

Research Article
Vol. 22, No. 2, May-June, 2026, p. 193-206

Production of Oleogel Derived from Canola Oil and a Combination of Emulsifiers and Methylcellulose Hydrocolloid via a Direct Method as a Shortening Substitute

M. Ghandrezaee¹, M. Mazaheri Tehrani^{1*}, R. Farhoosh^{1*}, P. Parsa¹

1- Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran

(*- Corresponding Authors Email: mmtehrani@um.ac.ir, rfarhoosh@um.ac.ir)

Received: 18.03.2026	How to cite this article:
Revised: 13.05.2026	Ghandrezaee, M., Mazaheri Tehrani, M., Farhoosh, R., & Parsa, P. (2026). Production of oleogel derived from canola oil and a combination of emulsifiers and methylcellulose hydrocolloid via a direct method as a shortening substitute. <i>Iranian Food Science and Technology Research Journal</i> , 22(2), 193-206. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.98161.1558
Accepted: 19.05.2026	
Available Online: 31.05.2026	

Introduction

Considering the adverse effects of saturated fatty acids and particularly trans-fats found in shortenings on human health, the development and application of oleogels in food production have become essential. Oleogelation is a valuable method for producing semi-solid and gel-like structures from trans-free unsaturated liquid oils. Nowadays, multi-component oleogels, formulated by combining high-molecular-weight and low-molecular-weight gelators, offer new horizons in the design of fat substitutes. In this context, the method of emulsifier incorporation (whether as powder or molten mixture) may significantly influence both the physicochemical properties and functional performance of the resulting oleogels. Moreover, utilizing compounds such as methylcellulose (MC) in oleogel production typically requires complex and costly methods. To overcome this, MC can be added to the molten mixture of emulsifiers and dissolved directly. The primary focus of this research is to investigate the synergistic interplay between the specific ratios of Lactic Acid Esters of Mono- and Diglycerides (LACTEM) and Diacetyl Tartaric Acid Esters of Mono- and Diglycerides (DATEM) and the structural support provided by MC.

Materials and Methods

This study investigated the synergistic effect of combining LACTEM with DATEM at various ratios (30:10, 10:30, 40:0, 0:40) alongside a constant amount of Distilled Monoglycerides (DMG). Furthermore, the effect of direct dissolution of MC (0% and 2%) on the textural, physicochemical, fatty acid profile, and Solid Fat Content (SFC) of the resulting oleogels was evaluated in comparison with commercial shortening. The preparation method involved melting the emulsifier blend at 70°C, followed by the direct addition and dissolution of MC at 80°C. This molten matrix was cooled at 25°C for 24 h to initiate full co-crystallization of the surfactants and the polymer. In the next step, the mixture was pulverized using a laboratory mill (spray chilling would be utilized at an industrial scale). The resulting powder was then added to liquid canola oil at a concentration of 15% (w/w). The mixture was heated to 70°C until the oil becomes completely transparent. Finally, the samples were cooled at 25°C for 24 h to form the oleogel.

Results and Discussion

Regarding Oil Binding Capacity (OBC), some treatments exhibited a slight decline after 30 days; however, samples containing LACTEM/DATEM and MC maintained their OBC throughout the 30-day period. In terms of textural hardness, samples containing two different ratios of LACTEM/DATEM emulsifier, with and without MC,



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.98161.1558>

exhibited greater similarity to the control sample. Notably, samples with the higher DATEM ratio showed no statistically significant difference compared to the shortening sample. Also, the peroxide value (PV) of the oleogel samples was significantly higher than that of the shortening sample ($p < 0.001$). However, the rate of PV increase during the second 15-day period was lower in all oleogel samples. Specifically, the LACTEM/DATEM10-30-MC2 sample exhibited the lowest rate of PV increase. In this sample, the peroxide value at day 30 increased by 1.93-fold compared to day 15, whereas the shortening sample showed a 5.06-fold increase in peroxide value over the same period. It should be noted that the peroxide value (PV) only reflects primary oxidation products; therefore, for a more comprehensive assessment of oxidative stability and the formation of secondary oxidation products, future studies are recommended to incorporate additional indices, such as the p-anisidine value (p-AV) or thiobarbituric acid reactive substances (TBARS). Furthermore, despite the higher solid fat content (SFC) inherent in conventional shortening, the optimized oleogels offered a superior nutritional profile, achieved through a 16.77–17.7% reduction in saturated fatty acids and almost-total elimination of trans isomers.

Conclusion

In conclusion, the synergistic effect of low-molecular-weight emulsifiers and methylcellulose via direct dissolution offers a viable strategy for promoting public health, as it effectively eliminates trans fats while preserving the essential functional characteristics of the lipid system.

Funding Sources

This research was supported by a research grant from the Ferdowsi University of Mashhad (Grant No. 3.5655), and also by Pars Behboud Asia Company.

Acknowledgement

We extend our sincere appreciation to Pars Behboud Asia Company for their financial support, supply of emulsifiers, provision of laboratory facilities, and technical collaboration of this research.

Keywords: Direct dissolution method, LACTEM/DATEM ratio, Methylcellulose hydrocolloid, Multi-component oleogels, Shortening replacement

مقاله پژوهشی

جلد ۲۲، شماره ۲، خرداد- تیر ۱۴۰۵، ص. ۱۹۳-۲۰۶

تولید اولئوژل حاصل از روغن کانولا و ترکیب امولسیفایرها و هیدروکلئوئید متیل سلولز با روش مستقیم به عنوان جایگزین شورتینینگ

مریم قنادرضایی^۱ - مصطفی مظاهری تهرانی^{۱*} - رضا فرهوش^{۱*} - پریسا پارسا^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۹

چکیده

باتوجه به پیامدهای منفی مصرف اسیدهای چرب اشباع و ترانس موجود در شورتینینگها بر سلامت انسان، لزوم توسعه و کاربرد اولئوژلها در محصولات غذایی احساس می گردد. امروزه اولئوژلهای چندجزئی حاصل از ترکیب ماده ژل ساز با وزن مولکولی بالا همچون متیل سلولز، چشم انداز نوینی را در طراحی چربی های جایگزین فراهم آورده اند. اما استفاده از ترکیبات مذکور در تولید اولئوژلها، نیازمند به کاربردن روش های پیچیده و هزینه بر است، برای حل این مشکل می توان متیل سلولز را در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد به مخلوط ذوب شده امولسیفایرها افزود و این ترکیب را به صورت مستقیم حل نمود. در این پژوهش اثر ترکیب مواد ژل ساز شامل: استر اسید لاکتیک با گلیسرول مونواسترات (LACTEM) و استرهای مونو(دی) گلیسرید دی استیل تارتاریک اسید (DATEM) در نسبت های مختلف (۱۰:۳۰، ۳۰:۱۰، ۴۰:۲۰، ۴۰:۴۰) در مقایسه با امولسیفایر مونودی گلیسرید تقطیر شده (DMG) و همچنین اثر انحلال مستقیم هیدروکلئوئید متیل سلولز (۲،۰ درصد) بر خصوصیات بافتی، فیزیکی و شیمیایی، ترکیب اسیدهای چرب و محتوای چربی جامد اولئوژل حاصل از روغن کانولا در مقایسه با شورتینینگ تجاری بررسی شد. تیمارهای اولئوژل حاوی LACTEM/DATEM و متیل سلولز، پایداری ساختاری مطلوبی نشان دادند؛ به طوری که نمونه های LACTEM/DATEM10:30-MC2 و LACTEM/DATEM30:10-MC2 پس از ۳۰ روز، ظرفیت نگهداری روغن را در سطح ۱۰۰ درصد حفظ کردند. سختی بافت این نمونه ها (۵/۵۷ و ۴/۵۷) مشابهت بالایی با شورتینینگ (۵/۰۲) داشت. از منظر پایداری اکسیداتیو، نرخ افزایش عدد پراکسید در نمونه LACTEM/DATEM10:30-MC2 بین روزهای ۱۵ تا ۳۰ تنها ۱/۹۳ برابر بود، در حالی که این شاخص برای شورتینینگ به ۵/۰۶ برابر رسید. در نهایت، اولئوژل های بهینه با کاهش ۱۶/۷۷ تا ۱۷/۷۰ درصدی اسیدهای چرب اشباع و حذف ایزومرهای ترانس، جایگزین تغذیه ای بسیار مطلوب تری محسوب می شوند. در نتیجه، هم افزایی امولسیفایرها با وزن مولکولی پایین و متیل سلولز به روش انحلال مستقیم، ضمن حذف چربی های ترانس و حفظ ویژگی های عملکردی، در ارتقای سلامت عمومی جامعه مؤثر می باشد.

واژه های کلیدی: اولئوژل های چند جزئی، انحلال مستقیم، شورتینینگ، متیل سلولز، نسبت امولسیفایرهای لاکتم/ داتم

مقدمه

شورتینینگها از روغن هیدروژنه یا مخلوطی از روغن های هیدروژنه، غیرهیدروژنه و امولسیفایرها تهیه می گردند (Mahjoob, Hakimzadeh, Ataye, & Jamshid, 2022). در طی فرآیند هیدروژناسیون برای تهیه شورتینینگها، اسیدهای چرب اشباع ترانس تولید می گردند که موجب افزایش لیپوپروتئین های کلسترول با دانسیته

شورتینینگها روغن هایی هستند که به طور معمول در دمای اتاق جامد می باشند و در تهیه فرآورده های نانوائی، قنادی و سرخ کردن به منظور ایجاد محصولی با بافت، طعم و رنگ مطلوب کاربرد دارند. از جمله فرآیندهای رایج در تولید شورتینینگها، هیدروژناسیون می باشد.

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*)- نویسندگان مسئول: rfarhoosh@um.ac.ir, mmtehrani@um.ac.ir (Email:)

و کربوهیدرات‌ها در دسته مواد ژل‌ساز با وزن مولکولی بالا قرار دارند (Qiu, Zhang, Bang, & Monoacylglycerol, 2024).

مونوگلیسرید تقطیر شده^۱ (دارای بیش از ۹۰ درصد مونوگلیسرید) از واکنش استریفیکاسیون تری‌گلیسریدها با گلیسرول به‌دست می‌آید. این امولسیفایر از جمله مواد ژل‌سازی است که در غلظت (۲/۵ درصد به بالا) دارای خاصیت به‌دام‌اندازی روغن مایع در یک شبکه کریستالی می‌باشد و همچنین ظرفیت نگهداری روغن بالا، توانایی ساختارسازی مؤثر و ایجاد خواص الاستیک مطلوب در روغن، DMG را به‌عنوان یک ماده ژل‌ساز ایده‌آل مطرح می‌سازد (Palla, Dominguez, & Carrín, 2022). در نتیجه مونوگلیسرید تقطیر شده در ترکیب پودری مورد انتخاب به‌عنوان جزء ثابت (۶۰ درصد) انتخاب شده است. استر اسید لاکتیک با گلیسرول مونواسترات^۲ نیز به‌عنوان یک ترکیب کاهش‌دهنده کشش سطحی در سیستم‌های امولسیون روغن در آب و آب در روغن محسوب می‌شود. این امولسیفایر در تولید خامه‌های لبنی و غیرلبنی، کیک و کلوچه، شورتینگ‌ها و شکلات کاربرد دارد. استرها (مونو(دی) گلیسرید دی‌استیل تارتاریک اسید^۳ یک امولسیفایر آبیونی با ساختار کریستالی و درجه غذایی است که در ترکیب با مونوگلیسرید تقطیره شده به‌دلیل ایجاد ساختار کریستالی مستحکم سبب افزایش ظرفیت نگهداری روغن و بهبود سرعت بلوری شدن فاز چربی می‌گردد (Hasenhuettl, 2019). اخیراً امولسیفایر DATEM در مطالعاتی به‌عنوان ماده ژل‌ساز روغن مورد استفاده قرار گرفته است و موجب بهبود ساختار کریستالی محصول نهایی (کروسان) گردیده است (Mao, Ye, & Meng, 2024).

هیدروکلوئیدها جزو مواد ژل‌ساز پلیمری یا دارای وزن مولکولی بالا طبقه‌بندی می‌گردند. متیل سلولز جزو ساده‌ترین مشتقات سلولز است که از طریق جایگزینی گروه‌های هیدروکسیل با متوکسی در سلولز، تولید می‌گردد که باعث افزایش حلالیت، ویسکوزیته، خواص سطحی، زیست‌سازگاری آن می‌شود. متیل سلولز به‌عنوان یک ماکرومولکول زیستی مهم و پرکاربرد در ساخت اولئوزل‌ها به‌خصوص در صنایع غذایی، دارویی و محیط‌زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌علاوه متیل سلولز یک هیدروکلوئید ایمن و در دسترس است، دارای عملکرد محدود گسترده‌ای از دما و pH می‌باشد و به‌عنوان جانشین چربی جامد در فرآورده‌های کم‌کالری کاربرد دارد (Naderi, Mohammad, Rashidi, & Mahdi, 2024; Xu et al., 2023). اما نکته قابل توجه این است که متیل سلولز به‌طور مستقیم در روغن حل نمی‌شود و انحلال به‌طور غیرمستقیم به‌وسیله روش‌هایی همچون قالب‌زنی امولسیون و کف، نیازمند مراحل پیچیده، زمان‌بر و پرهزینه است که در مقیاس

کم و در مقابل کاهش لیپوپروتئین‌ها با دانسیته بالا و در نتیجه موجب افزایش کلوسترول خون، چاقی، بیماری‌های قلبی و عروقی و ... می‌شوند (Wang, Chandrapala, Truong, & Farahnaky, 2022). لذا لزوم جایگزینی این ترکیبات در کاربردهای صنایع غذایی به‌جهت کاهش خطرات ناشی از مصرف اسیدهای چرب اشباع برای سلامتی انسان‌ها و در عین حال دست‌یابی به محصولی خصوصیات عملکردی مناسب احساس می‌گردد. التئوزلاسیون یکی از روش‌های مفید جهت بدست آوردن ساختارهای نیمه‌جامد و ژل‌مانند از روغن‌های مایع با اسیدچرب غیراشباع و فاقد ترانس می‌باشد (Meng, Guo, Wang, & Liu, 2019). در این خصوص چگونگی استفاده ترکیبی از امولسیفایرها (به‌صورت ترکیب پودری یا مذاب) می‌تواند برخواص فیزیکوشیمیایی و عملکردی آن‌ها و اولئوزل اثرگذار باشد. نکته دیگری که حائز اهمیت است، چگونگی انحلال مواد ژل‌ساز (روغن مستقیم یا غیرمستقیم) به‌ویژه در مورد مواد ژل‌ساز بیوپلیمری است که می‌تواند در کاربرد آن‌ها در مقیاس نیمه‌صنعتی و صنعتی اثرگذار باشد.

روغن‌ها و چربی‌های گیاهی از جمله مواد مغذی حیاتی و بخش مهمی از رژیم غذایی انسان هستند. نوع فاز روغنی پارامتر مهمی است که بر ویژگی‌های ساختاری و عملکردی سیستم‌های اولئوزل تأثیر می‌گذارد. مشخصات اسیدهای چرب، وزن مولکولی و ساختار آن‌ها، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی (به‌عنوان مثال، قطبیت، ویسکوزیته و برهمکنش‌های روغن- ماده ژل‌ساز) روغن‌های خوراکی را تعیین می‌کنند. روغن کانولا از طریق اصلاح ژنتیکی دانه کلزا حاصل می‌شود که میزان اسید اروسیک آن به کمتر از ۲ درصد رسیده و نیز به‌عنوان منبع غنی از اسیدهای چرب تک غیر اشباع (حدود ۶۲ درصد اسید اولئیک) می‌باشد. حضور اسیدهای چرب امگا ۳ و ۶ از مزایای تغذیه‌ای روغن کانولا می‌باشد که نقش عمده در سلامت مصرف‌کننده دارد و به‌عنوان یک روغن سالم معروف است. همچنین به‌دلیل بالا بودن نقطه دود، روغن مناسبی برای سرخ کردن به حساب می‌آید (Shahidi, 2005).

مواد ژل‌ساز مولکول‌هایی هستند که از طریق به‌دام‌اندازی روغن در یک ساختار شبکه‌ای، موجب تولید ساختارهایی نیمه‌جامد، موسوم به اولئوزل می‌گردند (Uslu & Yilmaz, 2021). مواد ژل‌ساز از نظر وزن مولکولی در دو دسته مواد ژل‌ساز با وزن مولکولی کم و بالا طبقه‌بندی می‌شوند. امولسیفایرهایی همچون مونوگلیسرید، لاکتم، داتم و ...، اسیدهای چرب، الکل‌های چرب، موم‌ها، فیتواسترل‌ها و ... جزء مواد ژل‌ساز با وزن مولکولی کم هستند و اتیل سلولز، متیل سلولز، پروتئین‌ها

3- Esters of diacetyl tartaric mono(di)glycerides Acid (DATEM)

1- Distilled Monoglyceride (DMG)

2- Ester of Lactic Acid with Glycerol Monostearate (LACTEM)

بالا، هیدروکلئوئید متیل سلولز از شرکت مرک، روغن شورتینینگ از شرکت صنعتی بهشهر تهیه گردید. حلال‌ها، معرف‌ها و سایر مواد مورد نیاز به شرح زیر از شرکت‌های مرک (آلمان) و سیگما (آمریکا) خریداری شد: اسید استیک، متانول، کلروفرم، اتانول، هیدروکسید سدیم، تولوئن، اسید کلریدریک، آهن III، پراکسید هیدروژن، کلرید باریم دو آبه، سولفات آهن ۷ آبه، آهن II، معرف فنل فتالئین، هیدروکسید پتاسیم.

آماده‌سازی نمونه‌های اولئوژل

برای تولید اولئوژل در فاز اول، امولسیفایرها را در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد با نسبت ثابت DMG (۶۰) و نسبت‌های مختلف از LACTEM و DATEM (۴۰:۴۰، ۳۰:۱۰ و ۱۰:۳۰) ذوب کرده، سپس هیدروکلئوئید متیل سلولز را (در غلظت‌های ۰ و ۲ درصد) به مخلوط مذاب اضافه نموده و دما را تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد افزایش دادیم. اگرچه متیل سلولز عمدتاً به‌عنوان یک هیدروکلئوئید آب‌دوست شناخته می‌شود، اما وجود گروه‌های متوکسی در ساختار آن، ویژگی‌های آمفی‌فیلیک قابل توجهی به آن می‌بخشد و امکان برهم‌کنش با فازهای چربی را فراهم می‌سازد. در این سیستم، امولسیفایرهای مذاب به‌عنوان یک فاز حامل عمل می‌کنند. در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، که تحرک مولکولی امولسیفایرها بالاست، آن‌ها سطح ذرات متیل سلولز را به‌طور کامل مرطوب کرده و از طریق کاهش کشش بین‌سطحی، ذرات متیل سلولز را در فاز لیپیدی احاطه می‌کنند. این فرآیند پیش-پراکندگی باعث تثبیت ذرات و جلوگیری از کلوخه شدن آن‌ها در فاز روغنی می‌شود و زمینه‌ساز تشکیل یک شبکه پایدار در اولئوژل می‌گردد (Naeli, Milani, Farmani, & Zargaraan, 2020; Patel & Dewettinck, 2016).

در مرحله بعد مخلوط مذاب حاصل را به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد سرد کرده تا کاملاً جامد و کریستاله شوند. در مرحله بعد، مخلوط فوق توسط آسیاب آزمایشگاهی پودر شده (در صنعت، این فرآیند از طریق اسپری چیلینگ انجام خواهد شد) و سپس ۱۵ درصد از پودر به‌دست‌آمده به روغن مایع کانولا اضافه شد. مخلوط حاصل تا دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد تا نمونه کاملاً شفاف شود. در نهایت، نمونه‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد سرد شدند تا اولئوژل‌های نهایی حاصل گردند. فرمولاسیون نمونه‌های اولئوژل تولیدی حاوی امولسیفایرها (مونودی‌گلیسرید تقطیر شده، داتم، لاکتم) و متیل سلولز در جدول ۱ به شرح ذیل ارائه شده است.

نیمه‌صنعتی و صنعتی قابل انجام نیست (Naeli, Milani, Farmani, & Zargaraan, 2021). لذا ضرورت حل این مشکل و دستیابی به روشی ساده جهت استفاده همزمان از امولسیفایرها و هیدروکلئوئیدهای همچون متیل سلولز احساس می‌گردد.

در مطالعات پیشین محققان مشخص شده است که استفاده از ترکیب ماده مواد ژل‌ساز به‌واسطه توانایی تبلور همزمان از طریق برقراری برهم‌کنش‌های غیرکووالانسی و دارا بودن اثر سینرژیکی بر رفتار تشکیل ژل، به‌طور مؤثرتری قادر به‌دام‌اندازی روغن هستند (Liu, Pei, Shen, Xu, & Zhao, 2024). برای مثال از ترکیب انواع مختلف مونوگلیسرید با امولسیفایرهای سورفاکتین و دی‌آسیل گلیسرول (Liu et al., 2024; Wang, Ma, Qiu, Wang, & Liu, 2022)، اتیل سلولز (Chen et al., 2023; Lopez-martínez, Charó-alonso, Marangoni, & Toro-vazquez, 2015; Rodríguez-hern, 2021)، موم‌های آفتابگردان، کاندلیلا، کارنوبا و سیوس برنج (Pakseresht, Tehrani, Farhoosh, & Koocheki, 2023;)، استفاده شده است. (Rodríguez-hern, 2021; Zampouni, 2024) از طرف دیگر نوع، نسبت و چگونگی ترکیب کردن مواد ژل‌ساز مختلف حائز اهمیت است. لذا در این مطالعه ترکیبی از امولسیفایرها و هیدروکلئوئید متیل سلولز به‌عنوان ماده ژل‌ساز جهت تولید اولئوژل جایگزین شورتینینگ انتخاب گردیده‌اند.

در این پژوهش برخلاف تحقیقات پیشین، با هدف پراکندگی یکنواخت‌تر امولسیفایرهای DATEM و LACTEM و همچنین استفاده مستقیم از هیدروکلئوئید متیل سلولز، بدون نیاز به به‌کار بردن روش‌های پیچیده؛ ابتدا امولسیفایرها ذوب و با یکدیگر مخلوط می‌گردند. سپس هیدروکلئوئید متیل سلولز به مخلوط امولسیفایری اضافه و در آن حل می‌شود و در انتها ترکیب حاصل پس از کریستاله شدن مجدد به روغن اضافه و اولئوژل تهیه می‌گردد. همچنین خصوصیات بافتی، نقطه ذوب، عدد پراکسید و ظرفیت نگهداری روغن در نمونه‌های اولئوژل تهیه شده از مخلوط امولسیفایرها و متیل سلولز در فاز اول و میزان چربی جامد و پروفایل اسید چرب در فاز دوم در نمونه‌های اولئوژل بهینه با شورتینینگ مقایسه می‌گردد. لازم به ذکر است که این پژوهش در مقیاس نیمه‌صنعتی صورت خواهد گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد و معرف‌های شیمیایی

روغن کانولا شرکت اویلا (تهران، ایران)، امولسیفایرهای DMG، LACTEM و DATEM از شرکت پارس بهبود آسیا با درجه خلوص

جدول ۱- فرمولاسیون نمونه‌های اولئوژل تولیدی حاوی امولسیفایرها (مونودی گلیسرید تقطیر شده، داتم، لاکتم) و متیل سلولز
Table 1- Formulation of the prepared oleogel samples containing emulsifiers (DMG, DATEM, LACTEM) and MC

نمونه	مونو دی گلیسرید تقطیر شده	لاکتم	داتم	متیل سلولز
Sample	DMG (%)	LACTEM (%)	DATEM (%)	MC (%)
LACTEM40-MC0	60	40	0	0
LACTEM40-MC2	60	40	0	2
DATEM40-MC0	60	0	40	0
DATEM40-MC2	60	0	40	2
LACTEM/DATEM30:10-MC0	60	30	10	0
LACTEM/DATEM30:10-MC2	60	30	10	2
LACTEM/DATEM10:30-MC0	60	10	30	0
LACTEM/DATEM10:30-MC2	60	10	30	2

آزمون‌های اولئوژل در فاز اول

اندازه‌گیری عدد پراکسید

برای اندازه‌گیری عدد پراکسید نمونه‌های اولئوژل از روش تیوسیانات و اندازه‌گیری جذب در ۵۰۰ نانومتر استفاده شده است (Odilichukwu et al., 2016). بدین منظور ۰/۱ تا ۰/۲ گرم نمونه بسته به میزان پراکسیدان در لوله‌های آزمایش ۱۵ میلی‌لیتری وزن می‌شود و با ۹/۸ میلی‌لیتر حلال کلروفرم متانل (به نسبت ۳:۷) مخلوط و به مدت ۲ تا ۴ ثانیه به هم زده می‌شود. بقیه مراحل مشابه ترسیم منحنی کالیبراسیون انجام می‌گردد. تمامی مراحل این روش زیر نور ملایم و به مدت ۱۰ دقیقه صورت می‌گیرد. در نهایت عدد پراکسید از معادله زیر محاسبه شد :

$$PV = \frac{(As - Ab) \times m}{55/84 \times W \times 2}$$

$$\% o b c = 100 - \frac{(b - a) - (c - a)}{(b - a)} \times 100$$

که در این معادله As جذب نمونه، Ab جذب شاهد، m شیب منحنی کالیبراسیون و W وزن نمونه اولئوژل است.

اندازه‌گیری ظرفیت نگهداری روغن

ابتدا لوله‌های خالی میکروتیوب توزین شدند. پس از آن دو میلی‌لیتر از نمونه‌های اولئوژل ذوب شده در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد داخل هر میکروتیوب ریخته شدند. بعد از نگهداری میکروتیوب‌ها در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت، لوله‌ها مجدداً توزین شدند. سپس نمونه‌ها با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه در دمای اتاق سانتیفیوژ گردیدند. بعد از سانتیفیوژ، لوله‌های میکروتیوب به مدت ۳ دقیقه روی کاغذ فیلتر برگردانده شدند تا روغن‌های رویی اضافی خارج شوند، سپس بار دیگر میکروتیوب‌ها توزین می‌شوند و ظرفیت نگهداری روغن به کمک رابطه

زیر محاسبه شد (Roufegarinejad, & Hamishehkar, 2020).
Aliasl Khiabani, Tabibiazar,)

a: وزن میکروتیوب خالی

b: وزن میکروتیوب بعد از ۲۴ ساعت نگهداری در دمای اتاق

c: وزن میکروتیوب پس از سانتیفیوژ است.

آزمون سنجش بافت

ویژگی‌های سفتی و چسبندگی نمونه‌های اولئوژل با استفاده از آزمون نفوذ به وسیله دستگاه آنالیز پروفایل بافت^۱ (TA Plus، ایالت متحده آمریکا) مجهز به پروب استوانه‌ای به قطر ۱۲/۷ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها به‌طور کامل در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد ذوب گردیدند و ۳۰ میلی‌لیتر از آن‌ها در لوله‌های سانتیفیوژ پلاستیکی ۵۰ میلی‌لیتری با کف تخت ریخته شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار گرفت و سپس ویژگی‌های بافتی آن‌ها بررسی شد. تنظیمات آزمون شامل سرعت پیش‌آزمون، سرعت تست و سرعت پس از آزمون به ترتیب ۲ میلی‌متر بر ثانیه، ۱ میلی‌متر بر ثانیه و ۲ میلی‌متر بر ثانیه و عمق نفوذ ۱۵ میلی‌متر بود و اندازه‌گیری‌ها در سه تکرار انجام شد (Aliasl Khiabani et al., 2020).

اندازه‌گیری نقطه ذوب لغزشی^۲

اندازه‌گیری SMP به روش لوله موئین باز انجام شد. در ابتدا نمونه‌ها تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر از نقطه ذوبشان حرارت داده تا مایع شوند و سپس لوله موئین در داخل ظرف نمونه فرو برده شدند تا نمونه حدود یک سانتی‌متر از لوله موئین بالا برود. در مرحله بعد جداره بیرونی لوله موئین حاوی نمونه با پنبه پاک گردید و سریعاً در بن‌ماری آب یخ فرو برده شد تا روغن جامد شود. سپس نمونه به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پس از گذشت این زمان، لوله‌های موئین به دماسنج متصل و در یک بشر ۵۰۰ میلی‌لیتری که حاوی آب با دمای حداقل ۱۰ درجه سانتی‌گراد کم تر از نقطه ذوب

آماري با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۵ صورت پذیرفت. در فاز دوم نمونه‌های بهینه با استفاده از طرح آنالیز واریانس یک طرفه با شورتینینگ تجاری مقایسه شدند. مقایسه میانگین برای هر دو فاز نیز با استفاده از آزمون توکی در سطح اطمینان ۹۵ درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

ظرفیت نگهداری روغن

در روز نخست پس از تهیه اولئوژل‌ها، تقریباً تمامی نمونه‌ها از ظرفیت نگهداری روغن بالایی (نزدیک به ۱۰۰ درصد) برخوردار بودند که نشان‌دهنده تشکیل ساختار شبکه‌ای مطلوب در آن‌هاست. همان‌طور که در **جدول ۲** نشان داده شده است، با گذشت ۱۵ روز از زمان تولید نمونه‌های اولئوژل، برخی تیمارها مانند DATEM40-MC0 کاهش قابل توجهی نشان می‌دهند (حدود ۸۵/۷ درصد). تیمارهایی با نسبت ترکیبی LACTEM/DATEM و حاوی متیل سلولز (LACTEM/DATEM30:10-MC2-LACTEM/DATEM10-30-MC2) ظرفیت خود را پس از ۳۰ روز در بالاترین حد حفظ کرده‌اند. متیل سلولز احتمالاً از طریق افزایش ویسکوزیته یا ایجاد شبکه سه‌بعدی پلیمری، روغن را به صورت مکانیکی در ماتریس ژلی محصور کرده و بدین ترتیب ظرفیت نگهداری روغن را افزایش می‌دهد. بیشتر تیمارها ظرفیت نگهداری روغن را تا روز ۳۰ حفظ کرده‌اند (بیش از ۹۷ درصد)، که نشان‌دهنده پایداری ساختار ژلی در طول زمان است. تیمارهایی مانند DATEM40-MC2 و DATEM40-MC0 کمی افت نشان می‌دهند (تا حدود ۹۷/۵ درصد)، اما تیمارهای ترکیبی LACTEM/DATEM با متیل سلولز همچنان عملکرد پایدار دارند.

نتایج مطالعات محققان نشان می‌دهد که استفاده از متیل سلولز در غلظت‌های بالای ۱/۴ درصد، موجب ایجاد اولئوژلی با ساختار متراکم و منافذ ریز می‌گردد که حرکت روغن را محدود کرده و از خروج آن طی فرآیند سانتریفیوژ کردن جلوگیری می‌کند. همچنین افزایش غلظت متیل سلولز موجب افزایش سفتی اولئوژل شده که به بهبود مقاومت ساختاری و کاهش تغییر شکل کمک کرده و در نتیجه از نشت روغن در شرایط تنش مکانیکی جلوگیری کرده است (Wu et al., 2024). همچنین در پژوهشی دیگر که به بررسی قابلیت اولئوژل حاصل از ماده ژل‌ساز متیل سلولز و کانولا به عنوان جایگزین ۱۰۰ درصد شورتینینگ در فرمولاسیون کرم ویفر پرداخته است، به قابلیت بالای ماده ژل‌ساز متیل سلولز در نگهداری روغن و جلوگیری از مهاجرت آن در مقایسه با شورتینینگ اشاره شده است. توانایی متیل سلولز در حفظ یکپارچگی

احتمالی نمونه است، قرار گرفت. زمانی که اولین لغزش چربی به سمت بالا در لوله موئین مشاهده گردید، به عنوان SMP در نظر گرفته شد (AOCS, 1998).

آزمون‌های اولئوژل در فاز دوم

ترکیب اسیدهای چرب اولئوژل

برای تعیین ترکیب اسیدهای چرب موجود در روغن‌های کانولا، شورتینینگ و نمونه‌های اولئوژل از دستگاه کروماتوگراف گازی^۱ (مدل N۶۸۹۰، Agilent Technologies، ایالات متحده آمریکا) مجهز به یک ستون لوله موئین و یک آشکارساز یونیزاسیون شعله‌ای^۲ استفاده شد. ستون دستگاه دارای طول ۱۰۰ متر و قطر ۰/۲۵ میلی‌متر با ضخامت فاز ثابت ۰/۲ میکرومتر بود. مقدار تزریق نمونه یک میکرولیتر و درجه حرارت ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد بود. گاز هلیوم به عنوان گاز حامل با فشار ۲۰ پاسکال استفاده خواهد شد. برنامه دمایی ستون به این صورت خواهد بود که ابتدا به مدت ۵ دقیقه در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد نگه داشته شد و سپس با سرعت ۴ درجه در دقیقه به دمای ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد رسید (Naderi, Farmani, & Rashidi, 2018).

اندازه‌گیری محتوای چربی جامد^۳

محتوای چربی جامد با استفاده از دستگاه اسپکتروسکوپ رزونانس مغناطیسی هسته^۴ (Bruker، آلمان) در دماهای ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد مطابق با روش AOCS 16b-93 اندازه‌گیری شد. قبل از تجزیه و تحلیل در دماهای اندازه‌گیری، نمونه‌های چربی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد ذوب شدند و (ارتفاع ۴ سانتی‌متر) در لوله‌های اندازه‌گیری SFC ریخته شد. سپس لوله‌ها در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه، ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه، صفر درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه و در نهایت در دمای اندازه‌گیری به مدت ۴۵ دقیقه نگهداری گردید (Mahjoob et al., 2022).

آنالیز آماری

تجزیه و تحلیل آماری برای نمونه‌های اولئوژل در فاز اول با استفاده از طرح کاملاً تصادفی در قالب فاکتوریل انجام شد. ۸ تیمار شامل ۴ سطح از نسبت‌های مختلف از امولسیفایرهای LACTEM و DATEM (۴۰:۰، ۳۰:۱۰ و ۱۰:۳۰) و ۲ سطح از هیدروکلوئید متیل سلولز (۰، ۲ درصد) مورد بررسی قرار گرفت. کلیه محاسبات

3- Solid Fat Content (SFC)

4- Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR)

1- Gas Chromatograph (GC)

2- Flame-Ionization Detector (FID)

مهاجرت آن به سطح جلوگیری می‌نماید (Tanti, Barbut, & Marangoni, 2016). ساختاری اولئوژل در شرایط تنش، ناشی از شکل‌گیری شبکه پلیمری مستحکمی است که فاز مایع را در حفرات ریز خود محبوس کرده و از

جدول ۲- ظرفیت نگهداری روغن در نمونه‌های اولئوژل در طی ۳۰ روز
Table 2- Oil Binding Capacity of oleogel samples over 30 days

نمونه Sample	ظرفیت نگهداری روغن روز اول Oil binding capacity on day one (%)	ظرفیت نگهداری روغن روز ۱۵ Oil binding capacity on day 15 (%)	ظرفیت نگهداری روغن ۳۰ ام Oil binding capacity on day 30 (%)
LACTEM40-MC0	100 ± 0.000 ^{gC}	99.750 ± 0.0141 ^{dB}	99.684 ± 0.0007 ^{aA}
LACTEM40-MC2	99.764 ± 0.0014 ^{CB}	99.685 ± 0.0212 ^{cA}	100 ± 0.000 ^{dC}
DATEM40-MC0	99.989 ± 0.0007 ^{fB}	85.713 ± 0.0049 ^{aA}	100 ± 0.000 ^{dC}
DATEM40-MC2	100 ± 0.000 ^{gC}	99.918 ± 0.0028 ^{eA}	99.932 ± 0.0042 ^{cB}
LACTEM/DATEM30:10-MC0	98.918 ± 0.0014 ^{aA}	99.106 ± 0.0021 ^{bB}	99.782 ± 0.0028 ^{bC}
LACTEM/DATEM30:10-MC2	99.939 ± 0.0014 ^{eA}	100 ± 0.000 ^{fB}	100 ± 0.000 ^{dB}
LACTEM/DATEM10:30-MC0	99.536 ± 0.0028 ^{bA}	100 ± 0.00 ^{fB}	100 ± 0.000 ^{dB}
LACTEM/DATEM10:30-MC2	99.837 ± 0.0021 ^{dA}	100 ± 0.000 ^{fB}	100 ± 0.000 ^{dB}

حروف کوچک متفاوت (a-f) در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت آماری معنی‌دار ($p < 0.05$) بین نمونه‌ها در یک روز مشخص است. حروف بزرگ متفاوت (A-C) در هر ردیف نیز نشان‌دهنده تفاوت آماری معنی‌دار ($p < 0.05$) برای یک نمونه مشخص در طول زمان است.

Different lowercase letters (a-h) in each column indicate significant statistical differences among samples within a given day ($p < 0.05$). Different uppercase letters (A-C) in each row indicate significant statistical differences for a given sample over time ($p < 0.05$).

می‌دهد که حضور امولسیفایرهای DATEM در ساختار اولئوژل، نقش مؤثری در کنترل نرخ اکسیداسیون در مراحل پایانی انبارمانی داشته و پایداری اکسیداتیو مطلوب‌تری را نسبت به شورتینینگ تجاری فراهم آورده است. لازم به ذکر است که عدد پراکسید تنها نشان‌دهنده هیدروپراکسیدها به عنوان محصولات اولیه اکسیداسیون است. با توجه به اینکه این ترکیبات در مراحل پیشرفته‌تر اکسیداسیون به محصولات ثانویه (مانند آلدئیدها و کتون‌ها) تبدیل می‌شوند، عدد پراکسید به تنهایی تصویر کاملی از پایداری اکسیداتیو ارائه نمی‌دهد. بنابراین، یکی از محدودیت‌های مطالعه حاضر، عدم بررسی شاخص‌های مربوط به محصولات ثانویه اکسیداسیون است که با استفاده از آزمون‌هایی نظیر عدد آنیسیدین یا شاخص مواد واکنش‌دهنده با اسید تیوباربیتوریک^۱ سنجیده می‌شود (Shuai et al., 2024).

مطابق با نتایج این پژوهش، مطالعات دیگر نشان داده‌اند که عدد پراکسید نمونه‌های اولئوژل پس از ۳۰ روز بالاتر از نمونه‌ی شورتینینگ بوده است. این تفاوت عمدتاً به ماهیت و ترکیب چربی پایه هر دو محصول باز می‌گردد. شورتینینگ‌های تجاری معمولاً از روغن‌های هیدروژنه با درصد بالای اسیدهای چرب اشباع که مقاومت ذاتی بسیار بالایی در برابر اکسیداسیون دارند. در مقابل، اولئوژل‌های این مطالعه بر پایه روغن کانولا تولید شده‌اند که حاوی درصد بالایی از اسیدهای چرب غیراشباع است و به‌طور ذاتی مستعد اکسیداسیون بیشتری نسبت به چربی‌های اشباع است. بنابراین، حتی با وجود اثر تثبیت‌کننده سیستم

عدد پراکسید

تحلیل نتایج حاصل از بررسی عدد پراکسید نشان داد که روند اکسیداسیون در اولئوژل‌ها به‌طور معناداری تحت تأثیر نسبت LACTEM/DATEM، سطح متیل‌سلولز و تعامل‌های دو عاملی آن‌ها قرار دارد ($p < 0.001$). در روز اول از تولید اولئوژل‌ها، بیشتر نمونه‌ها دارای عدد پراکسید زیر یک هستند، که نشان‌دهنده وضعیت اکسیداتیو مناسب اولیه است. پس از گذشت ۱۵ و ۳۰ روز از تولید نمونه‌ها افزایش عدد پراکسید در همه نمونه‌ها معنی‌دار می‌باشد. نتایج جدول ۳ حاکی از آن است که در روز ۳۰، تیمارهای تولید شده با استفاده از نسبت بالای LACTEM عدد پراکسید بالاتری را دارا می‌باشند (تا حدود ۲۰)، اما در نمونه‌های حاوی امولسیفایر DATEM به‌تنهایی یا مشتمل بر LACTEM/DATEM10-30، به‌ویژه در حضور متیل‌سلولز عدد پراکسید به‌طور معناداری پایین‌تر است ($p < 0.001$). بررسی روند تغییرات عدد پراکسید در طول ۳۰ روز نشان داد که اگرچه میزان اکسیداسیون اولیه در برخی نمونه‌های اولئوژل بالاتر از شورتینینگ بود، اما نرخ افزایش این شاخص در بازه زمانی ۱۵ تا ۳۰ روز برای نمونه‌های اولئوژل به‌طور معنی‌داری کمتر از نمونه شورتینینگ بود. برای نمونه، در نمونه LACTEM/DATEM10:30-MC2، عدد پراکسید در روز ۳۰ام نسبت به روز ۱۵ام، تنها ۱/۹۳ برابر افزایش داشت (از ۵/۹۳ به ۱۱/۴۹)، در حالی که این افزایش برای نمونه شورتینینگ معادل ۵/۰۶ برابر بود (از ۱/۱۸ به ۵/۹۸). این الگوی اکسیداسیون نشان

شد، اولئوژل‌های حاوی امولسیفایر DATEM بهترین اثر آنتی‌اکسیدانی را نشان دادند که احتمالاً به دلیل آرایش منظم و ساختار کریستالی متراکم آن‌هاست که جریان مولکول‌های روغن را محدود می‌کند (Chen, Zhu, Tian, & Li, 2024)

ویژگی‌های بافتی

تحلیل واریانس نشان داد که هر دو ویژگی بافتی (سختی و چسبندگی) به‌طور معناداری تحت تأثیر عوامل اصلی فرمولاسیون شامل نسبت دو امولسیفایر، سطح متیل سلولز و تعامل‌های دو عاملی قرار دارند ($p < 0.001$). آزمون توکی نیز تفاوت‌های آماری معناداری بین تیمارها در هر دو ویژگی نشان داد.

ژل‌ساز و امولسیفایرهای مورد استفاده، پایداری اکسیداتیو کلی اولئوژل‌ها نمی‌تواند به سطح بسیار بالای شورتینینگ‌های سنتی برسد. تأکید این پژوهش بر بهبود پایداری روغن مایع درون ساختار اولئوژل و ارائه یک جایگزین سالم‌تر برای چربی‌های ترانس، با حفظ ویژگی‌های عملکردی و بهبود پروفایل اسیدهای چرب، بوده است (Qiu et al., 2024). البته نکته قابل توجه دیگر این است که روند افزایش عدد پراکسید در نمونه‌های اولئوژل نسبت به شورتینینگ کندتر است که علت آن به واسطه تشکیل شبکه ژل سه‌بعدی در اولئوژل‌ها و به دام‌انداختن فیزیکی روغن است (Ghanbarzadeh & Najibi Hosseini, 2025). به علاوه یافته‌ها نشان می‌دهد که اولئوژل‌های مبتنی بر امولسیفایرهای استری همچون DATEM به‌طور مؤثر اکسیداسیون لیپید را کاهش داده‌اند. بر اساس مطالعه‌ای که درخصوص اثر ترکیب ۷ نوع امولسیفایر استری مختلف با ایزوله سویا بر خصوصیات اکسیداتیو اولئوژل انجام

جدول ۳- مقادیر عدد پراکسید نمونه‌های اولئوژل، روغن کانولا و شورتینینگ در طی ۳۰ روز
Table 3- Peroxide value of oleogel samples, canola oil and shortenings over 30 days

نمونه Sample	عدد پراکسید روز اول Peroxide value on day 1 Meq o2 kg ⁻¹	عدد پراکسید روز ۱۵ام Peroxide value on day 15 Meq o2 kg ⁻¹	عدد پراکسید روز ۳۰ام Peroxide value on day 30 Meq o2 kg ⁻¹
LACTEM40-MC0	0.395 ± 0.0001 ^{bA}	5.979 ± 0.0070 ^{eB}	17.931 ± 0.0042 ^{hC}
LACTEM40-MC2	0.986 ± 0.000 ^{eA}	5.938 ± 0.0021 ^{eB}	12.282 ± 0.0028 ^{dC}
DATEM40-MC0	0.987 ± 0.0002 ^{eA}	4.393 ± 0.0028 ^{cB}	13.162 ± 0.0035 ^{cC}
DATEM40-MC2	0.598 ± 0.0002 ^{cA}	3.319 ± 0.0014 ^{bB}	9.816 ± 0.0007 ^{bC}
LACTEM/DATEM30:10-MC0	0.395 ± 0.0004 ^{bA}	4.763 ± 0.0042 ^{dB}	19.909 ± 0.004 ^{iC}
LACTEM/DATEM30:10-MC2	0.748 ± 0.0640 ^{dA}	5.947 ± 0.0035 ^{eB}	16.063 ± 0.0028 ^{gC}
LACTEM/DATEM10:30-MC0	0.395 ± 0.0004 ^{bA}	4.795 ± 0.0014 ^{dB}	13.536 ± 0.0056 ^{fC}
LACTEM/DATEM10:30-MC2	0.198 ± 0.0003 ^{aA}	5.939 ± 0.0014 ^{eB}	11.499 ± 0.0015 ^{cC}
روغن کانولا Canola oil	1.993 ± 0.0003 ^{fA}	5.984 ± 0.0017 ^{eB}	21.342 ± 0.0008 ^{iC}
شورتینینگ (شاهد) Shortening	0.3929 ± 0.0003 ^{bA}	1.181 ± 0.0007 ^{aB}	5.983 ± 0.0011 ^{aC}

حروف کوچک متفاوت (a-h) در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت آماری معنی‌دار ($p < 0.05$) بین نمونه‌ها در یک روز مشخص است. حروف بزرگ متفاوت (A-C) در هر ردیف نیز نشان‌دهنده تفاوت آماری معنی‌دار ($p < 0.05$) برای یک نمونه مشخص در طول زمان است.

Different lowercase letters (a-h) in each column indicate significant statistical differences among samples within a given day ($p < 0.05$). Different uppercase letters (A-C) in each row indicate significant statistical differences for a given sample over time ($p < 0.05$).

بافت اولئوژل و محصول حاصل می‌گردد (Wu et al., 2024). همچنین در پژوهشی که درخصوص توانایی چند نوع از مولکول‌های کوچک آمفی‌فیلک همچون امولسیفایر LACTEM بر خصوصیات مکانیکی اولئوژل‌های ساختاردهی شده با اتیل سلولز انجام شده است، نتایج حاکی از این بود که امولسیفایر LACTEM موجب افزایش استحکام ساختار اولئوژل می‌گردد.

نیروی چسبندگی

سختی بافت

از نظر ویژگی سختی بافت، باتوجه به نتایج جدول ۴ به‌نظر می‌رسد که نمونه‌های حاوی دو نسبت مختلف از LACTEM/DATEM امولسیفایر همراه یا بدون MC همچون LACTEM/DATEM10:30-MC0 و MC0 مشابهت بیشتری با نمونه شاهد دارند، به‌ویژه دو نمونه اول که از نظر آماری نیز تفاوت قابل ملاحظه‌ای با نمونه شورتینینگ دارا نمی‌باشند ($p < 0.001$). مشابه با نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، نتایج تحقیقی دیگر حاکی از آن بود که افزایش غلظت متیل سلولز موجب افزایش سختی

ذوب لغزشی را دارا می‌باشد و پس از آن نمونه LACTEM/DATEM10:30-MC2 بیشترین میزان این پارامتر را به خود اختصاص می‌دهد.

مشابه با نتایج این پژوهش، نتایج مطالعات پژوهشگران نشان می‌دهد که باوجود اینکه میزان محتوای چربی جامد اولئوژل‌ها پایین‌تر از نمونه شورتنینگ است، مقدار نقطه ذوب لغزشی نمونه‌های اولئوژل به‌خصوص در نمونه‌های حاوی نسبت‌های مختلف از LACTEM/DATEM، در مقایسه با شورتنینگ از نظر عددی نزدیک یا بالاتر است که این امر ناشی از توانایی مواد ژل‌ساز در به‌دام‌اندازی فاز روغنی دارد (Naeli et al., 2020 ; Naeli et al., 2021).

همانطور که در جدول ۴ نمایش داده شده است، از نظر نیروی چسبندگی نمونه LACTEM/DATEM10:30-15-MC0 تفاوت آماری معناداری با نمونه شورتنینگ نشان نمی‌دهد ($p < 0.001$).

نقطه ذوب لغزشی

تحلیل واریانس نشان داد که عوامل اصلی فرمولاسیون شامل نسبت LACTEM/DATEM، سطح متیل سلولز و تعامل‌های دو عاملی اثر معنی‌داری بر این پارامتر دارند ($p < 0.001$). نتایج آزمون تعقیبی توکی نیز حاکی از این بود که تفاوت معنی‌داری میان تیمارهای مختلف وجود دارد. همانطور که نتایج حاصل از جدول ۴ نشان می‌دهد، نمونه LACTEM/DATEM10:30-MC0 بالاترین میزان نقطه

جدول ۴- ویژگی‌های بافتی و نقطه ذوب لغزشی نمونه‌های اولئوژل و شورتنینگ

Table 4- Textural properties and slip melting point of oleogel samples and shortenings

نمونه Sample	سفتی Hardness (g)	چسبندگی Adhesiveness (g.s)	نقطه ذوب لغزشی Slip melting point (°C)
LACTEM40-MC0	1.412 ± 0.104 ^a	0.799 ± 0.063 ^a	41.501 ± 0.707 ^a
LACTEM40-MC2	3.645 ± 0.169 ^c	2.111 ± 0.075 ^c	43.502 ± 0.705 ^b
DATEM40-MC0	5.864 ± 0.139 ^f	3.489 ± 0.146 ^e	48.504 ± 0.708 ^d
DATEM40-MC2	2.993 ± 0.183 ^b	5.333 ± 0.139 ^f	50.503 ± 0.706 ^{de}
LACTEM/DATEM30:10-MC0	4.267 ± 0.080 ^d	1.711 ± 0.075 ^b	48.501 ± 0.705 ^d
LACTEM/DATEM30:10-MC2	4.570 ± 0.103 ^d	4.971 ± 0.150 ^f	52.507 ± 0.708 ^e
LACTEM/DATEM10:30-MC0	5.280 ± 0.090 ^e	2.959 ± 0.013 ^d	55.503 ± 0.705 ^f
LACTEM/DATEM10:30-MC2	5.579 ± 0.102 ^{ef}	3.622 ± 0.077 ^e	53.507 ± 0.709 ^{ef}
شورتنینگ Shortening	5.024 ± 0.186 ^e	2.956 ± 0.026 ^d	46.506 ± 0.543 ^c

حروف متفاوت نشان‌دهنده‌ی وجود اختلاف معنی‌دار بین داده‌ها است ($p < 0.05$).

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

چربی جامد

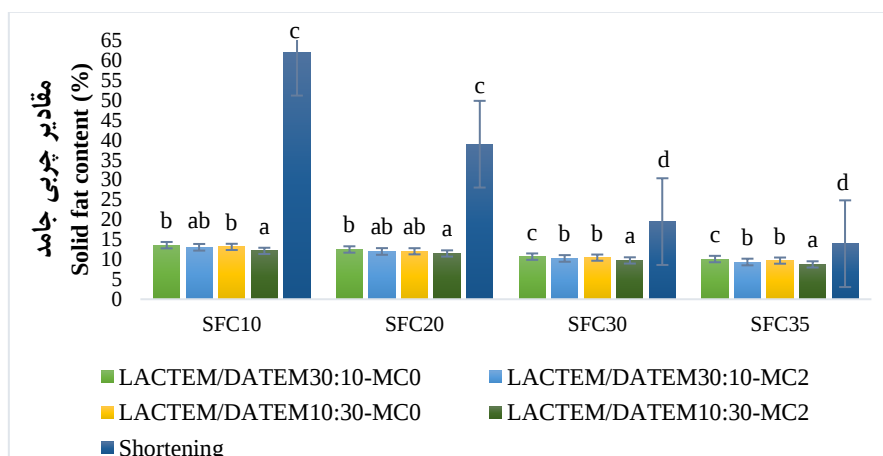
میزان SFC نشان‌دهنده نسبت چربی در فاز کریستالی به میزان کل چربی در دمای مشخص است و مستقیماً بر ویژگی‌های رئولوژیکی، پخش‌پذیری و حسی محصولات اثر می‌گذارد. میزان SFC به سطح اشباعیت، توزیع اسیدهای چرب در تری‌گلیسریدها، میزان ذرات کریستالی بستگی دارد. همان‌طور که نتایج حاصل از شکل ۱ نشان می‌دهد، میزان SFC در نمونه شورتنینگ در تمامی دماها به‌میزان قابل ملاحظه‌ای بالاتر از نمونه‌های اولئوژل بهینه است که البته تفاوت در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد کمتر است. در میان نمونه‌های اولئوژل بهینه نیز، LACTEM/DATEM30:10-15-MC2 دارای بالاترین میزان SFC بود. این تفاوت در دماهای ۲۰ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد با سایر نمونه‌های اولئوژل معنی‌دار بود ($p < 0.001$). به‌طور مشابه با نتایج این پژوهش، در بررسی انجام شده روی اولئوژل کم‌اشباع تولید شده با استفاده از اتیل سلولز یا ترکیب اتیل سلولز/هیدروکسی‌پروپیل متیل سلولز و پالم استئارین در مقایسه با نمونه‌های شورتنینگ تجاری، میزان SFC

نتایج فاز دوم

پس از غربالگری اولیه در فاز اول، چهار فرمولاسیون بهینه جهت انجام آنالیزهای تکمیلی در فاز دوم تحقیق انتخاب شدند. فرآیند انتخاب بر اساس یک رویکرد چندشاخصه با هدف شناسایی فرمولاسیون‌هایی با بیشترین پتانسیل جایگزینی شورتنینگ صورت گرفت. معیارهای اصلی انتخاب عبارت بودند از: الف) خواص بافتی نزدیک به نمونه شورتنینگ تجاری (به‌ویژه سختی) ب) ظرفیت نگهداری روغن بالابیشتر از ۹۸ درصد ج) پایداری اکسیداتیو برتر که با نرخ افزایش پایین‌تر عدد پراکسید در طول دوره نگهداری مشخص شد. علاوه بر این، جهت مطالعه اثر هم‌افزایی امولسیفایرها و نقش هیدروکلوئید، فرمولاسیون‌های حاوی نسبت‌های ترکیبی از LACTEM و DATEM (۱۰:۳۰ و ۱۰:۳۰) در هر دو سطح متیل سلولز (۰ و ۲ درصد) برای فاز دوم برگزیده شدند و نمونه‌های حاوی تنها یک نوع امولسیفایر از ادامه مطالعات حذف گردیدند.

برهم‌کنش‌های پلیمر-امولسیفایر و پلیمر-حلال (روغن) و امولسیفایر-حلال، فاکتورهای اصلی ایجادکننده ساختار و قوام می‌باشند. هرچه این برهم‌کنش‌ها بیشتر و قوی‌تر باشند، میزان روغن آزاد کمتر بوده و ساختار ژل مستحکم‌تر خواهد بود (Naeli et al., 2021).

در نمونه‌های شورتینینگ به‌طور معنی‌داری بیشتر از اولئوژل بهینه‌شده بود. دلیل این امر، تفاوت در مکانیزم ایجاد ساختار در سیستم‌های چربی متداول و اولئوژل‌ها است. در یک سیستم چربی (مانند شورتینینگ)، میزان چربی جامد و سطح اشباعیت، عوامل اصلی ایجاد ساختار و قوام هستند؛ در حالی‌که در سیستم‌های اولئوژل مبتنی بر بیوپلیمر،



شکل ۱- مقادیر چربی جامد نمونه‌های اولئوژل بهینه و شورتینینگ در دماهای مختلف (۱۰-۳۵ درجه سانتی‌گراد)

حروف کوچک متفاوت (a-e) در هر دسته دمایی، نشان‌دهنده تفاوت آماری معنی‌دار بین نمونه‌ها هستند ($p < 0.05$).

Fig. 1. Solid fat content (SFC) of optimized oleogel samples and shortening at different temperatures (10-35 °C) Different lowercase letters (a-e) within each temperature cluster indicate significant statistical differences among samples ($p < 0.05$).

درصد گزارش شد. این نتایج نشان‌دهنده برتری تغذیه‌ای اولئوژل‌های بهینه‌شده نسبت به نمونه‌های تجاری است (Naeli et al., 2021).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سیستم ماده ژل ساز چندجزئی با بهره‌گیری از روش نوین انحلال مستقیم متیل‌سلولز در ماتریس مذاب امولسیفایرهای LACTEM، DATEM و DMG طراحی شد تا چالش‌های ناشی از پیچیدگی و هزینه بالای تولید اولئوژل‌های حاوی هیدروکلوئید مرتفع گردد. نتایج آزمایش نشان داد که تیمارهای ترکیبی LACTEM/DATEM به همراه متیل سلولز پایداری روغن مطلوبی در دوره ۳۰ روزه داشته‌اند و به‌عنوان مؤثرترین تیمار در حفظ کیفیت روغن عمل کرده‌اند. همچنین از نظر ویژگی‌های فیزیکی بافت، نمونه‌های حاوی امولسیفایر DATEM با نسبت‌های بالاتر، شباهت معناداری به نمونه شاهد داشته و از نظر آماری تفاوتی با نمونه شورتینینگ نداشته‌اند. با این که عدد پراکسید نمونه‌های اولئوژل در روز ۳۰ام از نمونه شورتینینگ به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر بود، اما نرخ افزایش عدد پراکسید در نمونه‌های اولئوژل نسبت به شورتینینگ، خصوصاً در نمونه LACTEM/DATEM10-30-MC2 (افزایش

ترکیب اسیدهای چرب

همانطور که در جدول ۵ نمایش داده شده است، میزان اسید چرب اشباع (۵۲/۳۹ درصد)، اسید چرب ترانس (۳/۵۲ درصد) در نمونه شورتینینگ به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از نمونه‌های اولئوژل (به‌ترتیب ۱۷/۷ - ۱۶/۷۷ و ۰/۸۲ - ۰/۷۸ درصد) بهینه است ($p < 0.001$). همچنین اسید پالمیتیک (۳۹/۴۸ درصد) و اسید اولئیک (۳۵/۰۹ درصد) اسیدهای غالب تشکیل‌دهنده نمونه شورتینینگ هستند. در مقایسه با نمونه شورتینینگ در نمونه‌های اولئوژل بهینه اسیدهای چرب غالب اسید اولئیک (۴۰/۶۸-۴۰/۲۲ درصد) و اسید لینولئیک (۳۳/۸۰-۳۳/۵۶ درصد) می‌باشند. زیرا معمولاً از فراکسیون‌های روغن پالم برای تهیه شورتینینگ‌ها استفاده می‌شود. اما روغن کانولا غنی از اسید اولئیک (۱۸:۱) و لینولئیک (۱۸:۲) می‌باشد که ترکیب اصلی اسید چرب روغن‌های دانه‌ای هستند. نتایج دیگر پژوهش‌ها نیز حاکی از آن بود که اسیدهای چرب غالب در شورتینینگ تجاری، اسید پالمیتیک و اسید اولئیک بودند (به‌ترتیب ۳۴/۸۳ و ۳۴/۴۳ درصد) که نشان‌دهنده استفاده از روغن پالم یا مشتقات آن در فرمولاسیون شورتینینگ است. همچنین، میزان اسیدهای چرب ترانس در نمونه‌های اولئوژل‌ها حدود ۰/۱ درصد بود، در حالی‌که در نمونه‌های تجاری به‌طور متوسط ۲/۹۵

۱۶/۷۷ تا ۱۷/۷ درصدی اسیدهای چرب اشباع و کاهش ۰/۷۸ تا ۰/۸۲ درصدی اسیدهای چرب ترانس گردید. نتایج حاصل از این پژوهش تأیید نمود که به کارگیری سیستم ماده ژل ساز کلوتیدی چندجزئی مشتمل بر هیدروکلوتید متیل سلولز و مخلوطی از امولسیفایرها با وزن مولکولی پایین، تولید اولئوژل‌های پایدار بر پایه روغن کانولا را با حفظ ویژگی‌های عملکردی و فیزیکی‌شیمیایی شورتینگ تجاری و بهبود شاخص‌های سلامت میسر می‌سازد.

۱/۹۳ برابری نسبت به ۵/۰۶ برابری) پایین‌تر بود. در اینجا لازم است تأکید شود که عدد پراکسید تنها نشان‌دهنده محصولات اولیه اکسیداسیون است و برای ارزیابی جامع‌تر پایداری اکسیداتیو و تشکیل محصولات ثانویه، بررسی سایر شاخص‌های اکسیداسیون نظیر عدد آنیسیدین یا شاخص مواد واکنش‌دهنده با اسید تیوباریتوریک در مطالعات آتی توصیه می‌شود. همچنین، جایگزینی اولئوژل‌های بهینه منجر به بهبود چشمگیر پروفایل اسیدهای چرب از طریق کاهش

جدول ۵- پروفایل اسید چرب نمونه‌های اولئوژل، روغن کانولا و شورتینگ
Table 5- Fatty acids profile of oleogel samples, canola oil and shortening

نمونه Sample	پالمیک اسید C16:0%	استتاریک اسید C18:0%	اولئیک اسید C18:1%	لینولئیک اسید C18:2%	لینولئیک اسید C18:3%	مجموع اسیدهای چرب اشباع Total saturated fatty acids	مجموع اسیدهای چرب ترانس Total trans fatty acids
LACTEM/DATEM30:10-MC0	10.465±0.049 ^b	6.705±0.021 ^c	40.69±0.014 ^d	33.645±0.070 ^c	3.925±0.070 ^b	17.265±0.021 ^d	0.820±0.00 ^b
LACTEM/DATEM30:10-MC2	10.275±0.035 ^b	6.510±0.028 ^b	40.645±0.007 ^{cd}	33.810±0.014 ^d	4.061±0.001 ^c	16.870±0.028 ^c	0.780±0.00 ^a
LACTEM/DATEM10:30-MC0	10.700±0.070 ^b	6.815±0.035 ^d	40.230±0.014 ^b	33.065±0.071 ^b	3.930±0.014 ^b	17.730±0.042 ^e	0.781±0.00 ^a
LACTEM/DATEM10:30-MC2	10.170±0.042 ^b	6.470±0.014 ^b	40.560±0.007 ^c	33.750±0.014 ^d	3.985±0.07 ^b	16.750±0.028 ^b	0.790±0.00 ^a
شورتینگ (شاهد) Shortening	39.425±0.077 ^c	11.885±0.021 ^e	35.105±0.021 ^a	6.785±0.021 ^a	0.390±0.014 ^a	52.410±0.028 ^f	3.525±0.007 ^d
روغن کانولا Canola oil	5.570±0.424 ^a	3.077±0.010 ^a	44.635±0.063 ^e	37.310±0.028 ^e	4.925±0.035 ^d	8.540±0.014 ^a	0.900±0.00 ^c

حروف متفاوت نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین داده‌ها است (p<0.05).
Different letters indicate significant differences between the data (p<0.05).

منابع تأمین مالی

تأمین مالی این پژوهش توسط دانشگاه فردوسی مشهد (گرت پژوهشی به شماره ۳/۵۶۵۵) و همچنین شرکت پارس بهبود آسیا انجام پذیرفته است.

سپاسگزاری

از مساعدت‌های مالی، تأمین امولسیفایرها، فراهم‌سازی امکانات آزمایشگاهی و همکاری‌های تخصصی شرکت پارس بهبود آسیا در روند پیشبرد این مطالعه، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

میزان مشارکت نویسندگان

مریم قناد رضایی: مدیریت داده، تحقیق و بررسی، نرم‌افزار، نوشتن - پیش‌نویس اصلی، نوشتن - بررسی و ویرایش، مصطفی مظاهری طهرانی: مفهوم‌سازی، مدیریت پروژه، نظارت، نوشتن - بررسی و

References

- Aliasl Khiabani, A., Tabibiazar, M., Roufegarinejad, L., & Hamishehkar, H. (2020). Preparation and characterization of carnauba wax/adipic acid oleogel: A new reinforced oleogel for application in cake and beef burger. *Food Chemistry*, 333(1), 127446. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127446>
- AOCS, F.D. (1998). Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists' Society. *AOCS*, 5, 2-93.
- Chen, X., Ding, S., Chen, Y., Lan, D., Wang, W., & Wang, Y. (2023). Assessing the effectiveness of peanut

- diacylglycerol oil-ethylcellulose /monoglyceride-based oleogel in sponge cake as a margarine replacer. *Food Bioscience*, 55(5), 102959. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102959>
4. Chen, X., Zhu, J., Tian, D., & Li, Z. (2024). Preparation of soybean protein isolate – ester emulsifier oleogels and comparative study of their structure and properties. *Food Chemistry*, 461(8), 140927. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140927>
5. Ghanbarzadeh, S.M.N.H.B. (2025). Effect of surfactant type on the properties of peanut oil-based oleogels and their functionality in butter cake introduction. *Iranian Food Science and Technology Association*, 21(5), 477–496. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2025.93859.1442>
6. Hasenhuettl, G.L. (2019). Overview of food emulsifiers. *Food Emulsifiers and Their Applications*, 1–9. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29187-7_1
7. Liu, P., Pei, H., Shen, J., Xu, C., & Zhao, H. (2024). Effect of surfactin on the properties of glycerol monostearate – Based oleogels. *Food Structure*, 40(1), 100370. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2024.100370>
8. Lopez-martínez, A., Charó-alonso, M.A., Marangoni, A.G., & Toro-vazquez, J.F. (2015). Monoglyceride organogels developed in vegetable oil with and without ethylcellulose. *Food Research International*, 72(3), 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.03.019>
9. Mahjoob, R., Hakimzadeh, V., Ataye, E., & Jamshid, S. (2022). The interaction of polyglycerol esters with sorbitan tristearate , and sorbitan monostearate in structuring a low - saturated fat. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(5), 4174–4184. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01460-9>
10. Mao, J., Ye, W., & Meng, Z. (2024). The relationship between nonlinear viscoelasticity and baking performance in low-saturated puff pastry margarine. *Food Chemistry*, 452(1), 139436. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139436>
11. Meng, Z., Guo, Y., Wang, Y., & Liu, Y. (2019). Organogels based on the polyglyceryl fatty acid ester and sunflower oil: Macroscopic property, microstructure, interaction force, and application. *LWT - Food Science and Technology*, 116(3), 108590. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108590>
12. Naderi, M., Farmani, J., & Rashidi, L. (2018). The impact of saturated monoacylglycerols on the oxidative stability of Canola oil under various time/temperature conditions. *Grasas y Aceites*, 69(3), 267–276. <https://doi.org/10.3989/gya.0346181>
13. Naderi, M., Mohammad, A., Rashidi, L., & Mahdi, S. (2024). Rapeseed oleogels based on monoacylglycerols and methylcellulose hybrid oleogelators : Physicochemical and rheological properties. *Food Chemistry: X*, 23(1), 101520. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101520>
14. Naeli, M.H., Milani, J.M., Farmani, J., & Zargaraan, A. (2020). Development of innovative ethyl cellulose-hydroxypropyl methylcellulose biopolymer oleogels as low saturation fat replacers : Physical , rheological and microstructural characteristics. *International Journal of Biological Macromolecules*, 156(4), 792–804. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.087>
15. Naeli, M.H., Milani, J.M., Farmani, J., & Zargaraan, A. (2021). Developing and optimizing low-saturated oleogel shortening based on ethyl cellulose and hydroxypropyl methyl cellulose biopolymers. *Food Chemistry*, 369(8), 130963. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130963>
16. Odilichukwu, C., Okpala, R., Bono, G., Luca, M., Sardo, G., Vitale, S., & Schaschke, C.J. (2016). Food Bioscience Lipid oxidation kinetics of ozone-processed shrimp during iced storage using peroxide value measurements. *Food Bioscience*, 16(12), 5–10. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2016.07.005>
17. Pakseresht, S., Tehrani, M.M., Farhoosh, R., & Koocheki, A. (2023). Rheological and thermal properties of reinforced monoglyceride-carnauba wax oleogels. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(8), 1244. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12443>
18. Palla, C.A., Dominguez, M., & Carrín, M.E. (2022). An overview of structure engineering to tailor the functionality of monoglyceride oleogels. *January*, 2587–2614. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12930>
19. Patel, A.R., & Dewettinck, K. (2016). Edible oil structuring: an overview and recent updates. *Food & Function*, 7(1), 20–29. <https://doi.org/10.1039/C5FO01006C>
20. Qiu, H., Zhang, H., Bang, J., & Monoacylglycerol, M.A.G. (2024). Oleogel classification , physicochemical characterization methods , and typical cases of application in food : a review. *Food Science and Biotechnology*, 33(6), 1273–1293. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01501-z>
21. Rodríguez-hern, A.K. (2021). Rheological properties of ethyl cellulose-monoglyceride-candelilla wax oleogel vis-a-vis edible shortenings. *Carbohydrate Polymers*, 252(9), 117171. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117171>
22. Shahidi, F. (2005). *Bailey's Industrial Oil and Fat Products, Industrial and Nonedible Products from Oils and Fats* (Vol. 6). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/047167849x>
23. Shuai, X., Li, Y., Zhang, M., Wei, C., Du, L., Liu, C., Chen, J., & Dai, T. (2024). Effect of different oleogelation mechanisms on physical properties and oxidative stability of macadamia oil-based oleogels and its application. *LWT*

- *Food Science and Technology*, 198(3), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115978>
24. Tanti, R., Barbut, S., & Marangoni, A.G. (2016). Hydroxypropyl methylcellulose and methylcellulose structured oil as a replacement for shortening in sandwich cookie creams. *Food Hydrocolloids*, 25(5), 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.05.032>
25. Uslu, E.K., & Yilmaz, E. (2021). Preparation and characterization of glycerol monostearate and polyglycerol stearate oleogels with selected amphiphiles. *Food Structure*, 28(4), 100192. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2021.100192>
26. Wang, X., Ma, D., Qiu, C., Wang, Y., & Liu, Y. (2022). Physical properties of oleogels fabricated by the combination of diacylglycerols and monoacylglycerols. *Journal of the American Oil Chemist's Science*, 99(11), 1007–1018. <https://doi.org/10.1002/aocs.12622>
27. Wang, Z., Chandrapala, J., Truong, T., & Farahnaky, A. (2022). Oleogels prepared with low molecular weight gelators : Texture , rheology and sensory properties , a review and sensory properties , a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 23(1), 1–45. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2027339>
28. Wu, Y., Sun, S., Li, X., Li, X., Huang, Y., An, F., Huang, Q., & Song, H. (2024). Fabrication, characterization, and fat substitution application in chocolate spreads of methyl cellulose and xanthan gum foam- templated oleogels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 283(11), 137677. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137677>
29. Xu, Y., Sun, H., Lv, J., Wang, Y., Zhang, Y., & Wang, F. (2023). Effects of polysaccharide thickening agent on the preparation of walnut oil oleogels based on methylcellulose : Characterization and delivery of curcumin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 232(1), 123291. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123291>
30. Zampouni, K. (2024). Microstructure, physical properties, and oxidative stability of olive oil oleogels composed of sunflower wax and monoglycerides. *Gels*, 195(10), 3–17. <https://doi.org/10.3390/gels10030195>