oleogelation methods (10).

روش‌های مستقیم: روش‌های مستقیم پرکاربردترین رویکرد در اولئوژل‌سازی هستند که شامل افزودن مستقیم ژل‌سازها برای مثال ژل سازهای لیپیدی، پلیمری، معدنی و نانوساختارها به روغن برای ایجاد ساختار ژل‌مانند می‌شوند. این روش مشابه ساختاردهی سنتی روغن است که در آن شبکه‌ای کلوئیدی از کریستال‌های تری‌اسیل‌گلیسرول تشکیل می‌شود مشابه آنچه در محصولات چربی تجاری یافت می‌شود. ژل‌سازهای مورد استفاده در این روش معمولاً ژل‌سازهای با وزن مولکولی پایین هستند که قادر به کریستالیزه شدن یا خودآرایی در روغن بوده و آن را به حالت نیمه‌جامد تبدیل می‌کنند (۱۰).

روش مستقیم گرم: در این روش، مخلوط روغن و ژل‌ساز تا دمایی بالاتر از نقطه ذوب ژل‌ساز یا دمای انتقال شیشه‌ای در مورد (اتیل‌سلولز) گرم می‌شود. این فرآیند معمولاً با هم‌زدن مداوم به مدت ۱۰ تا ۳۰ دقیقه انجام می‌شود تا حل شدن کامل ژل‌ساز تضمین شود. سپس مرحله خنک‌سازی در دمایی پایین‌تر از دمای انتقال ژل‌سازی انجام می‌شود که منجر به تشکیل شبکه سه‌بعدی قابل بازگشت حرارتی می‌شود و روغن را در ساختار ژل به دام می‌اندازد (۹). ویژگی‌های مکانیکی اولئوژل به عواملی مانند نوع روغن، ژل‌ساز، نسبت آن‌ها، سرعت خنک‌سازی و ترکیب ژل‌سازها در سیستم‌های چندجزئی بستگی دارد. برای مثال استفاده از مقدار ناکافی ژل‌ساز یا ناسازگاری بین ژل‌سازها می‌تواند منجر به تشکیل مایع ویسکوز یا پراکندگی کریستال‌ها به جای ژل شود. دمای مورد نیاز به نوع ژل‌ساز وابسته است. مونوگلیسریدها معمولاً به دمای ۷۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس، موم‌ها به ۵۰ تا بیش از ۹۰ درجه سلسیوس و سیستم‌های چندجزئی مانند بتا-سیتوسترول و گاما-اوریزانول به ۸۰ تا ۹۰ درجه سلسیوس نیاز دارند (۱۲). اتیل‌سلولز تنها ژل‌سازهای با وزن مولکولی بالا که به‌صورت مستقیم روغن را ساختاردهی می‌کند، به دمای بالای ۱۴۰ درجه سلسیوس نیاز دارد (۷). تعاملات غیرکووالانسی مانند پیوندهای هیدروژنی، پیوندهای π–π و نیروهای پراکندگی لاندن، خودآرایی مولکول‌های ژل‌ساز را هدایت می‌کنند و ساختارهای سوپرمولکولی مانند شبکه‌های کریستالی، میسل‌ها و فیبریل‌ها را تشکیل می‌دهند (٤). تعادل بین حلالیت و عدم حلالیت ژل‌ساز در روغن برای تشکیل ژل حیاتی است زیرا عدم تعادل می‌تواند به رسوب یا حل شدن کامل ژل‌ساز منجر شود.

روش مستقیم سرد: روش مستقیم سرد شامل پراکندگی ژل‌سازها در دمای اتاق یا پایین‌تر بدون نیاز به حرارت است. این روش با هم‌زدن ساده انجام می‌شود و از اکسیداسیون روغن ناشی از حرارت بالا جلوگیری می‌کند، که مزیتی نسبت به روش گرم است (۱۳). به عنوان مثال پژوهشگران از سیلیکای دودزا[1] برای تهیه اولئوژل با روغن آفتاب‌گردان استفاده کردند. پراکندگی‌های روغنی با مخلوط کردن ذرات سیلیکای کلوئیدی آب‌دوست و برش‌دهی با هموژنایزر پرسرعت در دمای اتاق تهیه شدند. در غلظت‌های ۱۰ و ۱۵ درصد سیلیکا شبکه‌ای سه‌بعدی مبتنی بر تجمع فراکتال ذرات تشکیل شد که روغن را با حداقل نشتی به دام انداخت. سیلیکای آب‌گریز به دلیل کاهش پیوندهای هیدروژنی ژل‌سازی ضعیفی نشان میدهد (۱۴). رویکرد دیگر شامل استفاده از سلولز مرسریزه‌شده در روغن کلزا بود. پراکندگی‌های پودر سلولز با غلظت‌های ۵ تا ٤٠ درصد به صورت دستی در دمای اتاق هم‌زده شدند. نتایج نشان داد که غلظت حداقل ژل‌سازی و ویژگی‌های بافتی به اندازه فیبرهای سلولز نه منبع گیاهی آن بستگی دارد. این روش به دلیل سادگی و کاهش مصرف انرژی پتانسیل بالایی برای کاربردهای صنعتی دارد (۱۵).

روش‌های غیرمستقیم: روش غیرمستقیم تولید اولئوژل شامل استفاده از تکنیک‌هایی مانند امولسیون‌سازی، فوم‌سازی و... است که ابتدا یک فاز واسطه مانند امولسیون آب در روغن ایجاد شده و سپس با حذف فاز آبی مثلاً از طریق خشک کردن یا حرارت، ساختار ژلی با روغن و ژل‌ساز تشکیل می‌شود. بیش‌تر پلیمرهای مورد تأیید برای استفاده در مواد غذایی به طور ذاتی آب‌دوست هستند و بنابراین نمی‌توانند به طور مستقیم روغن را ساختاردهی کنند. موادی مانند پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدها به طور منظم در کاربردهای غذایی استفاده می‌شوند و معمولاً از نظر قوانین بسته به نوع خاص پروتئین یا پلی‌ساکارید و منبع آن مشکلی ایجاد نمی‌کنند. روش‌های غیرمستقیم اولئوژل‌سازی مفید هستند زیرا امکان استفاده از پلیمرهای آب‌دوست و آمفی‌فیلیک را در ساختاردهی روغن فراهم می‌کنند معمولاً با شروع از سیستم‌های غنی از آب و شامل مجموعه‌ای از مراحل برای حذف آب از سیستم است (۵).

روش‌های اصلی مبتنی بر الگوی امولسیون: روش‌های غیرمستقیم اولئوژل‌سازی مبتنی بر الگوی امولسیون با تهیه امولسیون روغن در آب آغاز می‌شوند. با توجه به شکل (۳) در روش امولسیون برای تولید اولئوژل ابتدا امولسیون آب در روغن با ژل‌ساز مانند (لسیتین) تهیه شده سپس فاز آبی با حرارت یا خشک کردن حذف می‌شود تا ساختار ژلی روغن باقی بماند. محققان روشی را معرفی کردند که در آن امولسیون تک‌پراکنده که یک امولسیونی است که در آن تمام قطرات فاز پراکنده مثلاً روغن در آب یا آب در روغن از نظر اندازه یکنواخت و همسان هستند با محلول ۱٪ بتا-لاکتوگلوبولین تهیه شده و قطرات روغن توسط پروتئین تثبیت می‌شوند. پس از جذب پروتئین متصل‌سازی حرارتی (۸۰ درجه سلسیوس، ۱۰ دقیقه) یا شیمیایی با گلوتارآلدئید انجام‌می‌شود. برای تولید اولئوژل شفاف دارای ساختار پلی‌هدرال، ابتدا شست‌شو برای حذف مواد اضافی انجام می‌شود. سپس گلیسرول به منظور محافظت از ساختار در برابر تنش‌های ناشی از فرآیند خشک‌کردن افزوده شده و در نهایت، خشک‌کردن در دمای اتاق صورت می‌پذیرد. این روش به دلیل پیچیدگی، نرخ خروجی پایین و نگرانی‌های ایمنی (متصل‌سازی شیمیایی) یا انرژی‌بر بودن (متصل‌سازی حرارتی) محدود است (۵ و ١٦) روش‌های اصلاح‌شده با حذف متصل‌سازی از پلی‌ساکاریدها (هیدروکسی

[1] Fumed Silica

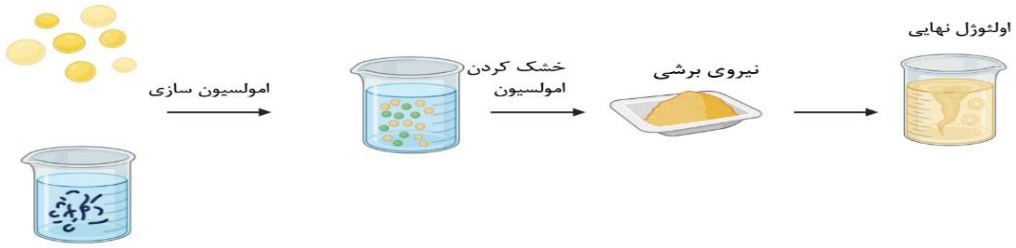
پروپیل متیل سلولز[1] و صمغ زانتان[2]) برای پایداری بهتر امولسیون استفاده می‌کنند (۲). در پژوهشی دیگر، امولژل‌ها[3] از طریق ترکیب یک فاز آبی با یک فاز روغنی (حاوی روغن دانه کتان و امولسیفایرها) در دمای کنترل‌شده تولید شدند و در ٤ درجه سلسیوس به مدت ٦٠ روز ذخیره شدند. امولژل‌ها رفتار جامدمانند، تیکسوتروپیک و برشی نازک‌شونده داشتند. مدول ذخیره[4] (G') بالاتر از مدول افت[5] (G") بود که نشان‌دهنده استحکام ژل است. این امولژل‌ها به‌عنوان چربی‌های پخش‌پذیر کم‌چرب (کم‌تر از ۳۰٪ چربی) و غنی از امگا-۳ معرفی شدند که می‌توانند جایگزین چربی‌های ناسالم در محصولات غذایی شوند (۱۷).

روش اصلاح‌شده مبتنی بر الگوی امولسیون: پژوهشگران با استفاده از پروتئین‌های متصل‌شده که در واقع پروتئین‌هایی است که به طور فیزیکی یا شیمیایی به یکدیگر متصل شده‌اند تا یک شبکه یا ساختار پلیمری بزرگ‌تر و یکپارچه را تشکیل دهند، قابلیت پلیمرهای آب‌دوست و آمفی‌فیلیک را برای ساختاردهی روغن نشان دادند (۱۶). محققان در این روش با ترکیب پلی‌ساکاریدهای فعال سطحی هیدروکسی پروپیل متیل سلولز یا متیل سلولز[6] و غیرفعال (صمغ زانتان) را اصلاح کردند. امولسیون روغن در آب با هموژنیزاسیون پرسرعت هیدروکسی پروپیل متیل سلولز یا متیل سلولز و افزودن صمغ زانتان تهیه شد که پایداری امولسیون و یکنواختی قطرات را بهبود بخشید. پس از خشک کردن در ۵۰-۸۰ درجه سلسیوس و برش ۳۰ ثانیه‌ای اولئوژل با بیش از ۹۷٪ روغن و بدون نشتی تولید شد. پلیمرهای با ویسکوزیته پایین‌تر ژل‌های قوی‌تری ایجاد کردند که به دلیل سختی سطح مشترک بود. این روش ویژگی‌های رئولوژیکی مانند مدول ذخیره بالا و بازیابی تیکسوتروپیک ارائه داد. روش جایگزین با ژلاتین و صمغ زانتان بدون متصل‌سازی از تعاملات پروتئین-پلی‌ساکارید بهره برد و با خشک کردن کوره‌ای یا انجمادی به اولئوژل تبدیل شد (۱۰). محققان با پروتئین‌های بدون اصلاح (ایزوله سویا و ۲٪ سدیم کازئینات) نیز موفقیت‌هایی کسب کردند اما تعاملات پروتئین-پلی‌ساکارید نیاز به بررسی بیشتر دارد (۱۸،۱۹).

رویکرد مبتنی بر الگوی میکروکپسول: در روش میکروکپسول برای تولید اولئوژل، روغن با ژل‌ساز در قالب میکروکپسول‌هایی با دیواره پلیمری یا لیپیدی محصور شده و سپس با فرآیندهایی مانند خشک کردن یا ژل‌سازی به ساختار ژلی تبدیل می‌شود. اولئوژل‌های ساخته‌شده با ژل‌سازهای کم‌وزن مولکولی مانند کریستال‌های چربی، حس دهانی و ویژگی‌های فرآوری مشابه چربی‌ها دارند، در حالی که ژل‌سازهای پلیمری سختی و یکنواختی بافتی ایجاد می‌کنند (۲۰). پژوهشگران با ارائه یک راهکار نوین مبتنی بر میکروکپسول‌های پالم استئارین تثبیت‌شده با متیل‌سلولز کاستی‌های روش‌های متداول اولئوژل‌سازی را برطرف کردند. روش‌های متداول اعم از مستقیم مانند سیستم اتیل‌سلولز-گلیسرول مونولئات و غیرمستقیم مانند امولسیون‌های پیکرینگ با زئین-استئارات به دلیل نیاز به فرآیندهای انرژی‌بر نظیر گرمایش بالا یا خشک کردن انجمادی، با چالش مقیاس‌پذیری روبه‌رو هستند. این راهکار جدید، گامی در جهت غلبه بر این محدودیت‌ها محسوب می‌شود (۲۱،۲۲،۲۳). امولسیون روغن در آب با رقیق‌سازی در آب یخ‌زده جامد شده و در ۳۰-۳۲ درجه سلسیوس

[1] Hydroxypropyl Methylcellulose
[3] Xanthan Gum
[4] Methylcellulose
[5] Freeze Drying
[6] Emulgel
[4] Storage Modulus
[5] Loss Modulus

خشک می‌شود. میکروکپسول‌ها در روغن پراکنده شده، تا ۷۰ درجه سلسیوس گرم می‌شوند تا کپسول‌ها ذوب شوند و رشته‌های پلیمری تشکیل دهند. خنک‌سازی به دمای اتاق شبکه‌ای از پالم استئارین کریستالیزه‌شده و متیل‌سلولز ایجاد می‌کند که کریستالیزاسیون کنترل‌شده‌ای نسبت به پالم استئارین خالص ارائه می‌دهد (۲۳).



شکل ۳- نمایش الگوی امولسیون جهت ساخت اولئوژل (۱۶).

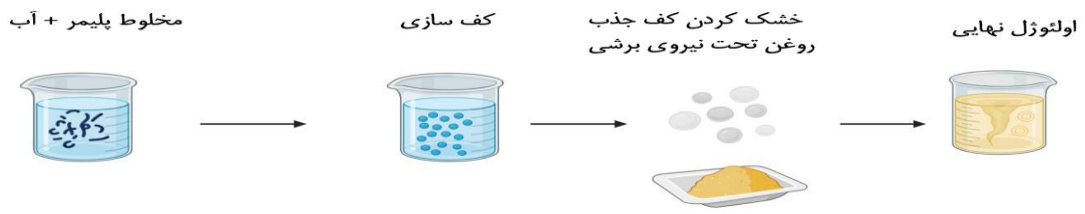
Figure 3. Display of the emulsion template for oleogel production (16).

اولئوزوم‌ها: اولئوزوم‌ها، میکروبادی‌های طبیعی در دانه‌ها و میوه‌های روغنی، قطرات روغنی کپسوله‌شده توسط غشای پروتئینی/ فسفولیپیدی هستند که برای ذخیره لیپید و محافظت در برابر تنش‌های محیطی عمل می‌کنند. این ساختار بستری مناسب برای تشکیل اولئوژل‌هاست اما کاربرد آن‌ها محدود است. پژوهشگران اولئوزوم‌های فندق را با صمغ زانتان یا پکتین و رسوب الکترواستاتیکی تثبیت کردند که پایداری امولسیون را بهبود بخشید. پس از خشک کردن انجمادی[1] و برش‌دهی اولئوژل با شبکه‌ای از کمپلکس‌های پروتئین‌اولئوزین **که** یک پروتئین ساختاری و آمفی‌فیلیک است که به طور طبیعی اجسام روغنی و دانه‌های روغنی یافت می‌شود و در غشاها و پلی‌ساکارید تشکیل می‌شود. این روش به دلیل استفاده از ساختارهای طبیعی، پایدار و اقتصادی است. تعاملات الکترواستاتیکی در سیستم‌های حاوی اولئوزوم سویا، آلژینات سدیم و صمغ زانتان نیز بررسی شده تا کاربردهای اولئوژل گسترش یابد (۲۴،۲۵).

روش مبتنی بر الگوی کف: در روش الگوی کف برای تولید اولئوژل با توجه به شکل (٤)، ابتدا یک کف پایدار با استفاده از پروتئین‌ها یا پلیمرهای محلول در آب مانند پروتئین آب پنیر در فاز آبی تشکیل می‌شود. در مرحله بعد، با انجام خشک کردن انجمادی، فاز آبی حذف شده و یک کرایوژل متخلخل ایجاد می‌گردد. این ساختار متخلخل در نهایت با جذب و به‌دام‌اندازی روغن مایع، تشکیل اولئوژل می‌دهد. محققان از پلیمرهای آب‌دوستی نظیر متیل‌سلولز (MC) و هیدروکسی‌پروپیل متیل‌سلولز (HPMC) به‌عنوان عامل کف‌ساز در این روش استفاده کرده‌اند. ویژگی آمفی‌فیلیک این پلیمرها، که ناشی از جایگزینی گروه‌های هیدروکسیل است، امکان تشکیل کف پایدار را فراهم می‌کند. برای مثال، محلول ۱ تا ۲ درصد HPMC تحت هموژنیزاسیون پرسرعت (۱۱۰۰۰ دور بر دقیقه) به کفی با حباب‌های ریز (کم‌تر از ۱۵۰ میکرومتر) تبدیل شده است. این کف پس از خشک کردن انجمادی به کرایوژل متخلخل تبدیل شد و پس از جذب روغن آفتاب‌گردان به میزان ۹۸ تا ۹۹ برابر وزن خود و برش پرسرعت، اولئوژلی بدون نشتی تولید نمود. برای بهبود پایداری کف، از ترکیب ژلاتین یا پروتئین نخود با صمغ زانتان نیز

[1] Whey Protein Isolate

استفاده شده است (۲۷،۲٦). همچنین پروتئین سبوس برنج با تنظیم pH به‌خوبی در این روش عمل کرده است. از مزایای کلیدی این روش حذف نیاز به دمای بالا و کاهش اکسیداسیون لیپیدها است؛ با این حال، خشک کردن انجمادی به عنوان یک مرحله انرژی‌بر، زمان‌بر و از محدودیت‌های این روش محسوب می‌شود (۲۸).



شکل ٤- نمایش الگوی کف جهت ساخت اولئوژل (۲۹).

Figure 4. Display of the foam template for oleogel production (29)

روش مبتنی بر الگوی هیدروژل: در روش هیدروژل با توجه به شکل (٥) برای تولید اولئوژل، ابتدا هیدروژل با ژل‌سازهای پلیمری مانند (کیتوزان) تشکیل شده و سپس با جایگزینی فاز آبی با روغن از طریق فرآیندهایی مانند تبادل حلال یا خشک کردن به اولئوژل تبدیل می‌شود. پژوهشگران روشی برای تولید اولئوژل با استفاده از ایزوله پروتئین آب پنیر[1] به‌عنوان تنها ژل‌ساز از طریق تبادل حلال توسعه دادند. ابتدا هیدروژل از ایزوله پروتئین آب پنیر با دناتوراسیون در ۸۵ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه تشکیل شد. هیدروژل‌ها به قطعات استوانه‌ای برش داده شده و با استفاده از حلال واسطه استون در مراحل تدریجی (۳۰٪، ۵۰٪، ۷۰٪ و ۱۰۰٪) با روغن آفتاب‌گردان جایگزین شدند. اولئوژل نهایی با ۹۱٪ روغن و کم‌تر از ۱٪ آب، مدول یانگ دو برابر هیدروژل داشت اما سفت و شکننده بود و انعطاف‌پذیری رئولوژیکی محدودی داشت. در روش جایگزین محلول از ایزوله پروتئین آب پنیر ٤٪ در pH۷/۵ دناتوره شد (۸۵ درجه سلسیوس، ۱۵ دقیقه)، هموژنیزه و با سانتریفیوژ تجمعات پروتئینی جمع‌آوری شدند. این تجمعات در استون و سپس روغن پراکنده شده و پس از تبخیر استون یا خشک کردن انجمادی، اولئوژل تشکیل شد. این روش با ایجاد شبکه‌ای از تعاملات آب‌دوست در محیط روغنی، امکان تنظیم بهتر ویژگی‌های رئولوژیکی را فراهم کرد (۳۰).

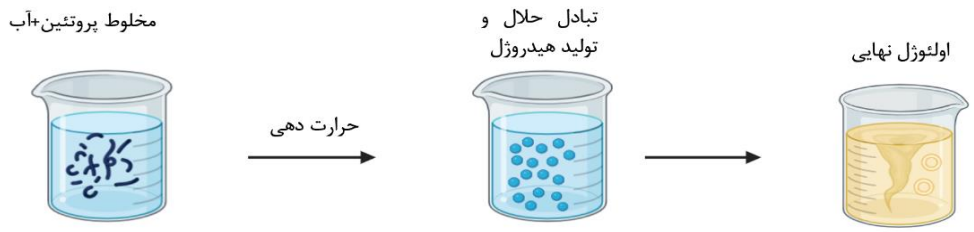
روش مبتنی بر الگوی آئروژل: در روش آئروژل با توجه به شکل (٦) برای تولید اولئوژل ابتدا آئروژل با ژل‌سازمانند سیلیکا یا پلیمر ساخته شده، سپس روغن به ساختار متخلخل آن نفوذ کرده و با تثبیت، به اولئوژل تبدیل می‌شود. محققان روش مبتنی بر الگوی آئروژل را معرفی کردند (۳۱). هیدروژل کاپاکاراگینان[2] که یک شبکه سه‌بعدی از پلی‌ساکارید کاپاکاراگینان است که مقادیر بسیار زیادی آب یا مایعات بیولوژیکی را در خود به دام می اندازد. این ساختار از طریق برهمکنش‌های فیزیکی مانند پیوندهای هیدروژنی، نیروهای یونی با جایگزینی مرحله‌ای آب با اتانول به ژل الکلی تبدیل شد و سپس با دی‌اکسید کربن فوق بحرانی[3] در ۱۱ مگاپاسکال و ٤٥ درجه سلسیوس به

[1] Whey Protein Isolate

[2] k-Carageenan

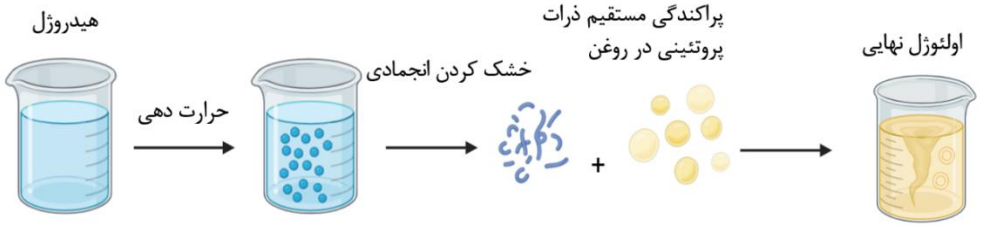
[3] Super Critical-CO_2

مدت ۸ ساعت خشک شد تا آئروژل مونولیتیک که یک آئروژل یک‌پارچه و تک‌قطعه‌ای که دارای ساختار سه‌بعدی متخلخل و پیوسته در ابعاد ماکروسکوپی است تشکیل شد. برخلاف آئروژل‌های پودری یا دانه‌ای این آئروژل‌ها به صورت بلوک‌های جامد یک تکه و فشرده شکل می‌گیرند. در این مطالعه آئروژل در روغن آفتاب‌گردان خیسانده شد و اولئوژل با ۲۰-۲۵٪ بیوپلیمر و سختی ۱۰۰-۳۰۰ نیوتن تولید کرد که ۶۰-۸۰٪ روغن را حفظ می‌کرد. افزودن کاهو یا استفاده از ضایعات سالاد و پروتئین آب پنیر سختی را کاهش و جذب روغن را تا ۱۵ برابر افزایش داد (۳۲). آئروژل‌های نشاسته با کیتوزان نیز ویژگی‌های مکانیکی و ساختاردهی را بهبود بخشیدند (۳۳). خشک کردن انجمادی به‌عنوان جایگزین $SC\text{-}CO_2$ با انجماد در ۸۰- درجه سلسیوس و خشک کردن در ۲۰- تا ۶۰- درجه سلسیوس، آئروژل‌هایی با منافذ کوچک‌تر تولید کرد اما ساختار ضعیف‌تری داشت. افزودن کربوکسی‌متیل کیتوزان به ایزوله پروتئین آب پنیر یا کنژوگه‌های آلژینات/پروتئین سویا جذب روغن را تا ۵-۹ و ۱۰ برابر و حفظ ۴۰-۹۶٪ روغن بهبود بخشید (۳۴). آئروژل‌های ژلاتین نیز با جذب ۲۰-۱۰۰ برابر روغن و بازیابی تیکسوتروپیک ۷۶-۹۴٪ موفق بودند (۳۵).



شکل ۵- نمایش الگوی هیدروژل جهت ساخت اولئوژل (۳۰).

Figure 5. Display of the hydrogel template for oleogel production (30).



شکل ۶- نمایش الگوی آئروژل جهت ساخت اولئوژل (۳۱).

Figure 6. Representation of the aerogel template for oleogel production (31).

روش مبتنی بر الگوی نانوفیبرهای الکتروریسی‌شده: روش الکتروریسی[1] فرآیندی الکتروهیدرودینامیکی، نانوفیبرهای بیوپلیمری مانند (ژلاتین، زئین، پروتئین آب پنیر) با قطر کمتر از ۱ میکرومتر تولید می‌کند که نیازی به ویژگی‌های امولسیون‌کننده یا کف‌زا ندارند و برای ساختاردهی روغن مناسب‌اند. پژوهشگران نانوفیبرهای ژلاتین را با میدان الکتریکی ۱/۳ کیلوولت بر سانتی‌متر در محلول اسید استیک تولید کردند. نانوفیبرها در ترت‌بوتانول هموژنیزه شده با خشک کردن انجمادی به آئروژل تبدیل شدند و در روغن کاملیا غوطه‌ور شدند تا اولئوژل تشکیل دهند. این

[1] Electrospinning

اولئوژل‌ها ۶۰-۱۲۵ برابر جرم اولیه روغن جذب کرده و ۶۰-۸۰٪ آن را با بازیابی تیکسوتروپیک ۳۶-۷۹٪ و آزادسازی ۴۰-۵۰٪ اسیدهای چرب در هضم آزمایشگاهی حفظ کردند (۳۵). در روشی نوین نانوفیبرهای پلی‌اتیلن اکسید با الکتروریسی بهبودیافته با اولتراسوند[1] در روغن‌های کلزا، گردو و بذر کتان پراکنده شده و با کریو-آسیاب[2] اولئوژل‌هایی با سختی وابسته به غلظت نانوفیبر بالای ۱۰٪ و غیراشباعیت روغن تولید کردند. محدودیت‌هایی مانند انسداد اسپینر[3] و زمان فرآوری طولانی همچنان چالش‌ساز است (۳۶).

روش نیمه‌مستقیم اولئوژل‌سازی: روش نیمه‌مستقیم ترکیبی از ویژگی‌های روش‌های مستقیم و غیرمستقیم با افزودن ذرات یا ژل‌سازهای نامحلول (۱۰-۶۰٪) به روغن و استفاده از مایع ثانویه آب (۲-۲۰٪) برای تشکیل اولئوژل عمل می‌کند. برخلاف روش‌های غیرمستقیم آب نمی‌تواند حذف شود زیرا ساختار خودپایدار اولئوژل وابسته به آن است. در سوسپانسیون‌های موئینه[4]، ذرات در روغن پراکنده شده و با افزودن آب و مخلوط کردن پل‌های موئینه تشکیل می‌دهند که منجر به تولید اولئوژل می‌شود. این روش بخشی از سیستم‌های سه‌جزئی ذره-مایع-مایع بسته به نسبت اجزا می‌تواند امولسیون‌های پیکرینگ[5]، بی‌ژل‌ها[6] یا مواد گرانوله[7] نیز تولید کند (۳۷).

روش نیمه‌مستقیم: سوسپانسیون‌های موئینه: سوسپانسیون‌های موئینه از طریق تشکیل پل‌های مایع بین ذرات با استفاده از نیروهای موئینه ساختار ژل‌مانند ایجاد می‌کنند. این نیروها به عواملی مانند اندازه ذرات، فاصله بین آن‌ها، کشش سطحی بین مایعات و زاویه تماس سه‌فازی وابسته‌اند. این روش به دو حالت تقسیم می‌شود:

- حالت پاندولار[8]: ذرات آب‌دوست در روغن پراکنده شده و مایع ثانویه (آب) با ترجیح تر کردن ذرات پل‌های پاندولار تشکیل می‌دهد. سطح اشباع نزدیک به صفر است.
- حالت موئینه: ذرات در مایع ترکننده (روغن) پراکنده شده و مایع ثانویه غیرترکننده شکاف‌ها را پر می‌کند خوشه‌هایی با سطح اشباع نزدیک به یک ایجاد می‌کند.

در هر دو حالت تبدیل از سوسپانسیون مایع‌مانند به ژل‌مانند رخ می‌دهد که ساختاردهی روغن را تسهیل می‌کند (۳۸،۳۹).

کاربردهای روش‌های نوین اولئوژل‌ها: روش‌های نوین تولید اولئوژل‌ها در صنایع غذایی برای جایگزینی چربی‌های ناسالم در محصولاتی مانند نان، کیک، شکلات، کره‌های گیاهی و فرآورده‌های گوشتی و لبنی کاربرد دارند. مطالعات اولیه‌هافمن و همکاران (۲۰۱۹) و مصطفی و همکاران (۲۰۱۸) بر ساختاردهی روغن‌های خوراکی با استفاده از سوسپانسیون‌های موئینه تمرکز داشتند. هافمن با استفاده از گرانول‌های نشاسته و ذرات کاکائو (۳۰-۳۵٪ کسر حجمی) و آب (۱۰-۳۰٪ کسر حجمی)، روغن آفتاب‌گردان را ساختاردهی کرد و افزودن گلیسرول استحکام ژل را افزایش داد اما ترتیب افزودن آب تأثیری بر خواص رئولوژیکی نداشت. محققان از ضایعات کشاورزی مانند پوست گوجه‌فرنگی و تفاله قهوه (۲۵٪ کسر حجمی ذرات و ۱۷-۵۷٪ آب) برای ساختاردهی روغن بادام‌زمینی استفاده کردند که با افزایش آب و کاهش اندازه ذرات از طریق هموژنیزاسیون فشار بالا،

[1] Ultrasound Electrospinning
[2] CryoMill
[3] Spinner
[4] Thixotropic Suspensions
[5] Pickering
[6] Bigels
[7] Granular Materials
[8] Pandola

ژل سفت‌تری تولید شد. این روش‌ها با ایجاد پل‌های موئینه، شبکه‌ای سه‌بعدی تشکیل داده و فاز روغنی را به دام می‌اندازند (۳۹،۴۰). چربی‌های سنتی مانند کره و مارگارین به دلیل داشتن اسیدهای چرب اشباع و ترانس با مشکلات سلامتی مانند بیماری‌های قلبی-عروقی مرتبط هستند. سازمان بهداشت جهانی حذف اسیدهای چرب ترانس و محدود کردن اسیدهای چرب اشباع به ۱۰٪ انرژی روزانه را توصیه کرده است. در پاسخ به تقاضای رو به رشد برای غذاهای سالم و پایدار، اولئوژل‌ها با استفاده از روغن‌های گیاهی غیراشباع مانند (زیتون، کانولا و سویا) و ژل‌سازهایی مثل موم‌ها، لسیتین و بیوپلیمرها توسعه یافته‌اند. این مواد با شبیه‌سازی عملکرد چربی‌های سخت، در محصولاتی مانند اسپردها، نانوایی و فرآورده‌های گوشتی کاربرد دارند و پروفایل لیپیدی بهتری نسبت به چربی‌های سنتی ارائه می‌دهند (۴۱،۴۲،۴۳،۴۴).

جدول ۱- روش‌های تولید اولئوژل‌ها: مروری بر عملکرد

Table 1. Production of Oleogels: A Review of Functionality

روش تولید	محصول حاصل	ویژگی‌های کلیدی	مزایا	معایب	منابع
سوسپانسیون‌های موئینه	ژل نیمه‌جامد روغن آفتاب‌گردان	استفاده از گرانول‌های نشاسته و ذرات کاکائو (۳۰-۳۵٪ کسر حجمی) و (۱۰-۳۰٪) آب؛ افزودن گلیسرول برای افزایش استحکام ژل؛ ویژگی‌های رئولوژیکی وابسته به کسرهای حجمی؛ ترتیب افزودن مایع ثانویه بی‌تأثیر	پایداری بالا، استفاده از مواد طبیعی، مناسب برای روغن‌های غیراشباع	نیاز به کنترل دقیق کسرهای حجمی، پیچیدگی در مقیاس‌پذیری	(۳۸)
اولئوژل‌سازی با روش مستقیم	محصولات نانوایی	استفاده از ژل‌سازهای کریستالی مانند موم‌های کارنوبا، کندلیلا (۲-۱۰٪ وزنی)، اتیل‌سلولز و مونوگلیسریدها؛ مناسب برای روغن‌های غیراشباع (زیتون، کانولا)؛ پروفایل لیپیدی نزدیک به روغن پایه	فرآیند ساده، انعطاف‌پذیری در انتخاب روغن، هزینه نسبتاً پایین	شکنندگی در غلظت‌های بالا، چالش در تقلید پروفایل ذوب چربی‌های اشباع	(۳)
اولئوژل‌سازی با روش غیرمستقیم	محصولات گوشتی	استفاده از بیوپلیمرها (پروتئین‌ها، پلی‌ساکاریدها) از طریق امولسیون‌های آب در روغن؛ ساختارهای پیچیده با پایداری بالا؛ نیاز به فرآیندهای چندمرحله‌ای	مناسب برای محصولات پیچیده، بهبود بافت و پایداری	فرآیند پیچیده، هزینه بالا، چالش در مقیاس‌پذیری صنعتی	(۱۳)
آئروژل‌های مبتنی بر اولئوژل	محصولات نانوایی، دسرها	استفاده از آئروژل‌های بیوپلیمری (سلولز، نشاسته) برای جذب روغن؛ ساختار متخلخل با ظرفیت جذب روغن بالا (تا ۹۰٪ وزنی)	بافت سبک، ظرفیت بالای جذب روغن، مناسب برای محصولات کم‌کالری	فرآیند تولید پیچیده، هزینه بالا، نیاز به تجهیزات تخصصی	(۳۱)
نانوفیبرهای الکتروریسی‌شده	پوشش‌های غذایی	استفاده از نانوفیبرهای پلی‌ساکاریدی (کیتوزان) یا پروتئینی برای ساختاردهی روغن؛ کنترل دقیق خواص مکانیکی و پروفایل ذوب	کنترل عالی بر خواص رئولوژیکی، کاربردهای نوآورانه در بسته‌بندی	نیاز به تجهیزات پیشرفته، محدودیت مقیاس‌پذیری، هزینه بالا	(۳۵)
امولسیون‌های مبتنی بر اولئوژل	غذاهای کاربردی، سس‌ها، سس مایونز	ترکیب اولئوژل‌ها با امولسیون‌های آب در روغن؛ امکان گنجاندن ترکیبات محلول در آب (ویتامین‌ها) و چربی (فیتواسترول‌ها)؛ پایداری حرارتی بالا	انعطاف‌پذیری در فرمولاسیون، مناسب برای غذاهای سلامت‌بخش	پیچیدگی در فرمولاسیون، چالش‌های پایداری طولانی‌مدت	(۱۶)

با وجود پیشرفت‌ها، اولئوژل‌ها با چالش‌هایی مانند کنترل دقیق پروفایل ذوب، خواص مکانیکی و رئولوژیکی، پذیرش حسی و مقیاس‌پذیری مواجه هستند. روش‌های نوین مانند سوسپانسیون‌های موئینه، آئروژل‌ها و نانوفیبرهای الکتروریسی‌شده پتانسیل بهبود مقیاس‌پذیری و عملکرد را دارند، اما نیاز به فناوری‌های کم‌هزینه‌تر و ایمن برای مصرف انسانی وجود دارد. تحقیقات آینده باید بر ساده‌سازی روش‌های تولید، بهبود ویژگی‌های حسی، افزایش پایداری اکسیداسیون و بررسی اثرات فیزیولوژیکی متمرکز شود تا کاربرد اولئوژل‌ها در صنعت غذا گسترش یابد و جایگزین مناسبی برای چربی‌های سنتی شوند (۱،۲،٤،٥،٨).

چالش‌ها و چشم اندازهای آینده روش‌های تولید اولئوژل‌ها: انتخاب اولئوژل‌ها برای جایگزینی چربی‌های اشباع به دلیل چالش‌هایی مانند تقلید پروفایل ذوب، خواص مکانیکی و رئولوژیکی با محدودیت‌هایی مواجه است. افزایش غلظت ژل‌ساز می‌تواند سختی مشابه چربی‌های اشباع ایجاد کند اما ممکن است باعث شکنندگی و کاهش ویژگی‌های حسی شود (۸). رویکردهایی مانند استفاده از مخلوط ژل‌سازها، پلاستی‌سایزرها و اولئوژل‌های کامپوزیتی برای بهبود تغییر شکل پلاستیک و تیکسوتروپی بررسی شده‌اند. با این حال اطلاعات محدودی درباره هضم، متابولیسم ژل‌سازها و اثرات فیزیولوژیکی آن‌ها وجود دارد که نیاز به تحقیقات گسترده‌تر در محیط زنده را نشان می‌دهد. روش‌های نوین مانند سوسپانسیون‌های موئینه و فناوری‌های فرآوری (خشک کردن با مایکروویو یا گرمایش اهمی) می‌توانند خواص و مقیاس‌پذیری اولئوژل‌ها را بهبود بخشند. برای تسریع جایگزینی چربی‌های اشباع، نیاز به درک بهتر ساختاردهی ژل‌سازها، بهینه‌سازی پروفایل ذوب، افزایش پایداری اکسیداسیون و بهبود ویژگی‌های حسی است. اولئوژل‌ها می‌توانند حامل ترکیبات زیست‌فعال مانند فیتواسترول‌ها و کورکومین باشند و امولسیون‌های مبتنی بر آن‌ها امکان توسعه غذاهای کاربردی با خواص سلامت‌بخش را فراهم می‌کنند (۸). با وجود پیشرفت‌ها، مقیاس‌بندی به سطح صنعتی و ارزیابی امکان‌سنجی فنی و اقتصادی همچنان چالش‌برانگیز است. ابزارهای نوآورانه و روش‌های فرآوری جدید می‌توانند محدودیت‌ها را برطرف کرده و فرصت‌های تازه‌ای برای تولید اولئوژل‌های کارآمدتر ایجاد کنند (۱).

نتیجه گیری

این مقاله مروری به بررسی دستاوردهای اخیر در روش‌های تولید اولئوژل، کاربردهای آن‌ها، چالش‌های موجود و چشم‌اندازهای آینده این حوزه می‌پردازد. روش‌های اولیه تولید اولئوژل از تکنیک‌های سنتی ساختاردهی روغن و چربی‌های جامد موجود در طبیعت الهام گرفته شده بود. این روش‌ها ساده بودند و شامل افزودن مستقیم ژل‌سازهای محلول در روغن می‌شدند که از طریق تعاملات حلال–حلال، حلال–ذره و ذره–ذره، روغن را به ساختاری ژل‌مانند تبدیل می‌کردند. این مطالعات اولیه نقش مهمی در شناسایی ژل‌سازهای اصلی و پایه‌گذاری تحقیقات اولئوژل ایفا کردند. با روشن شدن قابلیت‌های اولئوژل‌ها پژوهشگران به سمت روش‌های پیشرفته‌تری حرکت کردند که شامل مراحلی مانند تولید هیدروژل‌ها، امولسیون‌ها، کف‌ها، آئروژل‌ها، فیبرها و سوسپانسیون‌های ذره‌ای بود. این نوآوری‌ها با هدف گسترش تنوع ژل‌سازها، بهبود پذیرش حسی توسط مصرف‌کنندگان، رفع کاستی‌های روش‌های پیشین و تنظیم دقیق خواص اولئوژل‌ها برای کاربردهای خاص انجام شدند. در این مقاله طبقه‌بندی اولئوژل‌ها بر

اساس پارامترهای مرتبط با صنعت مورد بحث قرار گرفته است تا مزایا و کاربردهای آن‌ها به جامعه نزدیک‌تر شود. تحقیقات در حوزه اولئوژل‌ها همچنان در حال پیشرفت است و انتظار می‌رود روش‌های نوآورانه جدیدی در آینده ظهور کنند.

References

1. Patel, A. R., & Dewettinck, K. (2016). Edible oil structuring: an overview and recent updates. *Food & function*, *7*(1), 20-29.
2. Marangoni, A. G., & Garti, N. (Eds.). (2018). *Edible oleogels: structure and health implications*. Elsevier.
3. Patel, A. R. (2015). *Alternative routes to oil structuring* (pp. 15-27). New York, NY, USA:: Springer International Publishing.
4. Martins, A. J., Vicente, A. A., Cunha, R. L., & Cerqueira, M. A. (2018). Edible oleogels: An opportunity for fat replacement in foods. *Food & function*, *9*(2), 758-773.
5. Scholten, E. (2019). Edible oleogels: How suitable are proteins as a structurant?. *Current Opinion in Food Science*, *27*, 36-42.
6. Edmund Daniel Co, & Marangoni, A. G. (2012). Organogels: An alternative edible oil-structuring method. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, *89*(5), 749-780.
7. Silva, R. C. D., Ferdaus, M. J., Foguel, A., & da Silva, T. L. T. (2023). Oleogels as a fat substitute in food: A current review. *Gels*, *9*(3), 180.
8. Simopoulos, A. P. (2008). The importance of the omega-6/omega-3 fatty acid ratio in cardiovascular disease and other chronic diseases. *Experimental biology and medicine*, *233*(6), 674-688.
9. Scharfe, M., & Flöter, E. (2020). Oleogelation: From scientific feasibility to applicability in food products. *European journal of lipid science and technology*, *122*(12), 2000213.
10. Pinto, T. C., Sabet, S., García, A. K., Kirjoranta, S., & Valoppi, F. (2024). Oleogel preparation methods and classification. In C. Palla & F. Valoppi (Eds.), *Advances in oleogel development, characterization, and nutritional aspects* (pp. 77–114). Springer.
11. Rogers, M. A. (2009). Novel structuring strategies for unsaturated fats–Meeting the zero-trans, zero-saturated fat challenge: A review. *Food Research International*, *42*(7), 747-753.
12. Marangoni, A. G., Van Duynhoven, J. P., Acevedo, N. C., Nicholson, R. A., & Patel, A. R. (2020). Advances in our understanding of the structure and functionality of edible fats and fat mimetics. *Soft matter*, *16*(2), 289-306.
13. Wang, F. C., Gravelle, A. J., Blake, A. I., & Marangoni, A. G. (2016). Novel trans fat replacement strategies. *Current Opinion in Food Science*, *7*, 27-34.
14. Patel, A. R., Mankoč, B., Sintang, M. B., Lesaffer, A., & Dewettinck, K. (2015). Fumed silica-based organogels and ‘aqueous-organic’bigels. *Rsc Advances*, *5*(13), 9703-9708.
15. David, A., David, M., Lesniarek, P., Corfias, E., Pululu, Y., Delample, M., & Snabre, P. (2021). Oleogelation of rapeseed oil with cellulose fibers as an innovative strategy for palm oil substitution in chocolate spreads. *Journal of Food Engineering*, *292*, 110315.
16. Romoscanu, A. I., & Mezzenga, R. (2006). Emulsion-templated fully reversible protein-in-oil gels. *Langmuir*, *22*(18), 7812-7818.
17. Nasirpour-Tabrizi, P., Azadmard-Damirchi, S., Hesari, J., Heshmati, M. K., & Savage, G. P. (2020). Rheological and physicochemical properties of novel low-fat emulgels containing flaxseed oil as a rich source of ω-3 fatty acids. *Lwt*, *133*, 110107.
18. Abdolmaleki K, Alizadeh L, Nayebzadeh K, Hosseini SM, Shahin R (2020) Oleogel production based on binary and ternary mixtures of sodium caseinate, xanthan gum, and guar gum:optimization of hydrocolloids concentration and drying method. J Texture Stud 51:290–299.
19. Alizadeh L, Abdolmaleki K, Nayebzadeh K, Hosseini SM (2020) Oleogel fabrication base on sodium caseinate, hydroxypropyl methylcellulose, and beeswax: effect of concentration, oleogelation method, and their optimization. J Am Oil Chem Soc 97:485–496.

20. Patel, A. R. (2017). Methylcellulose-coated microcapsules of Palm stearine as structuring templates for creating hybrid oleogels. *Materials Chemistry and Physics*, *195*, 268-274.
21. Stortz TA, Marangoni AG (2014) The replacement for petrolatum: thixotropic ethylcelluloseoleogels in triglyceride oils. Green Chem 16:3064–3070.
22. Gravelle AJ, Davidovich-Pinhas M, Barbut S, Marangoni AG (2017) Influencing the crystallization behavior of binary mixtures of stearyl alcohol and stearic acid (sosa) using ethylcellulose. Food Res Int 91:1–10.
23. Gao ZM, Yang XQ, Wu NN, Wang LJ, Wang JM, Guo J, Yin SW (2014) Protein-based pickering emulsion and oil gel prepared by complexes of zein colloidal particles and stearate. JAgric Food Chem 62:2672–2678.
24. Nikiforidis CV (2019) Structure and functions of oleosomes (oil bodies). Adv Colloid Interf Sci 274:102039.
25. Zambrano JC, Vilgis TA (2023) Tunable oleosome-based oleogels: influence of polysaccharide type for polymer bridging-based structuring. Food Hydrocoll 137.
26. Abdollahi M, Goli SAH, Soltanizadeh N (2020) Physicochemical properties of foam-templated oleogel based on gelatin and xanthan gum. Eur J Lipid Sci Technol 122:1900196.
27. Mohanan A, Tang YR, Nickerson MT, Ghosh S (2020) Oleogelation using pulse protein stabilized foams and their potential as a baking ingredient. RSC Adv 10:14892–14905.
28. Wei F, Lu M, Li J, Xiao J, Rogers MA, Cao Y, Lan Y (2022) Construction of foam-templated oleogels based on rice bran protein. Food Hydrocoll 124:107245.
29. Patel AR, Schatteman D, Lesaffer A, Dewettinck K (2013) A foam-templated approach for fabricating organogels using a water-soluble polymer. RSC Adv 3:22900–22903.
30. de Vries A, Hendriks J, van der Linden E, Scholten E (2015) Protein oleogels from protein hydrogels via a stepwise solvent exchange route. Langmuir 31:13850–13859.
31. Manzocco L, Valoppi F, Calligaris S, Andreatta F, Spilimbergo S, Nicoli MC (2017) Exploitation of κ-carrageenan aerogels as template for edible oleogel preparation. Food Hydrocoll 71:68–75.
32. Plazzotta S, Calligaris S, Manzocco L (2019) Structure of oleogels from κ-carrageenan templates as affected by supercritical-co2-drying, freeze-drying and lettuce-filler addition.Food Hydrocoll 96:1–10
33. Alavi, F., & Ciftci, O. N. (2023). Effect of starch type and chitosan supplementation on physicochemical properties, morphology, and oil structuring capacity of composite starch bioaerogels. *Food Hydrocolloids*, *141*, 108637.
34. Chen K, Zhang H (2020) Fabrication of oleogels via a facile method by oil absorption in the aerogel templates of protein-polysaccharide conjugates. ACS Appl Mater Interfaces 12:7795–7804.
35. Li J, Zhang H (2023) Efficient fabrication, characterization, and in vitro digestion of aerogel templated oleogels from a facile method: electrospun short fibers. Food Hydrocoll 135:108185.
36. Valoppi F, Schavikin J, Lassila P, Laidmäe I, Heinämäki J, Hietala S, Haeggström E, Salmi A(2023) Formation and characterization of oleogels obtained via direct dispersion of ultrasound-enhanced electrospun nanofibers and cold milling. Food Struct 37:100338.
37. Koos E (2014) Capillary suspensions: particle networks formed through the capillary force.Curr Opin Colloid Interface Sci 19:575–584.
38. Koos E, Willenbacher N (2011) Capillary forces in suspension rheology. Science 331:897–900.
39. Hoffmann S, Koos E, Willenbacher N (2014) Using capillary bridges to tune stability and flow behavior of food suspensions. Food Hydrocoll 40:44–52.
40. Mustafa, W., Pataro, G., Ferrari, G., & Donsì, F. (2018). Novel approaches to oil structuring via the addition of high-pressure homogenized agri-food residues and water forming capillary bridges. *Journal of Food Engineering*, *236*, 9-18.
41. Mensink, R. P., Zock, P. L., Kester, A. D., & Katan, M. B. (2003). Effects of dietary fatty acids and carbohydrates on the ratio of serum total to HDL cholesterol and on serum lipids

and apolipoproteins: a meta-analysis of 60 controlled trials. *The American journal of clinical nutrition*, *77*(5), 1146-1155.

42. Mozaffarian, D., Katan, M. B., Ascherio, A., Stampfer, M. J., & Willett, W. C. (2006). Trans fatty acids and cardiovascular disease. *New England Journal of Medicine*, *354*(15), 1601-1613.
43. Willett, W. C. (2012). Dietary fats and coronary heart disease. *Journal of internal medicine*, *272*(1), 13-24.
44. World Health Organization. (2023). *Saturated fatty acid and trans-fatty acid intake for adults and children: WHO guideline*. World Health Organization.