

Effect of Surfactant Type on the Properties of Peanut Oil-based Oleogels and Their Functionality in Butter Cake

S.M. Najibi Hosseini¹, B. Ghanbarzadeh^{1*}

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

(*- Corresponding Author Email: ghanbarzadeh@tabrizu.ac.ir)

Received: 03.06.2025
Revised: 18.07.2025
Accepted: 21.07.2025
Available Online: 16.11.2025

How to cite this article:

Najibi Hosseini, S.M., & Ghanbarzadeh, B. (2025). Effect of surfactant type on the properties of peanut oil-based oleogels and their functionality in butter cake. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 21(5), 477-496. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2025.93859.1442>

Introduction

Growing public awareness regarding the link between diet and chronic diseases is driving a significant demand for healthier food formulations. The high content of saturated and trans fatty acids in many bakery products is a major cause of cardiovascular disease, type 2 diabetes, and obesity. Consequently, the World Health Organization (WHO) recommends replacing fats like butter and shortening with vegetable oils rich in unsaturated fatty acids. This presents a major challenge for the food industry, as solid fats play a key role in creating desirable sensory properties like texture and mouthfeel, and their direct replacement with liquid oils leads to a significant decline in product quality. Oleogels, formed by creating a three-dimensional network of oleogelators within vegetable oils, have been proposed as a structured alternative to solid fats. Numerous studies have successfully demonstrated the potential of oleogels as fat replacers in various bakery products. For instance, beeswax-based oleogels have been shown to improve the nutritional profile of cakes without compromising quality attributes. However, most research has focused on wax-based oleogels. There is a scarcity of studies that systematically investigate and compare the performance of low-HLB emulsifiers (such as monoglyceride, polyglycerol ester, and Span 60) used alone for the complete replacement of butter in a cake formulation. Furthermore, butter has technological limitations, including a poor ability to trap and stabilize air bubbles, which can affect cake volume and texture. Therefore, this study aimed to investigate oleogels using monoglyceride, polyglycerol ester, and Span 60 emulsifiers in cold-pressed peanut oil (an oil chosen for its excellent nutritional profile) and evaluate their potential as a functional and healthy butter replacement in butter cake.

Materials and Methods

In this research, peanut oil was first extracted using a cold-press machine. Oleogels were then prepared by adding 12% (w/w) of monoglyceride (MG), polyglycerol ester (PG), and Span 60 (SG) to the oil, followed by placing it in a 75°C water bath. The physicochemical properties of the oleogels including crystal morphology (light microscopy), oil holding capacity (OHC) via centrifugation, thermal behavior (Differential Scanning Calorimetry - DSC), firmness (back extrusion test), molecular structure (Fourier Transform Infrared Spectroscopy - FTIR), and oxidative stability (peroxide value) were evaluated. Finally, butter cakes were prepared with complete replacement of butter by the selected oleogels (MG and PG). The cakes were then analyzed for firmness and sensory evaluation (color, taste, texture, and overall acceptability).

Results and Discussion

The type of oleogelator significantly impacted the oleogel properties, an effect dictated by the underlying crystal microstructure. Microscopic images revealed that the MG formed a dense, uniform network with fine, needle-like crystals. In contrast, PG also formed needle-like crystals, but they were larger and less dense, while SG created a weak network containing large, rosette-like crystals and significant spaces. This structural difference was directly reflected in the macroscopic properties. The dense network of MG was highly effective at trapping oil, resulting in the highest Oil Holding Capacity (100%) and the greatest firmness. Conversely, the sparse network



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.2025.93859.1442>

of SG resulted in poor oil retention and minimal firmness, demonstrating a clear structure-function relationship. Thermal analysis by DSC further supported these findings. MG showed the highest thermal stability, evidenced by its high melting enthalpy, which corresponds to the energy required to disrupt its well-ordered crystalline network. FTIR analysis confirmed that the network was stabilized by non-covalent interactions, such as hydrogen bonds and van der Waals forces. Furthermore, the oleogels demonstrated improved oxidative stability. The strong physical barrier provided by MG and PG networks showed that the rate of peroxide value increased over 30 days compared to pure oil. In the cake evaluation, samples formulated with MG and PG had significantly softer texture than the control cake made with butter. This is attributed to the enhanced air-holding capacity of the firmer oleogels and the inherent emulsifying properties of the gelators. Crucially, the sensory analysis revealed that the cakes containing oleogel scored higher texture and taste value, and their overall acceptability score was equal to or even higher than that the control sample.

Conclusion

The findings demonstrated that the oleogelator type dictated the physicochemical and structural properties of oleogels. The monoglyceride-based oleogel exhibited superior performance, showing the highest oil holding capacity, thermal stability, and firmness, followed by the polyglycerol ester-based oleogel. Microstructural analysis confirmed that these properties were linked to the crystal morphology. FTIR analysis verified that gelation was driven by non-covalent interactions. Most importantly, when monoglyceride and polyglycerol ester oleogels used as a complete butter substitute in butter cakes, produced cakes with a softer texture and received overall acceptability scores equal to or higher than the control. Therefore, this study confirms the high potential of monoglyceride and polyglycerol ester-based oleogels to develop healthier bakery products. Despite promising results, the study had limitations, including the use of a single oil type and one oleogelator concentration. Textural and sensory analyses could also be more comprehensive. Further research need to focus on evaluating these oleogels in other bakery products, investigating long-term stability, and optimizing the production process.

Keywords: Oleogel, Monoglyceride, Peanut oil, Polyglycerol ester, Span 60

بررسی اثر نوع سورفاکتانت در تولید اولئوژل بر پایه‌ی روغن بادام‌زمینی برای کاربرد در کیک کره‌ای

سیدمحمد نجیبی حسینی^۱ - بابک قنبرزاده^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

چکیده

چربی‌ها، با وجود نقش مهم در ایجاد بافت و طعم مطلوب در فرآورده‌های نانوائی، به دلیل محتوای بالای اسیدهای چرب اشباع و ترانس، یک نگرانی عمده برای سلامتی مصرف‌کنندگان محسوب می‌شوند. در این راستا، اولئوژل‌ها به عنوان یک راه‌حل نوین برای ارائه‌ی جایگزین‌های چربی سالم مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مطالعه با هدف تولید و ارزیابی اولئوژل‌های روغن بادام‌زمینی پرس سرد و کاربرد آن‌ها در کیک کره‌ای انجام شد. ابتدا، روغن بادام‌زمینی پرس سرد تهیه شد و سپس با افزودن ۱۲ درصد از امولسیفایرهای مونوگلیسرید، پلی‌گلیسرول استر و اسپن ۶۰، اولئوژل‌ها به دست آمدند. بررسی‌های طیف‌سنجی مادون قرمز یک کاهش شدت باند موجود در بازه‌ی 3110 cm^{-1} تا 3674 cm^{-1} را که مربوط به پیوند هیدروژنی بود، نشان دادند. به علاوه، باندهای 2850 cm^{-1} و 2919 cm^{-1} در اولئوژل‌تورها به 2855 cm^{-1} و 2925 cm^{-1} در اولئوژل‌ها منتقل شدند که به وجود برهم‌کنش‌های واندروالسی نسبت داده شد. تصاویر میکروسکوپ نوری نیز حاکی از این بود که کریستال‌های اولئوژل‌های مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول استر سوزنی‌شکل و کریستال‌های اسپن ۶۰ شعاعی کم‌تراکم (رزت‌مانند) بودند. ظرفیت نگهداری روغن برای اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید ۱۰۰ درصد بود و اولئوژل‌های بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول استر (۹۷/۹۸ درصد) و اسپن ۶۰ (۷۳/۴۸ درصد) در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین، اولئوژل‌ها در مقایسه با روغن خالص، افزایش آهسته‌تری در عدد پراکسید در طی ۳۰ روز، از خود نشان دادند. با مقایسه‌ی دمای پیک و آنتالپی ذوب، اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید (با دمای پیک ذوب $57/62^\circ\text{C}$ و آنتالپی 368 J.g^{-1})، بالاترین پایداری حرارتی را به نمایش گذاشت و همچنین در آزمون اکستروژن معکوس، سفت‌ترین نمونه شناخته شد. در نهایت، کیک‌های کره‌ای تولیدشده با این اولئوژل‌ها بافت نرم‌تر و امتیاز پذیرش کلی برابر یا حتی بالاتری نسبت به نمونه‌ی شاهد داشتند. این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که اولئوژل‌های بر پایه‌ی مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول استر پتانسیل بالایی برای جایگزینی کامل کره در فرمولاسیون کیک‌های کره‌ای دارند.

واژه‌های کلیدی: اسپن ۶۰، اولئوژل، پلی‌گلیسرول استر، روغن بادام‌زمینی، مونوگلیسرید

مقدمه

شناخته می‌شود (Silva, Ferdaus, Foguel, & da Silva, 2023). در همین راستا، سازمان بهداشت جهانی^۲ (WHO) توصیه می‌کند که مصرف اسیدهای چرب اشباع به کمتر از ۱۰ درصد کل انرژی دریافتی روزانه محدود شود و چربی‌هایی مانند کره و شورتنینگ با روغن‌های گیاهی سرشار از اسیدهای چرب غیر اشباع جایگزین گردند (Su et al., 2023). علی‌رغم توصیه‌های بهداشتی، چربی‌ها نقش کلیدی و غیر

امروزه با افزایش آگاهی عمومی نسبت به ارتباط میان رژیم غذایی و بیماری‌های مزمن، تقاضا برای غذاهای سالم‌تر به‌طور چشمگیری در حال افزایش است (Lee, 2018). چربی‌های حاوی اسیدهای چرب اشباع و ترانس یکی از اجزای ناسالم فرمولاسیون برخی محصولات غذایی هستند و مصرف زیاد آن‌ها، به عنوان یکی از دلایل اصلی بیماری‌های قلبی-عروقی، دیابت نوع دو، چاقی و اختلالات متابولیکی

۱- گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
(*)- نویسنده‌ی مسئول: ghanbarzadeh@tabrizu.ac.ir (Email:)

قابل انکاری در ایجاد خواص حسی^۱ مطلوب مانند بافت، طعم و احساس دهانی در بسیاری از محصولات غذایی، ایفا می کنند (Badem & Baştürk, 2023) و استفاده ی مستقیم از روغن های گیاهی در فرمولاسیون محصولات غذایی، موجب افت کیفیت محصول نهایی می شود (Su et al., 2023).

برای حل این مشکلات، در سال های اخیر، سیستم های جامد لیپیدی بر پایه ی روغن های گیاهی به منظور استفاده در محصولات غذایی مطرح شده اند (Jang, Bae, Hwang, Lee, & Lee, 2015). این سیستم ها که اولئوژل نامیده می شوند، با تشکیل شبکه ی سه بعدی توسط اولئوژلاتورها در روغن های گیاهی به دست می آیند (Demirkesen & Mert, 2020). اولئوژل ها، با ارائه ی خواص رئولوژیکی و فیزیکی مشابه با چربی ها به عنوان جایگزین ایده آل آن ها عمل می کنند. اولئوژلاتورها را می توان به دو دسته ی با وزن مولکولی پایین (موم، اسیدهای چرب، فیتوسترول و الکل های چرب) و با وزن مولکولی بالا (پروتئین و پلی ساکراید) تقسیم کرد (Wang, Chandrapala, Truong, & Farahnaky, 2023). مونوگلیسرید، پلی گلیسرول استر و اسپن ۶۰ هر سه امولسیفایرهای با HLB^۲ پایین هستند که در دست بندی اولئوژلاتورها با وزن مولکولی پایین قرار می گیرند. از روغن های گیاهی مختلفی مانند روغن بادام زمینی می توان برای تولید اولئوژل ها استفاده کرد. بادام زمینی یک دانه ی روغنی است که ۴۷ تا ۵۰ درصد روغن دارد (Dun et al., 2019). با این حال، عامل اصلی ایجاد حساسیت، پروتئین بادام زمینی است؛ نه روغن آن (Bublin & Breiteneder, 2014). روغن بادام زمینی سرشار از ویتامین E است و حدود ۸۰ درصد از اسیدهای چرب آن را اسیدهای چرب غیراشباع به ویژه اسید اولئیک و لینولئیک تشکیل می دهند. بسیاری از مطالعات نشان داده اند که مصرف دانه یا روغن بادام زمینی بر بهبود بیماری های قلبی-عروقی و دیابت نوع ۲ تأثیر مثبتی داشته و موجب پیشگیری از ابتلا به تصلب شرایین می شود؛ همچنین ممکن است موجب کاهش خطر ابتلا به سرطان روده ی بزرگ شود (Dun et al., 2019). از چربی هایی مانند کره، شورتینگ و مارگارین در تولید فرآورده های نانوائی مانند کیک ها استفاده می شود. از انواع کیک ها می توان کیک کره ای را نام برد که نوعی کیک پوند^۳ بوده و در آن، کره به عنوان یکی از اجزای اصلی فرمولاسیون، نقش چربی را ایفا می کند (Nguyen Doan Mai et al., 2023). پژوهش های متعددی پتانسیل استفاده از اولئوژل ها را به عنوان جایگزین چربی در محصولات نانوائی مانند مافین (Giacomozzi, Carrín, & Palla, 2018)، کوکی (Zulfiqar et al., 2024) و کیک (Badem & Baştürk, 2023) با

موفقیت نشان داده اند؛ مطالعه ی آمواه و همکاران (Amoah, Lim, Jeong, & Lee, 2017) ثابت کرد که کیک فرموله شده با اولئوژل های بر پایه ی موم زنبور عسل در مقایسه با شورتینگ، ضمن حفظ ویژگی های کیفی، پروفایل تغذیه ای آن را بهبود می دهد. در مطالعه ی دیگری مالوانو و همکاران (Malvano, Laudisio, Albanese, d'Amore, & Marra, 2022) با جایگزینی کامل کره در کیک اسفنجی توسط یک مخلوط بهینه شامل اولئوژل موم زنبور عسل (۷۷ درصد)، امولسیفایر (۷ درصد) و پروتئین آب پنیر (۱۶ درصد)، محصولی با بافت مطلوب تر (نرم و مرطوب) تولید کردند. همچنین گیاکوموزی و همکاران (Giacomozzi, Carrín, & Palla, 2023) با تمرکز بر آزمون ارزیابی حسی برای مافین های تهیه شده از اولئوژل های بر پایه ی مونوگلیسرید، گزارش دادند که جایگزینی کامل مارگارین با اولئوژل منجر به محصولی با پروفایل تغذیه ای سالم تر و ویژگی های حسی مشابه یا حتی بهتر می شود.

با این حال اغلب پژوهش ها بر استفاده از اولئوژلاتورهایی مانند موم ها متمرکز بوده اند و مطالعات اندکی به بررسی و مقایسه ی عملکرد امولسیفایرهایی مانند مونوگلیسرید، پلی گلیسرول استر و اسپن ۶۰ به تنهایی، به عنوان جایگزین کامل کره در کیک پرداخته اند. از سوی دیگر علاوه بر چالش سلامتی، کره از لحاظ تکنولوژیکی نیز دارای محدودیت است؛ به طوری که توانایی پایینی در به دام انداختن و پایداری سازی حباب های هوا دارد و ممکن است در تولید کیک کره ای برای ارائه ی کیفیت مطلوب از نظر حجم و بافت، به اضافه کردن امولسیفایر نیاز داشته باشد (Pancharoen, Leelawat, & Vattanukul, 2019). بنابراین هدف از این پژوهش بررسی پتانسیل اولئوژل های بر پایه ی امولسیفایر، به عنوان جایگزینی سالم تر و با خواص تکنولوژیکی برتر برای کره در فرمولاسیون کیک کره ای بود. به این ترتیب ابتدا با استفاده از مونوگلیسرید، پلی گلیسرول استر و اسپن ۶۰ در روغن بادام زمینی پرس سرد، اولئوژل ها تولید شده و سپس، مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. در مرحله ی بعد اولئوژل های منتخب به عنوان جایگزین کامل کره در فرمولاسیون کیک کره ای استفاده شده و فرآورده های نهایی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش ها

مواد مورد استفاده

مونوگلیسرید، پلی گلیسرول استر، اسپن ۶۰ پتاسیم یدید و نشاسته از شرکت مرک (آلمان) و کلروفرم، تیوسولفات آمونیوم و اسید استیک

لامل، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۵ °C نگهداری شدند. در انتها، از اولئوژل‌ها با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰ برابر در دمای اتاق عکس‌برداری شد و مورد بررسی قرار گرفتند (Malvano, Albanese, Cinquanta, Liparoti, & Marra, 2024).

ظرفیت نگهداری روغن^۱ (OHC)

برای بررسی ظرفیت نگهداری روغن اولئوژل‌ها، روش مینگ و همکاران (Meng, Wang, Lu, Yu, & Ye, 2024)، با اندکی تغییر مورد استفاده قرار گرفت؛ به این ترتیب ۱ گرم از هر نمونه در یک میکروتیوب ۲ میلی‌لیتری ریخته و با استفاده از سانتریفیوژ برند Vision مدل VS-180CFI، به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰۰ rpm در دمای ۲۵ °C سانتریفیوژ شد. پس از حذف روغن جدا شده از هر نمونه توسط کاغذ صافی، مقادیر OHC با استفاده از معادله‌ی (۱) محاسبه گردید که در آن M_1 ، M_2 و M_3 به ترتیب نشان‌دهنده‌ی وزن میکروتیوب خالی، وزن میکروتیوب به همراه نمونه قبل از سانتریفیوژ و وزن میکروتیوب به همراه نمونه بعد از برداشتن روغن بود.

$$\%OHC = \left[1 - \frac{(M_2 - M_3)}{(M_2 - M_1)} \right] \times 100 \quad (1)$$

بررسی رفتار حرارتی

رفتار حرارتی اولئوژل‌ها مشابه روش هوانگ و همکاران (Hwang, Kim, Winkler- Moser, Lee, & Liu, 2022) با گرماسنجی پویایی تفاضلی^۲ (DSC) مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور از دستگاه Sanaf DSC-400 (ساخت ایران) استفاده شد. بعد از رسیدن نمونه‌ها به دمای محیط، ۱۵ میلی‌گرم از هر نمونه با سرعت ۱ C.min⁻¹ از ۱۰ °C تا ۲۵ °C حرارت داده شد. در انتها نقاط پیک ذوب و آنتالپی به دست آمده توسط نرم‌افزار خود دستگاه، برای هر نمونه مورد بررسی قرار گرفت.

ارزیابی سفتی

برای ارزیابی سفتی اولئوژل‌ها، آزمون اکستروژن معکوس^۳ توسط دستگاه Sanaf Tensile Tester-SUT 2.5N و روش پینهاس و همکاران (Davidovich-Pinhas, Barbut, & Marangoni, 2015) با اندکی تغییر مورد استفاده قرار گرفت؛ به طوری که نمونه‌ها به قالب‌ها (۳۰ mm قطر، ۲۰ mm ارتفاع) ریخته شده و پس از نگهداری ۲۴ ساعته در یخچال، تا رسیدن به دمای ۲۵ °C در محیط نگهداری شدند. سپس توسط یک پروب به قطر ۲۵ mm و با سرعت ۰/۵ mm.s⁻¹ آزمون انجام گردید. اعمال فشار تا کاهش ۵۰ درصدی ارتفاع اولیه‌ی

از شرکت مجلی (ایران) خریداری شدند. بادام‌زمینی و مواد فرمولاسیون کیک نیز از بازار محلی تبریز تأمین گردید.

استخراج روغن بادام‌زمینی

ابتدا بادام‌زمینی‌ها به روش دستی به طور کامل پوست‌گیری شدند. سپس برای استخراج روغن آن‌ها، دستگاه روغن‌گیر خانگی (مدل OPM450 – HOME PRO) مورد استفاده قرار گرفت. دمای روغن خروجی حدود ۵۰ تا ۶۰ °C بود. در مرحله‌ی بعد روغن استخراج‌شده برای حذف ناخالصی‌ها، به مدت ۳۰ دقیقه با ۴۰۰۰ rpm سانتریفیوژ شد و در نهایت روغن شفاف به دست آمده، تا زمان تولید اولئوژل‌ها در یخچال نگهداری شد (Yin et al., 2022).

آزمون‌های اولئوژل

آماده‌سازی اولئوژل‌ها

ابتدا، غلظت‌های ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد وزنی، طبق مطالعات پیشین برای هر سه اولئوژلاتور بررسی شد. مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول استر در هر سه غلظت ژل تشکیل دادند، اما اسپن ۶۰ در هیچ‌یک از این غلظت‌ها ژل ایجاد نکرد. از آنجایی که هدف، مقایسه‌ی مستقیم سه اولئوژلاتور بود، لازم بود غلظتی پیدا شود که حتی ضعیف‌ترین نمونه (اسپن ۶۰) نیز در آن ژل تشکیل دهد. بنابراین، با بررسی غلظت‌های بالاتر برای اسپن ۶۰، مشخص شد که این ماده در غلظت ۱۲ درصد وزنی ژل تشکیل می‌دهد. در نهایت، به منظور فراهم آوردن شرایط یکسان و مقایسه‌پذیر، غلظت ۱۲ درصد وزنی برای هر سه اولئوژلاتور در این پژوهش انتخاب گردید. به این ترتیب مونوگلیسرید، پلی‌گلیسرول استر و اسپن ۶۰ هر کدام با این غلظت به روغن پرس سرد بادام‌زمینی اضافه شدند. سپس در حمام آب ۷۵ °C به مدت ۱۰ دقیقه تحت هم‌زدن قرار گرفتند. در نهایت هر کدام از نمونه‌ها به منظور تشکیل ژل، ۹۰ دقیقه در دمای محیط نگهداری شده و سپس به یخچال انتقال یافتند. پس از طی کردن ۲۴ ساعت در یخچال، برای انجام آزمون‌ها مورد استفاده قرار گرفتند (Sun et al., 2022). اسامی MG، PG و SG به ترتیب برای اولئوژل‌های بر پایه‌ی مونوگلیسرید، پلی‌گلیسرول-استر و اسپن ۶۰ انتخاب شد.

بررسی ریزساختار

ریزساختار اولئوژل‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری مجهز به دوربین (صا ایران، مدل BM180N)، مورد مطالعه قرار گرفت. به این ترتیب چند قطره از اولئوژل‌ها روی لام ریخته شده و پس از قرار دادن

نمونه‌ها ادامه یافت و نقطه‌ای اوج نمودار نیرو-جابه‌جایی هر نمونه به-عنوان معیار سفتی در نظر گرفته شد.

طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوری (FTIR)

با استفاده از یک طیف‌سنج مادون قرمز تبدیل فوری مدل Bruker Tensor 27، طیف‌ها در بازه‌ی 4000 تا 400 cm^{-1} با دقت $1/\text{cm}^{-1}$ ثبت شده و مورد ارزیابی قرار گرفتند (Liu, Pei, Shen, Xu, & Zhao, 2024).

عدد پراکسید (PV)

روش اسید استیک-کلروفرم (AOCS Cd 8-53) برای اندازه‌گیری مقادیر پراکسید نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا، برای جداسازی روغن، از حلال هگزان استفاده گردید و سپس فاز روغن جدا شده با اسید استیک و کلروفرم (با نسبت ۳ به ۲) ترکیب و در ادامه یدید پتاسیم اشیاع به آن اضافه شد. پس از نگهداری محلول حاصل به مدت ۱ دقیقه در جای تاریک، آب و معرف نشاسته به آن اضافه شده و با تیوسولفات سدیم (0.01 N) تیتر گردید. عدد پراکسید هر نمونه توسط معادله‌ی (۲) به دست آمد که در آن S، حجم تیوسولفات سدیم مصرفی برای تیتر محلول دارای نمونه، B، حجم تیوسولفات سدیم مصرفی برای شاهد، W، وزن نمونه و N، نرمالیتی تیوسولفات سدیم بود (Güneşer, Yılmaz, & Ok, 2017).

$$PV = \frac{(S-B) \times N \times 1000}{W} \quad (2)$$

روش تهیه‌ی کیک کره‌ای

مقادیر مواد استفاده‌شده برای فرمولاسیون کیک‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. از اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ به دلیل عدم برخورداری از سفتی و ظرفیت نگهداری روغن مطلوب، استفاده نشد. برای تولید کیک‌های کره‌ای روش انگ و همکاران (Ang, Abdullah, Muhammad, & Lizardo, 2017) با اعمال تغییراتی مورد استفاده قرار گرفت. به این ترتیب ابتدا شکر و کره (یا اولئوژل‌ها) که به دمای محیط رسیده بودند، توسط هم‌زن برقی با دور متوسط، مخلوط شدند تا بافتی سبک به دست آید. سپس وانیل و تخم‌مرغ به تدریج اضافه شدند. پس از رسیدن به مخلوط یکنواخت توسط هم‌زن و اضافه‌شدن شیر هم‌زنی با دور آهسته، ادامه یافت. در مرحله‌ی بعد آرد، بیکنینگ پودر و نمک الک‌شده، به تدریج و با هم‌زدن آهسته، به مخلوط کیک اضافه شدند. سپس وزن یکسانی از خمیر به قالب‌ها ریخته شده و در فر از پیش گرم‌شده در دمای 165°C قرار گرفتند. همه‌ی کیک‌ها بعد از ۲۰ دقیقه از فر خارج شده و پس از رسیدن به دمای محیط (به مدت یک

ساعت) برای انجام آزمون‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. کیک‌های کره‌ای تهیه‌شده با کره، اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید (MG) و اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول استر (PG)، به ترتیب Control, MGBC, PGBC نام‌گذاری شدند.

آزمون‌های کیک کره‌ای

ارزیابی سفتی

این آزمون با اعمال تغییراتی در روش فنگ و همکاران (Feng et al., 2025) انجام شد. به این ترتیب سفتی نمونه‌ها توسط پروب استوانه‌ای با قطر ۴۵ mm و با سرعت 1 mm.s^{-1} مورد ارزیابی قرار گرفت. کیک‌ها در اندازه‌های یکسان (ارتفاع ۲۳ mm و قطر ۳۰ mm) آماده‌سازی شدند، سپس تا ۷۵ درصد ارتفاع اولیه‌ی خود فشرده شدند. از حداکثر نیروی ثبت‌شده در منحنی نیرو-جابه‌جایی برای تحلیل سفتی بافت کیک‌های کره‌ای استفاده شد.

ارزیابی حسی هدونیک

یک پنل متشکل از ۱۵ ارزیاب نیمه‌آموزش‌دیده، ویژگی‌های حسی کیک را ارزیابی کردند. کیک‌ها در اندازه‌های یکسان و به طور تصادفی سرو شدند و پس از هر نمونه از آب آشامیدنی برای شستشوی دهان استفاده گردید. در این ارزیابی، شاخص‌هایی نظیر رنگ، بافت، طعم و پذیرش کلی با استفاده از یک مقیاس ۵ نقطه‌ای سنجیده شد که در آن امتیاز ۱، به معنای کمترین علاقه و امتیاز ۵، به معنای بیشترین علاقه بود (Yılmaz & Öz, 2024).

آنالیز آماری

در این پژوهش از طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در آزمون‌ها استفاده شد و میانگین با استفاده از آنالیز واریانس یک طرفه (Way One ANOVA) در سطح ۵ درصد با استفاده از روش آزمون دانکن در نرم‌افزار SPSS27 محاسبه گردید.

نتایج و بحث

بررسی ریزساختار

شکل ظاهری اولئوژل‌ها در شکل ۱د قابل مشاهده است. هر سه اولئوژل توانایی حفظ ساختار خود را پس از وارونه کردن داشتند. خواص فیزیکی اولئوژل‌ها تا حد زیادی تحت تأثیر اندازه و شکل کریستال‌ها قرار می‌گیرد (Dominguez, Carrin, & Palla, 2024). اندازه و شکل کریستال‌ها نیز به عواملی مانند نوع، خلوص و غلظت اولئوژلاتور، نوع روغن، شرایط تولید (مانند سرعت خنک‌سازی) و وجود سایر افزودنی‌ها بستگی دارد (Uslu & Yılmaz, 2021).

جدول ۱- فرمولاسیون کیک‌های کره‌ای
Table 1- Formulations of butter cakes

نمونه Sample	MG (g)	PG (g)	کره (g) Butter	تخم‌مرغ Egg (g)	شکر Sugar (g)	آرد Flour (g)	شیر Milk (g)	وانیل Vanil (g)	بیکنینگ پودر Baking Powder (g)	نمک Salt (g)
Control	-	-	45	50	60	82.5	35	1	1.5	0.5
MGBC	45	-	-	50	60	82.5	35	1	1.5	0.5
PGBC	-	45	-	50	60	82.5	35	1	1.5	0.5

گلیسرول استر بود، کریستال‌های کروی شکل^۲ نشان داد. در مقابل مگ و همکاران (Meng, Guo, Wang, & Liu, 2019) که در مطالعه‌ی خود از پلی‌گلیسرول استر به‌عنوان اولئوژلاتور در روغن آفتاب‌گردان استفاده کرده بودند، با استفاده از میکروسکوپ نور پلاریزه^۳ (PLM) کریستال‌های سوزنی‌شکل مشاهده کردند. تفاوت کریستال‌های اولئوژل‌های مورد مطالعه با منابع مختلف ممکن است به وجود ترکیبات کم‌مقدار در روغن پرس سرد بادام‌زمینی مربوط باشند که باعث ایجاد تغییر در قطبیت روغن شده و روی برهم‌کنش‌های بین روغن و اولئوژلاتور تأثیر می‌گذارند (Dominguez et al., 2024) به‌طور کلی می‌توان گفت کریستال‌های سوزنی‌شکل به‌دلیل تشکیل شبکه‌ی کریستالی که به خوبی در هم تنیده می‌شوند (Li, Guo, Bi, Zhang, & Xu, 2021) و همچنین توزیع متراکم‌تر کریستال‌ها تأثیر مثبتی بر خواص ماکروسکوپی سیستم‌ها دارد (Meng et al., 2019).

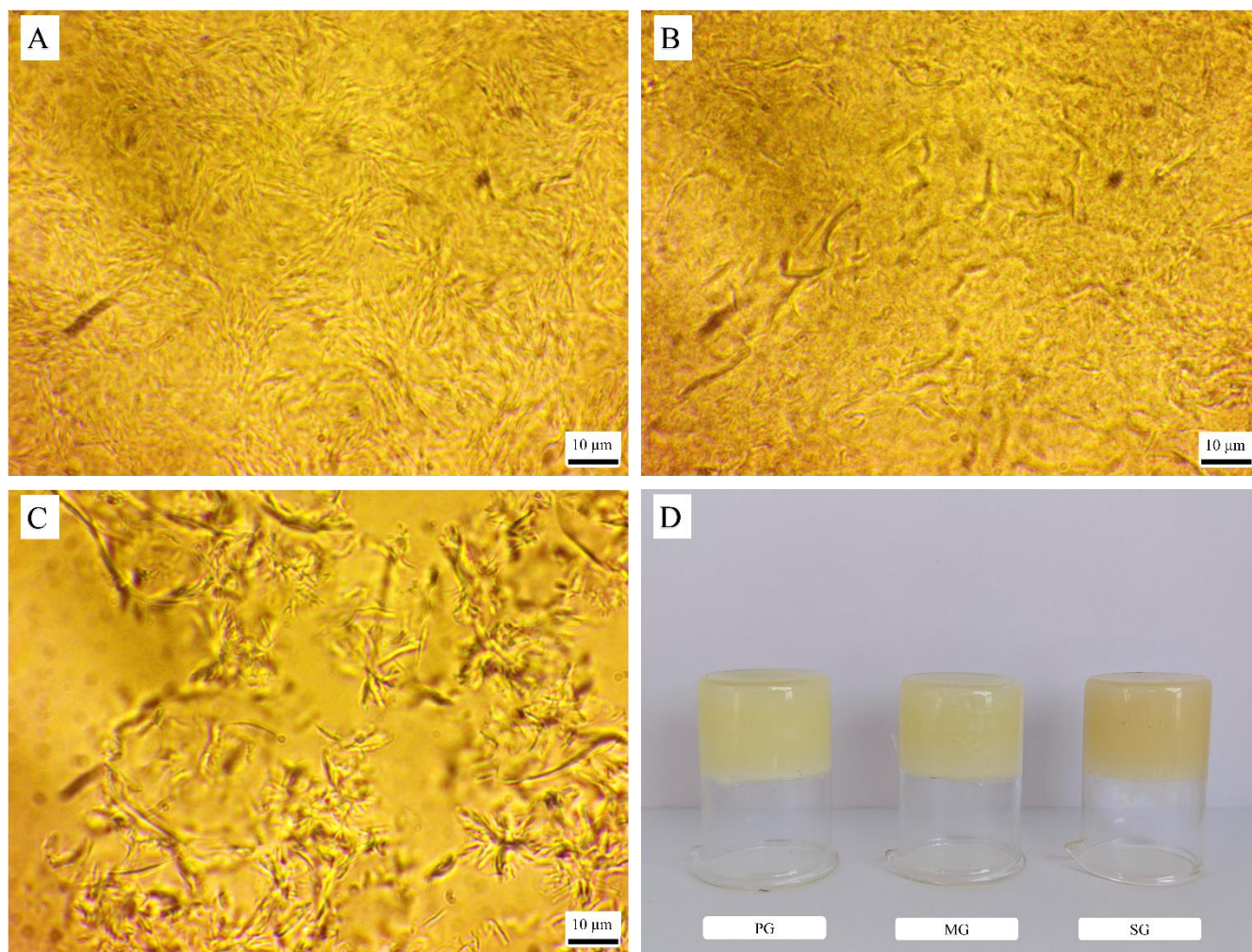
ظرفیت نگهداری روغن

ظرفیت نگهداری روغن یکی از ویژگی‌های مهم است که برای بررسی پایداری فیزیکی اولئوژل‌ها استفاده می‌شود و نشان‌دهنده‌ی توانایی شبکه‌ی ژلی برای حفظ فاز مایع است (Hafiz et al., 2025). OHC پایین، منجر به آزاد شدن روغن در سیستم غذایی شده و در نتیجه باعث افت کیفیت بافتی و حسی آن می‌شود (Arrieira et al., 2025). نمودار درصد ظرفیت نگهداری روغن در شکل ۲ ارائه شده است. طبق شکل هر سه اولئوژل با یکدیگر تفاوت معنی‌دار داشتند ($p < 0.05$) که می‌تواند ناشی از تفاوت در اندازه، شکل، توزیع و نظم فضایی کریستال‌ها باشد (Zhang, Xu, Tang, & Li, 2023)؛ به‌طوری‌که اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید بالاترین درصد OHC (۱۰۰ درصد) را نشان داد که به‌دلیل شبکه‌ی سه‌بعدی متراکم و پایدار تشکیل شده توسط کریستال‌های ریز سوزنی‌شکل آن بود (Li et al., 2021).

بنابراین برای مقایسه‌ی کریستال‌های تشکیل‌شده توسط اولئوژلاتورهای مونوگلیسرید، پلی‌گلیسرول استر و اسپن ۶۰ این آزمون انجام شد. طبق شکل ۱ ریزساختار هر سه اولئوژل متفاوت بود که می‌توان آن را به زنجیره‌ی هیدروکربنی بلند آن‌ها که توانایی تشکیل شبکه‌های کریستالی گوناگون دارد، نسبت داد (Ghan, Siow, Tan, Cheong, & Thoo, 2020). اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید یک شبکه‌ی فیبری متراکم، با توزیع یکنواخت و متشکل از کریستال‌های سوزنی‌شکل ریز را نشان داد (شکل ۱A) که ناشی از خودآرایی مونوگلیسریدها در روغن و تشکیل یک فاز معکوس با ساختار لایه‌ای بود (Palla, Dominguez, & Carrín, 2022). دیماکوپولو-پاپازوگلو و همکاران (Dimakopoulou-Papazoglou, Giannakaki, & Katsanidis, 2023) نیز در مطالعه‌ی خود وجود کریستال‌های سوزنی شکل ریز را برای اولئوژل بر پایه‌ی روغن کنجد و مونوگلیسرید گزارش کردند. با وجود اینکه اووانش و همکاران (Uvanesh et al., 2016) اسپن ۶۰ را به‌عنوان اصلاح‌کننده‌ی شبکه‌ی کریستالی در اولئوژل بر پایه‌ی استتاریک اسید معرفی کردند، طبق شکل ۱C زمانی‌که از اسپن ۶۰ به‌تنهایی استفاده شد، کریستال‌های شعاعی^۱ بزرگ با فضاهای خالی زیاد مشاهده شد که مشابه با تصاویر اولئوژل‌های مطالعه‌ی بهارا و همکاران (Behera, Patil, Sagiri, Pal, & Ray, 2012) بود و می‌توان این ساختار را به سر حجیم سوربیتان در اسپن ۶۰ نسبت داد که معمولاً یک شبکه‌ی ژلی ضعیف ایجاد می‌کند. همچنین، اولئوژل مورد مطالعه‌ی سان و همکاران (Sun et al., 2022) که بر پایه‌ی مونوگلیسرید بود کریستال‌های شعاعی نشان داد. درحالی‌که غان و همکاران (Ghan et al., 2020) گزارش دادند که با افزایش درصد اسپن ۶۰ در اولئوژل‌های مورد مطالعه‌ی خود، کریستال‌های سوزنی و میله‌ای به‌وجود می‌آیند. مطابق با شکل ۱B کریستال‌های سوزنی‌شکل اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول استر، علی‌رغم داشتن تراکم خوب نسبت به اسپن ۶۰ نسبت به مونوگلیسرید بزرگ‌تر بودند که بر خلاف یافته‌های بوییتیمئا-کانتوئا و همکاران (Buitimea-Cantúa et al., 2022) بود؛ به‌طوری‌که اولئوژل مورد مطالعه‌ی آن‌ها که بر پایه‌ی پلی

3- Polarized light microscopy

1- Rosette-like
2- Spherulitic



شکل ۱- تصاویر میکروسکوپی (A, B, C) و شکل ظاهری (D) اولئوژل‌ها

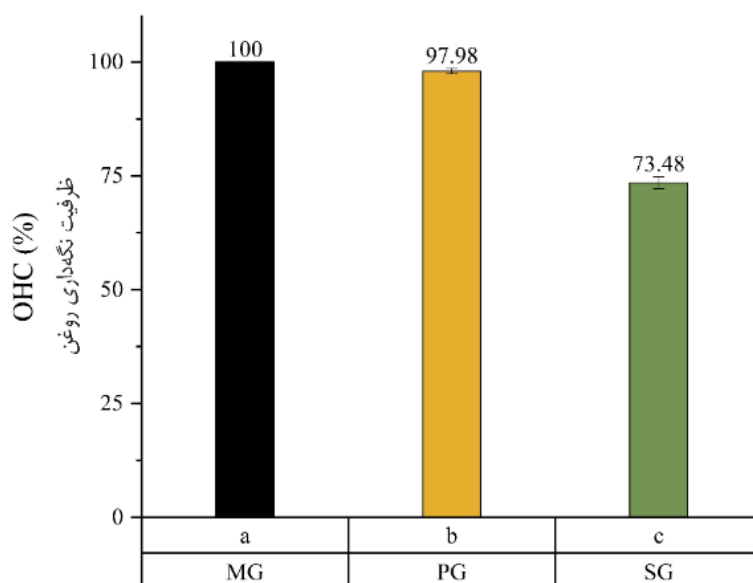
اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید (A, MG)، اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر (B, PG)، اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ (C, SG)

Fig. 1. Microscopic images (A, B, C) and visual appearance (D) of oleogels

Monoglyceride-based oleogel (MG, A), Polyglycerol ester-based oleogel (PG, B), Span 60-based oleogel (SG, C)

اسپن ۶۰ بود (۷۳/۴۸ درصد) که می‌توان به وجود فضاهای خالی بیشتر و اندازه‌ی بزرگ کریستال‌های آن طبق تصاویر میکروسکوپی نسبت داد (Barroso, Okuro, Cerqueira, & Cunha, 2024). غان و همکاران (Ghan et al., 2020)، ظرفیت نگهداری روغن سه اولئوژل بر پایه‌ی لسیتین سویا، گلیسرول مونواستئارات و سوربیتان مونواستئارات (اسپن ۶۰) را مورد بررسی قرار دادند و در مطالعه‌ی آن‌ها اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ در همه‌ی غلظت‌ها، پایین‌ترین OHC را نشان داد. به‌طور کلی، کریستال‌های کوچک‌تر به‌دلیل نسبت سطح‌به‌حجم بیشتر و تشکیل مسیر پیچیده‌تر، OHC بالاتری را نشان می‌دهند (Dominguez et al., 2024).

درحالی‌که با توجه به شکل ۲، اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر علی‌رغم داشتن ساختاری متراکم، کریستال‌های بزرگتری نسبت به اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید داشت و ظرفیت نگهداری روغن پایین‌تر (۹۷/۹۸ درصد) را می‌توان به همین نسبت داد. این یافته‌ها مشابه نتایج مطالعات پیشین بود؛ دومینگوئز و همکاران (Dominguez et al., 2024) در پژوهش خود اولئوژل‌هایی با غلظت ۶ و ۱۰ درصد مونوگلیسرید در ۵ نوع روغن تولید کردند و OHC همه‌ی آن‌ها را بالاتر از ۹۳ درصد گزارش دادند. همچنین، در مطالعه‌ی یلماز و اوسلو (Yilmaz & Uslu, 2020) تمام نمونه‌های اولئوژل بر پایه‌ی مونو و پلی‌گلیسرول استئارات مقادیر OHC بالاتر از ۹۹ درصد را نشان دادند. مطابق با شکل ۲ پایین‌ترین درصد OHC متعلق به اولئوژل بر پایه‌ی



شکل ۲- ظرفیت نگهداری روغن اولئوژل‌ها (%)

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

MG: اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید، PG: اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر، SG: اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰

Fig. 2. Oil holding capacity of oleogels (%)

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

MG: Monoglyceride-based oleogel, PG: Polyglycerol ester-based oleogel, SG: Span 60-based oleogel

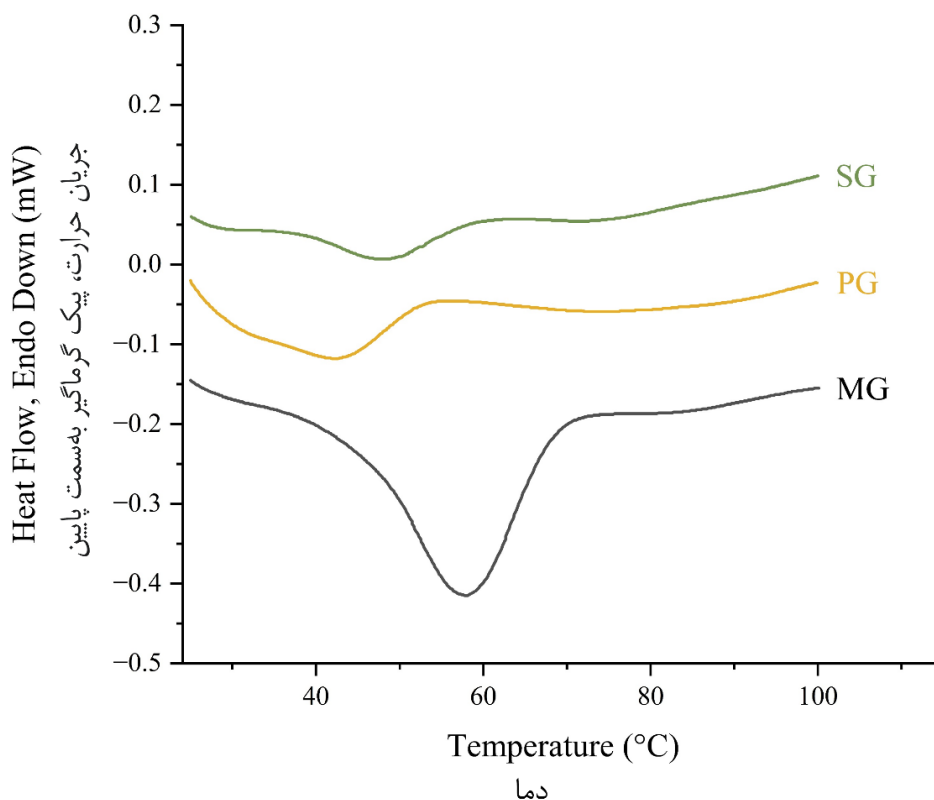
همکاران (Li *et al.*, 2021) برای اولئوژل‌های بر پایه‌ی گلیسرول مونواس‌تئارات (MS) و گلیسرول مونوپهنات (MB)، دو پیک گرماگیر مشاهده کردند. آن‌ها پیک اول ($55/55^{\circ}\text{C}$ در MS و $64/77^{\circ}\text{C}$ در MB) برای فاز آل-آلفا^۱ و پیک دوم ($31/58^{\circ}\text{C}$ در MS و $48/61^{\circ}\text{C}$ در MB) را به تبدیل آل-آلفا به زیر-آلفا^۲ نسبت دادند. همچنین اولئوژل بر پایه‌ی گلیسرول مونولورات در مطالعه‌ی ژنگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2023) فقط یک پیک ذوب در حدود 40°C نشان داد که ناشی از ذوب فاز آل-آلفا بود. اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر پایین‌ترین دمای ذوب را نشان داد ($42/55^{\circ}\text{C}$) که مشابه با دمای مشاهده‌شده در مطالعه‌ی منگ و همکاران (Meng *et al.*, 2019) برای اولئوژل‌های بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر بود. به‌علاوه دمای ذوب اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰، $48/54^{\circ}\text{C}$ بود که با دمای ذوب مشاهده شده در مطالعه‌ی غان و همکاران (Ghan *et al.*, 2020) برای اولئوژل بر پایه‌ی ۱۲ درصد اسپن ۶۰ ($49/07^{\circ}\text{C}$) مشابه بود. همچنین گائو و همکاران (Gao *et al.*, 2022) در اولئوژل حاوی ۱۰ درصد وزنی اسپن ۶۰، دو پیک گرماگیر در $42/2^{\circ}\text{C}$ (پیک ۱) و 55°C (پیک ۲) مشاهده کردند. آن‌ها پیک ۱ را به ازم‌گسیختگی خوشه‌های میسلی و پیک ۲ را به تخریب ساختار میسل‌های اسپن ۶۰ نسبت دادند. به‌طور کلی تفاوت در تعداد پیک‌های ذوب اولئوژل‌ها را می‌توان با منبع متفاوت

بررسی رفتار حرارتی

مطالعه در مورد رفتار حرارتی اولئوژل‌ها برای ارزیابی خواص فیزیکی آن‌ها ضروری است. DSC یک روش آنالیز حرارتی برای مطالعه‌ی چگونگی تغییر خواص فیزیکی یک نمونه در طول زمان نسبت به دما است (Monto *et al.*, 2023). بنابراین، برای بررسی و مقایسه‌ی دمای ذوب و آنتالپی اولئوژل‌ها این آزمون انجام شد. نمودار رفتار حرارتی اولئوژل‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. هر سه اولئوژل یک پیک ذوب نشان دادند که ناشی از ذوب کریستال‌های تشکیل‌شده توسط اولئوژلاتورها بود و با یافته‌های مطالعات منگ و همکاران (Meng *et al.*, 2019) برای اولئوژل‌های بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر، پرودرومیدیس و همکاران (Prodromidis, Biliaderis, 2023) برای اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید در مرحله‌ی اول گرمایش (0°C تا 100°C) و سینگ و همکاران (Singh, Pramanik, Ray, & Pal, 2015) برای اولئوژل‌های تولیدشده از اسپن ۶۰ مطابقت داشت. طبق جدول ۲ دمای پیک هر سه نمونه با یکدیگر اختلاف معنی‌دار داشتند که می‌توان به تفاوت در ترکیب شیمیایی اولئوژلاتورها نسبت داد. اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید بالاترین دمای ذوب ($57/62^{\circ}\text{C}$) را داشت که ناشی از ذوب فرم کریستالی آلفا بود (Prodromidis *et al.*, 2023). لی و

بر پایه‌ی اسپن ۶۰ علی‌رغم داشتن پایین‌ترین آنتالپی ذوب، دمای پیک ذوب بالاتری از اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر داشت که می‌توان به زنجیره‌ی آلیفاتیک طولانی استاریک اسید موجود در اسپن ۶۰ نسبت داد (de Oliveira et al., 2015).

اولئوژلاتور (Swe & Asavapichayont, 2018) و همچنین ترکیبات جزئی متفاوت در روغن‌های مورد استفاده (Dominguez et al., 2024) مرتبط دانست. با توجه به جدول ۲ روند دماهای پیک ذوب اولئوژل‌ها با مقادیر آنتالپی ذوب مطابقت نداشت؛ به‌طوری‌که اولئوژل



شکل ۳- نمودار رفتار حرارتی اولئوژل‌ها

MG: اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید، PG: اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر، SG: اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰

Fig. 3. Thermal behavior curves (DSC thermograms) of the oleogels

MG: Monoglyceride-based oleogel, PG: Polyglycerol ester-based oleogel, SG: Span 60-based oleogel

و $-79/33 \text{ J.g}^{-1}$ بود درحالی‌که اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ پایین‌ترین آنتالپی ($-42/33 \text{ J.g}^{-1}$) را داشت که با یافته‌های بخش بررسی مورفولوژی کریستالی، در یک راستا بود و می‌توان به شبکه‌ی ژلی ضعیف آن نسبت داد (Zhang et al., 2023). بنابراین اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید با داشتن تراکم بالایی از کریستال‌های سوزنی‌شکل ریز و در نتیجه، مقدار بالای ماده‌ی کریستالی، بالاترین پایداری حرارتی را داشت. به‌بیانی‌دیگر انرژی زیادی لازم بود تا برهم‌کنش‌های تشکیل دهنده‌ی شبکه‌ی سه‌بعدی از بین بروند (Dominguez et al., 2024).

همچنین به‌دلیل اینکه آنتالپی ذوب نشان‌دهنده‌ی درجه‌ی کریستالیزاسیون (نسبت نواحی کریستالی به آمورف) است (Giacomozzi, Palla, Carrín, & Martini, 2019)، احتمالاً دلیل بالاتر بودن آنتالپی ذوب اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر، بالاتر بودن مقدار نواحی کریستالی آن نسبت به اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ بود. برای تفسیر دقیق‌تر عدم تطابق پیک‌ها و آنتالپی ذوب، می‌توان از آزمون‌های تکمیلی مانند رزونانس مغناطیسی هسته‌ای^۱ (NMR) استفاده کرد.

همچنین از آنتالپی ذوب می‌توان در بررسی پایداری حرارتی نمونه‌ها استفاده کرد (Ghan et al., 2020). با توجه به جدول ۲ آنتالپی ذوب برای اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول‌استر به‌ترتیب ۳۶۸-

جدول ۲- دمای پیک و آنتالپی ذوب اولئوژل‌های بر پایه‌ی مونوگلیسرید (MG)، پلی‌گلیسرول استر (PG)، اسپن ۶۰ (SG)

Table 2- Melting peak temperature and enthalpy of oleogels based on monoglyceride (MG), polyglycerol ester (PG), and Span 60 (SG)

	MG	PG	SG
دمای پیک ذوب Melting peak temperature (°C)	57.62 ± 0.21 ^a	42.55 ± 0.39 ^c	48.54 ± 0.46 ^b
آنتالپی Enthalpy (J.g ⁻¹)	-368 ± 22 ^a	-79.33 ± 15.50 ^b	-42.33 ± 10.63 ^c

*حروف مختلف نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار بین نمونه‌ها می‌باشد (آزمون دانکن، $p < 0.05$).

*Different letters indicate significant differences between samples (Duncan's test, $p < 0.05$).

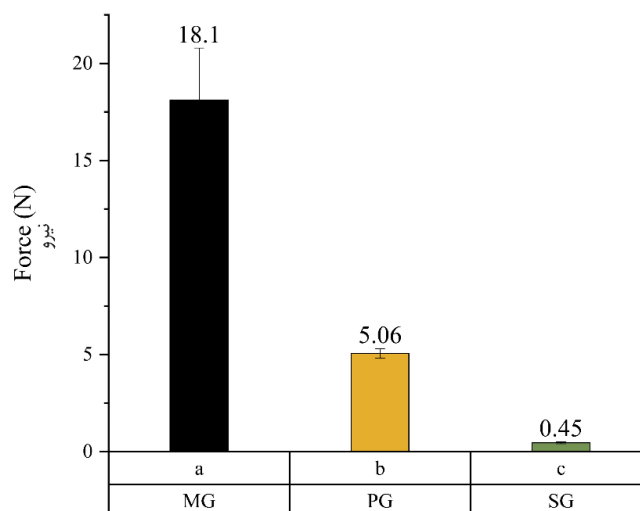
ارزیابی سفتی

سفتی، نشان‌دهنده‌ی استحکام مکانیکی و میزان تراکم شبکه‌ی سه‌بعدی اولئوژل‌ها است و نقش مهمی در بررسی پتانسیل آن‌ها برای کاربردهای عملی ایفا می‌کند (Li et al., 2021). به بیان دیگر سفتی یک اولئوژل به مقاومت آن در برابر تغییر شکل تحت نیروی اعمال‌شده اشاره دارد و تحت تأثیر نوع و مقدار اولئوژلاتور مورد استفاده قرار می‌گیرد (Wei et al., 2024). شکل ۴ مقادیر حداکثر نیروی ثبت‌شده را نشان می‌دهد. با توجه به وجود اختلاف معنی‌دار ($p < 0.05$) در سفتی هر سه اولئوژل، می‌توان نتیجه گرفت نوع اولئوژلاتور تأثیر قابل توجهی بر سفتی سیستم داشت. در سیستم‌های اولئوژل، استحکام مکانیکی ایده‌آل زمانی به دست می‌آید که مولکول‌های ژلاتور به‌طور یکنواخت در شبکه‌ی ژلی توزیع شوند (Banerjee et al., 2025). بنابراین، کریستال‌های سوزنی‌شکل ریزتر به دلیل داشتن سطح مقطع بیشتر برای ایجاد برهم‌کنش با یکدیگر موجب تشکیل شبکه‌ی سه‌بعدی یکنواخت تر شده و ژل‌های قوی‌تر و سفت‌تری تشکیل می‌دهند (Zhao et al., 2025). همان‌طور که تصاویر میکروسکوپی نشان دادند، اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید ریزترین کریستال‌ها را داشت که موجب داشتن بالاترین میزان سفتی آن شد. وی و همکاران (Wei et al., 2024) نیز در مطالعه‌ی خود، دو اولئوژل بر پایه‌ی موم زنبور عسل و گلیسرول مونولورات را از نظر سفتی مقایسه کردند و اولئوژل بر پایه‌ی موم زنبور عسل را به دلیل ساختار کریستالی متراکم و یکنواخت، سفت‌تر گزارش دادند. طبق شکل ۴ اولئوژل‌های بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول استر با داشتن کریستال‌های بزرگ‌تر از مونوگلیسرید و اسپن ۶۰ با داشتن پایین‌ترین تراکم، در رتبه‌های پایین‌تر سفتی قرار گرفتند، این روند علاوه‌بر مطابقت با تصاویر میکروسکوپی، با درصد ظرفیت نگهداری روغن و مقادیر آنتالپی ذوب اولئوژل‌ها نیز در یک راستا بود. باین‌حال اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول استر ضمن داشتن پایین‌ترین دمای پیک ذوب، پایین‌ترین سفتی را نشان نداد که می‌توان گفت طبق مطالعه‌ی فاسولین

و همکاران (Fasolin, Cerqueira, Pastrana, Vicente, & Cunha, 2018) دمای ذوب پایین لزوماً موجب تولید ژل ضعیف نمی‌شود. به‌طور کلی این یافته‌ها نشان دادند مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول استر توانایی تولید اولئوژل‌هایی با استحکام مکانیکی بالاتر نسبت به اسپن ۶۰ داشتند. یافته‌های مشابهی نیز وجود دارند که خواص مکانیکی بهتر اولئوژل‌های بر پایه‌ی گلیسرول را نسبت به اولئوژل‌های بر پایه‌ی سوربیتان گزارش دادند (Cerqueira et al., 2017; Trujillo-Ramírez, Lobato-Calleros, Vernon-Carter, & Alvarez-Ramirez, 2019).

طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه

شکل ۵ طیف‌های اولئوژلاتورها، روغن بادام‌زمینی پرس سرد و اولئوژل‌ها را نشان می‌دهد. طبق شکل ۵A طیف‌های هر سه اولئوژلاتور احتمال تشکیل پیوند هیدروژنی را نشان دادند، زیرا یک باند پهن در بازه‌ی ۳۱۱۰ تا 3674 cm^{-1} وجود داشت که مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های OH موجود در بخش آب‌دوست آن‌ها بود و در روغن وجود نداشت (Ghan, Siow, Tan, Cheong, & Thoo, 2022). مشابه این بازه در (Barroso et al., 2024) برای گلیسرول مونواسترات و اسپن ۶۰ نیز مشاهده و به کشش گروه OH نسبت داده شد. همچنین برای هر سه اولئوژلاتور باندهایی در 2919 cm^{-1} و 2850 cm^{-1} مشاهده شد که به ترتیب مربوط به کشش متقارن CH در CH_3 و CH_2 و کشش نامتقارن CH در CH_3 و CH_2 بود و با مطالعه‌ی غان و همکاران (Ghan et al., 2020) مطابقت داشت. یک باند نسبتاً تیز در 1740 ، $1737/5$ و $1733/5 \text{ cm}^{-1}$ به ترتیب برای اسپن ۶۰، پلی‌گلیسرول استر و مونوگلیسرید مشاهده شد که به کشش گروه کربونیل (C=O) ارتباط داشت و نشان‌دهنده‌ی وجود پیوندهای استری بود (Sun et al., 2022).



شکل ۴- مقادیر سفتی اولئوژل‌ها

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

MG: اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید، PG: اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول استر، SG: اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰

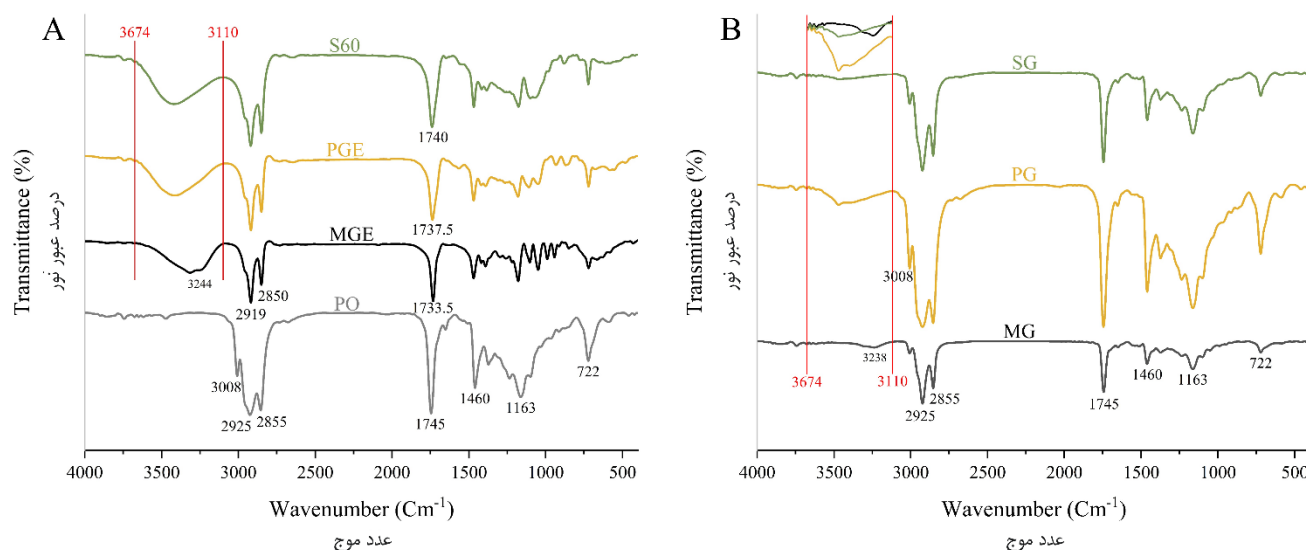
Fig. 4. Firmness values of oleogels

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

MG: Monoglyceride-based oleogel, PG: Polyglycerol ester-based oleogel, SG: Span 60-based oleogel

بر پایه‌ی مونوگلیسرید نسبت به مونوگلیسرید خالص، به اعداد موجی پایین‌تری منتقل شده بود که می‌توان به ظرفیت نگهداری روغن و سفتی بالای این اولئوژل نسبت داد. همچنین بیشترین کاهش در باند 3008 cm^{-1} نیز در اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید مشاهده شد که احتمالاً به دلیل شبکه‌ی متراکم این اولئوژل بود که موجب حفظ بهتر روغن (کاهش روغن آزاد) می‌شود (Li et al., 2024). علاوه بر این، باند مربوط به کشش گروه کربونیل در اولئوژل‌ها نسبت به اولئوژل‌های خالص به عدد موجی بالاتر (1745 cm^{-1}) انتقال یافت که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی تقویت پیوند هیدروژنی باشد (Liu et al., 2024). باندهای کشش متقارن و نامتقارن CH (2850 و 2919 cm^{-1}) در اولئوژل‌های خالص به 2855 و 2925 cm^{-1} در اولئوژل‌ها جابه‌جا شدند که به دلیل وجود برهم‌کنش‌های واندروالسی بود و باعث کاهش سیالیت زنجیره‌های آلکیل می‌شود (Ghan et al., 2022). باروسو و همکاران (Barroso et al., 2024) نیز این جابه‌جایی در باندهای کشش متقارن و نامتقارن CH را با برهم‌کنش‌های واندروالسی مرتبط دانستند. در انتها می‌توان نتیجه گرفت که تشکیل ژل در هر سه اولئوژل، صرفاً ناشی از برهم‌کنش‌های غیر کووالانسی مانند پیوند هیدروژنی و برهم‌کنش واندروالسی بود که با مطالعات لویی و همکاران (Lupi et al., 2018) و بارتی و همکاران (Bharti et al., 2021) مطابقت داشت.

در طیف روغن بادام‌زمینی (شکل ۵A) باند کوچک مشاهده شده در 3008 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی CH پیوند دوگانه‌ی سیس (=CH) بود که می‌تواند به گروه‌های آسیدهای چربی مانند اولئیک نسبت داده شود (Bharti et al., 2021)؛ این باند در مطالعه‌ی تروخیلو-رامیرز و همکاران (Trujillo-Ramírez et al., 2019) برای روغن دانه‌ی چیا نیز مشاهده شد. همچنین چهار باند اصلی نشان‌دهنده‌ی گروه‌های عاملی روغن‌ها، در حدود 1460 و 1745 ، 2855 و 2925 cm^{-1} مشاهده شد که به ترتیب ناشی از ارتعاش خمشی CH در گروه‌های CH_2 و CH_3 ، کشش C=O و ارتعاش کششی CH در گروه‌های CH_2 و CH_3 بود (Zhao et al., 2025). به علاوه، دو باند در 1163 cm^{-1} (کشش C-O گروه‌های استر) و 721 cm^{-1} (خمشی $(\text{CH}_2)_n$ در زنجیره‌ی آلکیل) مشاهده شد (Banerjee et al., 2025) که در اولئوژل‌های خالص هم وجود داشت. طبق شکل ۵B همه‌ی باندهای شناسایی شده برای اولئوژل‌های خالص و روغن در اولئوژل‌ها نیز مشاهده شد و در هیچ‌کدام از اولئوژل‌ها تشکیل یا از بین رفتن باند مشاهده نشد، با این حال چند جابه‌جایی جزئی و همچنین تغییر در شدت باندها مشاهده شد. در هر سه اولئوژل شدت باند پهن در بازه‌ی 3110 تا 3674 cm^{-1} کاهش یافت که می‌توان این کاهش را به مشارکت پیوند هیدروژنی در تشکیل شبکه‌ی ژلی نسبت داد (Sagiri et al., 2016). در مقایسه‌ی اولئوژل‌ها، نقطه‌ی اوج این بازه در اولئوژل



شکل ۵- نمودارهای طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه‌ی اولئولاتورها و روغن (A) و اولئوژل‌ها (B)

S60: اسپن ۶۰، PGE: پلی‌گلیسرول استر، MGE: مونوگلیسرید، PO: روغن بادام‌زمینی، MG: اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید، PG: اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول استر، SG: اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰

Fig. 5. FTIR spectra of: (A) oleogelators and oil and (B) oleogels

S60: Span 60, PGE: Polyglycerol ester, MGE: Monoglyceride, PO: Peanut oil, MG: Monoglyceride-based oleogel, PG: Polyglycerol ester-based oleogel, SG: Span 60-based oleogel

از حرکت عوامل اکسیدکننده در روغن جلوگیری می‌کند (Palla & Carrín, 2024). همچنین اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ نزدیک‌ترین به نمونه‌ی شاهد بود. این نتایج با یافته‌های بخش خواص مکانیکی و مشاهدات میکروسکوپی مطابقت داشت. به‌طوری‌که اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ دارای ضعیف‌ترین بافت بود و همچنین بزرگ‌ترین و کم تراکم‌ترین کریستال‌ها را داشت. این ویژگی‌ها نمایانگر شبکه‌ی سه بعدی ضعیف و در نتیجه، اثر محافظی کمتر بود. همچنین سورفاکتانت‌های حاوی اسیدهای چرب غیراشباع مانند اسپن ۶۰ ممکن است حاوی پراکسیدهای باقی‌مانده از فرآیند تولید باشند که موجب پتانسیل بالای آن‌ها برای تخریب اکسیداتیو می‌شود (Hasenhuettl & Hartel, 2008). درحالی‌که اولئوژل‌های بر پایه‌ی مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول استر به‌دلیل تشکیل شبکه‌ی ژلی قوی روند کندتری در افزایش عدد پراکسید نشان دادند و با یکدیگر اختلاف معنی‌دار ($p < 0.05$) نداشتند. بنابراین می‌توان گفت این دو اولئوژل توانستند مانع فیزیکی بهتری برای محافظت از روغن در برابر اثرات نور و اکسیژن در طول نگهداری باشند (Hafiz et al., 2025). چن و همکاران (Chen, Zhu, Tian, & Li, 2024) نیز پایین بودن عدد پراکسید اولئوژل‌های بر پایه‌ی گلیسرول مونولورات و دی‌استیل تارتاریک اسید مونودی گلیسرید را نسبت به اولئوژل‌های دیگر (تولیدشده از پروپیلن‌گلیکول-استر، مونوگلیسریدهای سوکسینیل، گلیسریل‌لاکتات استر، استرهای ساکارز، گلیسریل‌سیترات استر) به آرایش منظم و ساختار کریستالی

عدد پراکسید

پایداری اکسیداتیو نمونه‌ها توسط عدد پراکسید (PV) ارزیابی شد که یک پارامتر مهم برای بررسی مقدار محصولات اولیه‌ی تولیدشده در اکسیداسیون لیپیدها است (Malvano et al., 2024). در جدول ۳ نتایج حاصل از اندازه‌گیری عدد پراکسید در دو روز یکم و سی‌ام، ارائه شده است. پس از اندازه‌گیری اعداد پراکسید در روز اول، همه‌ی نمونه‌ها به‌مدت ۳۰ روز در دمای 25°C نگهداری شدند و سپس مجدداً عدد پراکسید آن‌ها اندازه‌گیری شد. روغن بادام‌زمینی پرس سرد به‌عنوان نمونه‌ی شاهد در نظر گرفته شد. در روز اول عدد پراکسید اولئوژل‌ها به‌دلیل دمای بالای استفاده‌شده برای تولید، بالاتر از روغن بادام‌زمینی پرس سرد بود (Badem & Baştürk, 2023). عدد پراکسید اولئوژل‌ها پس از ۳۰ روز بالاتر از نمونه‌ی شاهد بود که احتمالاً به‌دلیل بالاتر بودن پراکسید آن‌ها در روز اول نسبت به نمونه‌ی شاهد بود. به‌همین دلیل برای بررسی تاثیر اولئوژلاسیون می‌توان از مقایسه‌ی اختلاف عدد پراکسید نمونه‌ها در روز ۱ و ۳۰ استفاده کرد. به‌طوری‌که این اختلاف برای نمونه‌ی شاهد و اولئوژل‌های بر پایه‌ی مونوگلیسرید، پلی‌گلیسرول استر و اسپن ۶۰ به‌ترتیب $4/65$ ، $3/93$ ، $3/67$ و $4/4$ بود. بنابراین نمونه‌ی شاهد دارای تندترین روند افزایشی بود که می‌توان به عدم وجود شبکه‌ی ژلی در آن نسبت داد (Soares, Okuro, da Silva, Goldbeck, & Cunha, 2025). شبکه‌ی سه‌بعدی تشکیل شده توسط اولئوژلاتورها در روغن به‌عنوان مانع فیزیکی عمل کرده و

روغن می‌شود، به‌عنوان آنتی‌اکسیدان عمل می‌کنند. بررسی‌های این مطالعه گویای اثرگذاری مثبت اولئوژل‌ها بر پایداری اکسیداتیو روغن بود اما بالاتر بودن عدد پراکسید تمامی اولئوژل‌ها از نمونه‌ی شاهد نیاز به بهینه‌سازی روش تهیه‌ی اولئوژل را خاطرنشان می‌کند.

متراکم آن‌ها نسبت دادند. همچنین طبق یافته‌های کاپونیو و همکاران (Caponio *et al.*, 2011) امولسیفایرهای دارای OH آزاد (مانند مونوگلیسرید) در غلظت‌های بالای ۳ درصد با جذب اکسیژن توسط گروه‌های OH خود در سطح روغن که موجب عدم تماس اکسیژن با

جدول ۳- مقادیر عدد پراکسید روغن بادام‌زمینی (PO) اولئوژل‌های بر پایه‌ی مونوگلیسرید (MG)، پلی‌گلیسرول‌استر (PG)، اسپن ۶۰ (SG)
Table 3- Peroxide values of peanut oil (PO) in oleogels based on monoglyceride (MG), polyglycerol ester (PG), and Span 60 (SG)

زمان Time (Day)	PO	MG	PG	SG
1	0.65 ± 0.05 ^c	1.76 ± 0.06 ^b	1.67 ± 0.07 ^b	2.08 ± 0.16 ^a
30	5.3 ± 0.7 ^b	5.69 ± 0.16 ^b	5.34 ± 0.15 ^b	6.48 ± 0.2 ^a

*حروف مختلف نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار بین نمونه‌ها می‌باشد (آزمون دانکن، $p < 0.05$).

*Different letters indicate significant differences between samples (Duncan's test, $p < 0.05$).

(*al.*, 2023). در مقایسه‌ی یک‌های تهیه‌شده با اولئوژل‌ها، طبق شکل ۶، MGBC بافت سفت‌تری دارد که احتمالاً بتوان به سفت بودن بیش-ازحد اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید نسبت داد؛ به‌طوری‌که موجب کاهش عملکرد هم‌زن برقی به‌دلیل سفتی زیاد خمیر شد. این یافته‌ها با تصاویر یک‌ها در شکل ۶ نیز مطابقت داشت؛ به‌طوری‌که طبق تصاویر، MGBC با بالاترین و نمونه‌ی شاهد با پایین‌ترین تخلخل و ارتفاع، نرم‌ترین و سفت‌ترین بافت را داشتند. در نهایت می‌توان گفت این آزمون فقط اطلاعاتی در مورد سفتی یک‌ها می‌دهد و برای بررسی دقیق‌تر بافت یک‌ها می‌توان با استفاده از آزمون بافت‌سنجی^۱ (TPA) پارامترهای بافتی بیشتری مانند قابلیت جویدن^۲، پیوستگی^۳، قابلیت ارتجاع^۴ و ... را ارزیابی کرد.

ارزیابی حسی یک‌های

پذیرش مصرف‌کننده برای تعیین کیفیت یک محصول حائز اهمیت است (Zarzycki *et al.*, 2022). میانگین نتایج پارامترهای حسی (رنگ، طعم، بافت و پذیرش کلی) برای یک‌های کره‌ای حاوی اولئوژل و کره (به‌عنوان شاهد) در شکل ۷ ارائه شده است. در پارامتر بافت هر دو یک‌ تهیه‌شده از اولئوژل امتیاز بالاتری از یک‌ شاهد گرفتند که با نتایج آزمون فشردن مطابقت داشت و هر دو نرم‌تر از یک‌ شاهد بودند. سو و همکاران (Su *et al.*, 2023) نیز در مطالعه‌ی خود که در مورد جایگزین کردن کامل کره با پیکرینگ امولسیون تولیدشده از اوآلبومین-فرولیک اسید-کاراگینان در فرمولاسیون نان بود؛ گزارش دادند که نان دارای پیکرینگ امولسیون در پارامتر بافت، امتیاز بالاتری از نمونه‌ی شاهد گرفت و دلیل آن را به نرم‌تر بودن این نان نسبت

ارزیابی سفتی یک‌های

بافت یک‌ یک عامل مهم در کیفیت و پذیرش آن توسط مصرف‌کنندگان است (Chen *et al.*, 2023). برای بررسی تأثیر نوع اولئوژلاتور و همچنین جایگزینی کامل کره بر بافت یک‌های کره‌ای آزمون فشردن انجام شد و حداکثر نیرو در این آزمون به‌عنوان سفتی ثبت شد. طبق شکل ۶ یک‌ شاهد دارای بالاترین سفتی بود و اختلاف معنی‌دار ($p < 0.05$) با دو نمونه‌ی دیگر داشت؛ زیرا کره به‌علت داشتن بخش جامد کمتر، موجب تولید خمیر با ویسکوزیته‌ی پایین‌تری شده و به‌دلیل ناتوانی در حفظ حباب‌های هوا باعث سفت‌تر شدن بافت یک‌ می‌شود (Fearon, 2011; Weeragul & Pandolsook, 2022). همچنین یک‌های فرموله‌شده با اولئوژل به‌طور قابل توجهی نرم‌تر بودند که می‌توان به داشتن خاصیت امولسیفایری اولئوژلاتورها و سفتی اولئوژل‌های استفاده‌شده در فرمولاسیون نسبت داد. سفت‌تر بودن چربی باعث حفظ بیشتر حباب‌های هوا شده و باعث نرم‌تر شدن یک‌ می‌شود. به‌طوری‌که در مطالعه‌ی بادم و همکاران (Badem & Baştürk, 2023) نرم‌تر شدن بافت یک‌ فرموله‌شده با اولئوژل، با افزایش درصد موم به‌عنوان اولئوژلاتور (سفت‌تر شدن اولئوژل) مشاهده شد. همچنین یک‌ تولیدشده در مطالعه‌ی آلوارز-رامیرز و همکاران (Alvarez-Ramirez, Vernon-Carter, Carrera-Tarela, Garcia, & Roldan-Cruz, 2020) به‌دلیل جایگزین کردن کامل کره با اولئوژل بر پایه‌ی موم کاندلیلا، بافت نرم‌تری داشت. ازسوی دیگر به‌دلیل اینکه مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول‌استر امولسیفایر هستند، می‌توانند به‌طور مؤثری حباب‌های هوای بیشتری را در طول فرآیند هم‌زدن به خمیرها وارد کنند و از این طریق نیز باعث نرمی بافت یک‌ شوند (Chen *et al.*

3- Cohesiveness

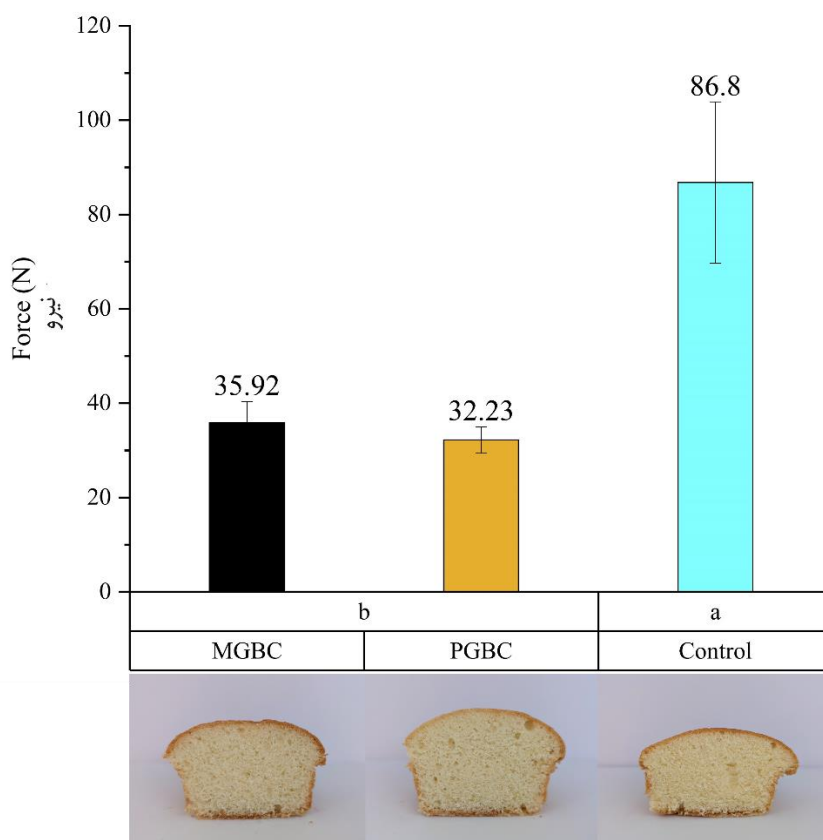
4- Springiness

1- Texture profile analysis

2- Chewiness

کنار هدونیک می‌تواند راه‌گشا باشد. در انتها PGBC بالاترین امتیاز را در پارامتر پذیرش کلی و رنگ به خود اختصاص داد. همچنین MGBC و کیک شاهد امتیاز یکسانی را در پذیرش کلی کسب کردند. بنابراین می‌توان گفت اولئوژل‌های بر پایه‌ی مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول‌استر، می‌توانند به‌عنوان جایگزین کامل کره در فرمولاسیون کیک کره‌ای مورد استفاده قرار گیرند.

دادند. از لحاظ طعم نیز این نتیجه تکرار شد و کیک شاهد پایین‌ترین امتیاز را گرفت. به‌دلیل جایگزینی کامل اولئوژل با کره در فرمولاسیون کیک و همچنین استفاده از روغن پرس سرد بادام‌زمینی در فرمولاسیون اولئوژل‌ها، ممکن است دریافت امتیاز پایین کیک شاهد ناشی از ذائقه یا علاقه‌ی ارزیاب‌ها باشد؛ به‌طوری‌که طعم بادام‌زمینی را به کره ترجیح دادند. بنابراین استفاده از ارزیاب‌های تخصصی و ارزیابی توصیفی در



شکل ۶- شکل ظاهری و مقادیر سفتی کیک‌های کره‌ای

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

Control: کیک کره‌ای تهیه‌شده با کره، MGBC: کیک کره‌ای تهیه‌شده با اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید، PGBC: کیک کره‌ای تهیه‌شده با اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر

Fig. 6. Visual appearance and firmness values of butter cakes

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

Butter cake prepared using butter (Control), monoglyceride based oleogel (MGBC), polyglycerol ester based oleogel (PGBC)

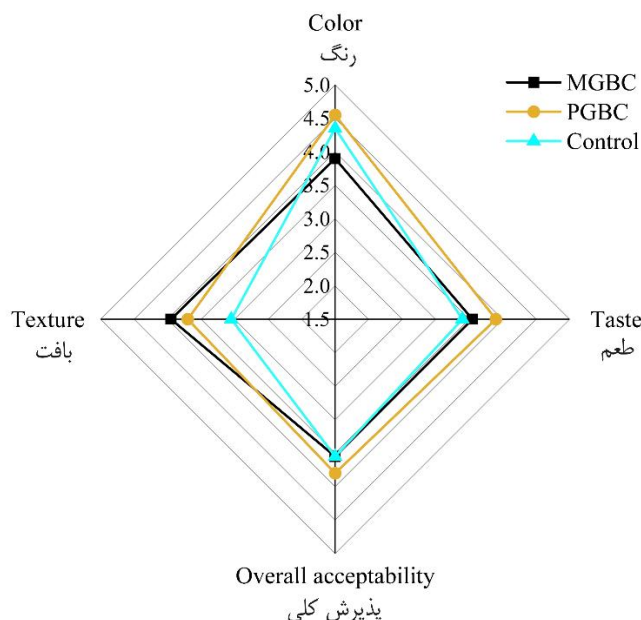
نتیجه‌گیری

وجود برهم‌کنش‌های غیر کووالانسی را در تشکیل ژل تأیید کرد. تصاویر میکروسکوپی نیز تفاوت در ریزساختار کریستال‌ها را نشان داد و ثابت کرد که خواص ماکروسکوپی اولئوژل‌ها تا حد زیادی به نوع و شکل کریستال آن‌ها بستگی دارد. تمامی اولئوژل‌ها در مقایسه با روغن خالص، افزایش آهسته‌تری در عدد پراکسید طی ۳۰ روز نگهداری نشان دادند. مهم‌تر از همه، استفاده از این اولئوژل‌ها در کیک کره‌ای نشان داد که نمونه‌های حاوی اولئوژل‌های مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول‌استر، به‌ترتیب امتیاز پذیرش کلی برابر و حتی بالاتر از نمونه‌ی شاهد (کیک

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، نوع اولئوژلاتور تأثیر به‌سزایی بر خصوصیات فیزیکی-شیمیایی و ساختاری اولئوژل‌ها داشت. اولئوژل تهیه‌شده با مونوگلیسرید بالاترین ظرفیت نگهداری روغن، بیشترین پایداری حرارتی و سفت‌ترین بافت را از خود نشان داد. اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر نیز عملکرد مطلوبی داشت، ولی اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ پتانسیل بالایی برای استفاده به‌عنوان جایگزین چربی نشان نداد. تغییرات مشاهده‌شده در طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه،

فرمولاسیون کیک‌های کره‌ای، با حفظ یا بهبود ویژگی‌های کیفی محصول نهایی، ضمن کاهش اسیدهای چرب اشباع و ترانس، اثبات می‌کند.

حاوی کره) کسب کردند و همچنین بافت آن‌ها نرم‌تر بود. بنابراین، یافته‌های این مطالعه به‌روشنی پتانسیل بالای اولئوژل‌های بر پایه‌ی مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول‌استر را برای جایگزینی کامل کره در



شکل ۷- پارامترهای ارزیابی حسی کیک‌های کره‌ای

Control: کیک کره‌ای تهیه‌شده با کره، MGBC: کیک کره‌ای تهیه‌شده با اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید، PGBC: کیک کره‌ای تهیه‌شده با اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر

Fig. 7. Sensory evaluation parameters of butter cakes

Butter cake prepared using butter (Control), monoglyceride based oleogel (MGBC), polyglycerol ester based oleogel (PGBC)

میزان مشارکت نویسندگان

نجیبی حسینی: مدیریت داده‌ها، تحقیق و بررسی، نرم‌افزار، نوشتن - پیش‌نویس اصلی، **قنبرزاده:** مفهوم‌سازی، تأمین مالی، مدیریت پروژه، نظارت، منابع، نوشتن - بررسی و ویرایش.

منابع تأمین مالی

این تحقیق هیچ کمک مالی خاصی از سازمان‌های تأمین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیر انتفاعی دریافت نکرد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از آزمایشگاه بیوفیزیک و مهندسی مواد غذایی صمیمانه قدردانی می‌کنم و بر خود واجب می‌دانم تا از دوستان گران‌قدرم، آقایان حامد حسن‌زاده، دیده‌ور، روشن‌دوست، رادخواه و فرهنگ، همچنین خانم‌ها نیر کریمی، علمی، باقری، نوینی، آذری و خداپرست صمیمانه سپاسگزاری نمایم.

با وجود نتایج امیدوارکننده، این پژوهش با محدودیت‌هایی مواجه بود که زمینه را برای تحقیقات آتی فراهم می‌آورد. دامنه‌ی مطالعه به یک نوع روغن (بادام‌زمینی پرس سرد) و سه نوع امولسیفایر در یک غلظت مشخص (۱۲ درصد) محدود بود. علاوه‌براین، ارزیابی خواص بافتی و حسی می‌توانست کامل‌تر باشد؛ به‌عنوان مثال، استفاده از آزمون‌های رئولوژیکی برای اولئوژل‌ها و آنالیز پروفایل بافت (TPA) برای کیک، درک عمیق‌تری از خواص مکانیکی ارائه می‌داد و بهره‌گیری از پیل‌های تخصصی‌تر و ارزیابی توصیفی، به اعتبارسنجی دقیق‌تر نتایج کمک می‌نمود. از دیگر محدودیت‌ها، نیاز به بهینه‌سازی فرآیند تولید برای به حداقل رساندن اکسیداسیون بود که در نتایج اندازه‌گیری عدد پراکسید مشهود بود. همچنین، پایداری بلندمدت کیک‌های نهایی از نظر بیاتی و حفظ ویژگی‌های حسی در طول دوره‌ی نگهداری بررسی نشد. در نهایت، پیشنهاد می‌شود برای پژوهش‌های آتی، عملکرد این اولئوژل‌ها به‌عنوان جایگزین چربی در سایر فرآورده‌های نانوائی و همچنین کره‌ی بادام‌زمینی نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

References

1. Alvarez-Ramirez, J., Vernon-Carter, E., Carrera-Tarela, Y., Garcia, A., & Roldan-Cruz, C. (2020). Effects of candelilla wax/canola oil oleogel on the rheology, texture, thermal properties and in vitro starch digestibility of wheat sponge cake bread. *LWT-Food Science and Technology*, 109701, 130. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109701>
2. Amoah, C., Lim, J., Jeong, S., & Lee, S. (2017). Assessing the effectiveness of wax-based sunflower oil oleogels in cakes as a shortening replacer. *LWT-Food Science and Technology*, 86, 430–437. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.021>
3. Ang, E.M., Abdullah, N., Muhammad, N., & Lizardo, R.C.M. (2017). Effect of formulation with papaya sauce as fat replacer on butter cake texture. *Journal of Science and Technology*, 9(4).
4. Arriera, N.M., de Ávila, M.T., Flores, W.H., Michelin, M., Duarte, S.H., & Burkert, J.F.D.M. (2025). Oleogels based on carotenoid-rich microbial oil produced by *R. mucilaginosa* in agro-industrial by-products. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 48(2), 275–286. <https://doi.org/10.1007/s00449-024-03108-y>
5. Badem, Ş., & Baştürk, A. (2023). Oxidative stability and characterization of oleogels obtained from safflower oil-based beeswax and rice bran wax and their effect on the quality of cake samples. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 100(8), 635–649. <https://doi.org/10.1002/aocs.12694>
6. Banerjee, D., Sengupta, S., Sahu, D., Ghosh, S., Neelapu, B.C., Mitra, A.K., Sarkar, P., Dutta, D., Demina, T.S., Pal, K. (2025). Optical and structural modifications in stearyl alcohol oleogels induced by soylecithin. *Crystal Growth & Design*, 25(7), 2043–2055. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.4c01638>
7. Barroso, N.G., Okuro, P.K., Cerqueira, M.Â.P.R., & Cunha, R.L. (2024). Unveiling the formation capacity of multicomponent oleogels :Performance of lecithin interacting with monostearate derivatives. *Food Research International*, 187, 114430. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114430>
8. Behera, B., Patil, V., Sagiri, S., Pal, K., & Ray, S. (2012). Span-60-based organogels as probable matrices for transdermal/topical delivery systems. *Journal of Applied Polymer Science*, 125(2), 852–863. <https://doi.org/10.1002/app.35674>
9. Bharti, D., Kim, D., Cerqueira, M.A., Mohanty, B., Habibullah, S., Banerjee, I., & Pal, K. (2021). Effect of biodegradable hydrophilic and hydrophobic emulsifiers on the oleogels containing sunflower wax and sunflower oil. *Gels*, 7(3), 133. <https://doi.org/10.3390/gels7030133>
10. Bublin, M., & Breiteneder, H. (2014). Cross-reactivity of peanut allergens. *Current Allergy and Asthma Reports*, 14, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11882-014-0426-8>
11. Buitimea-Cantúa, N., Serna-Saldivar, S., Pérez-Carrillo, E., Jordânia-Silva, T., Barrera-Arellano, D., & Buitimea-Cantúa, G. (2022). Textural and rheological properties of soybean oil organogels structured with polyglycerol and propylene glycol esters during storage. *Grasas y Aceites*, 73(1), e443–e443. <https://doi.org/10.3989/gya.1001202>
12. Caponio, F., Paradiso, V., Bruno, G., Summo, C., Pasqualone, A., & Gomes, T. (2011). Do monoacylglycerols act as pro-oxidants in purified soybean oil? Evidence of a dose-dependent effect. *Italian Journal of Food Science*, 23(3), 239. <https://doi.org/10.1021/jf5025888>
13. Cerqueira, M.A., Fasolin, L.H., Picone, C.S., Pastrana, L.M., Cunha, R.L., & Vicente, A.A. (2017). Structural and mechanical properties of organogels: Role of oil and gelator molecular structure. *Food Research International*, 96, 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.03.021>
14. 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, 102959. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102959>
15. 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, 140927. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140927>
16. Davidovich-Pinhas, M., Barbut, S., & Marangoni, A. (2015). The role of surfactants on ethylcellulose oleogel structure and mechanical properties. *Carbohydrate Polymers*, 127, 355–362. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.03.085>
17. de Oliveira, G.M., Stahl, M.A., Ribeiro, A.P.B., Grimaldi, R., Cardoso, L.P., & Kieckbusch, T.G. (2015). Development of zero trans/low sat fat systems structured with sorbitan monostearate and fully hydrogenated canola oil. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 117(11), 1762–1771. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201400559>
18. Demirkesen, I., & Mert, B. (2020). Recent developments of oleogel utilizations in bakery products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(14), 2460–2479. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1649243>
19. Dimakopoulou-Papazoglou, D., Giannakaki, F., & Katsanidis, E. (2023). Structural and physical characteristics of mixed-component oleogels: Natural wax and monoglyceride interactions in different edible oils. *Gels*, 9(8), 627. <https://doi.org/10.3390/gels9080627>

20. Dominguez, M., Carrin, M.E., & Palla, C.A. (2024). Structuring PUFA-rich oils with monoglycerides: Physicochemical and nutritional properties of fat substitutes with high-lipid quality. *Food Bioscience*, 60, 104107. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104107>
21. Dun, Q., Yao, L., Deng, Z., Li, H., Li, J., Fan, Y., & Zhang, B. (2019). Effects of hot and cold-pressed processes on volatile compounds of peanut oil and corresponding analysis of characteristic flavor components. *LWT-Food Science and Technology*, 112, 107648. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.084>
22. Fasolin, L.H., Cerqueira, M., Pastrana, L., Vicente, A., & Cunha, R. (2018). Thermodynamic, rheological and structural properties of edible oils structured with LMOGs: Influence of gelator and oil phase. *Food Structure*, 16, 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2018.03.003>
23. Fearon, A.M. (2011). Butter and butter products. *Dairy Ingredients for Food Processing*, 199–223. <https://doi.org/10.1002/9780470959169.ch9>
24. Feng, Z., He, D., Zhang, L., Li, Q., Xue, C., Yi, X., Liao, L., Pei, Z., & Shen, X. (2025). Preparation of myofibrillar protein oleogels by emulsion template method: Application of fat substitute for sponge cakes. *LWT-Food Science and Technology*, 216, 117350. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117350>
25. Gao, Z., Zhang, C., Wu, Y., Chen, F., Hu, B., Wang, R., Yang, J., & Nishinari, K. (2022). Composite oleogels formed by cellulose particles and sorbitan acid esters. *Food Structure*, 31, 100242. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2021.100242>
26. Ghan, S.Y., Siow, L.F., Tan, C.P., Cheong, K.W., & Thoo, Y.Y. (2020). Influence of soya lecithin, sorbitan and glyceryl monostearate on physicochemical properties of organogels. *Food Biophysics*, 15(3), 386–395. <https://doi.org/10.1007/s11483-020-09633-z>
27. Ghan, S.Y., Siow, L.F., Tan, C.P., Cheong, K.W., & Thoo, Y.Y. (2022). Palm olein organogelation using mixtures of soy lecithin and glyceryl monostearate. *Gels*, 8(1), 30. <https://doi.org/10.3390/gels8010030>
28. Giacomozzi, A.S., Carrin, M.E., & Palla, C.A. (2018). Muffins elaborated with optimized monoglycerides oleogels: From solid fat replacer obtention to product quality evaluation. *Journal of Food Science*, 83(6), 1505–1515. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14174>
29. Giacomozzi, A.S., Carrin, M.E., & Palla, C.A. (2023). Muffins made with monoglyceride oleogels: Impact of fat replacement on sensory properties and fatty acid profile. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 100(4), 343–349. <https://doi.org/10.1002/aocs.12674>
30. Giacomozzi, A.S., Palla, C.A., Carrin, M.E., & Martini, S. (2019). Physical properties of monoglycerides oleogels modified by concentration, cooling rate, and high-intensity ultrasound. *Journal of Food Science*, 84(9), 2549–2561. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14762>
31. Güneşer, B.A., Yılmaz, E., & Ok, S. (2017). Cold pressed versus refined winterized corn oils: quality, composition and aroma. *Grasas y Aceites*, 68(2), e194–e194. <https://doi.org/10.3989/gya.1168162>
32. Hafiz, S., Sadeghizadeh-Yazdi, J., Eskandari, S., Morokian, R., Akramzade, N., & Madadzadeh, F. (2025). Physicochemical, rheological, sensory properties and shelf life of processed cheese analogue prepared with oleogel sesame oil and mono-and di-glyceride (E471). *Food Chemistry*, 470, 142467. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142467>
33. Hasenhuettl, G.L., & Hartel, R.W. (2008). *Food emulsifiers and their applications* (Vol. 19): Springer.
34. Hwang, H.S., Kim, S., Winkler-Moser, J.K., Lee, S., & Liu, S.X. (2022). Feasibility of hemp seed oil oleogels structured with natural wax as solid fat replacement in margarine. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 99(11), 1055–1070. <https://doi.org/10.1002/aocs.12619>
35. Jang, A., Bae, W., Hwang, H.-S., Lee, H.G., & Lee, S. (2015). Evaluation of canola oil oleogels with candelilla wax as an alternative to shortening in baked goods. *Food Chemistry*, 187, 525–529. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.110>
36. Lee, S. (2018). Utilization of foam structured hydroxypropyl methylcellulose for oleogels and their application as a solid fat replacer in muffins. *Food Hydrocolloids*, 77, 796–802. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.11.022>
37. Li, J., Guo, R., Bi, Y., Zhang, H., & Xu, X. (2021). Comprehensive evaluation of saturated monoglycerides for the forming of oleogels. *LWT-Food Science and Technology*, 151, 112061. In Press. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112061>
38. Li, J., Xiao, Y., Guo, R., Bi, Y., Zhang, H., & Xu, X. (2024). Enhancing the long-term stability of glyceryl monostearate-based oleogels by incorporating hydroxy monoglyceride as an additional scaffolding agent. *LWT-Food Science and Technology*, 214, 117154. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117154>
39. 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, 100370. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2024.100370>
40. Lupi, F., Mancina, V., Baldino, N., Parisi, O., Scrivano, L., & Gabriele, D. (2018). Effect of the monostearate/monopalmitate ratio on the oral release of active agents from monoacylglycerol organogels. *Food & Function*, 9(6), 3278–3290. <https://doi.org/10.1039/C8FO00594J>

41. Malvano, F., Albanese, D., Cinquanta, L., Liparoti, S., & Marra, F. (2024). A comparative study between beeswax and glycerol monostearate for food-grade oleogels. *Gels*, 10(4), 214. <https://doi.org/10.3390/gels10040214>
42. Malvano, F., Laudisio, M., Albanese, D., d'Amore, M., & Marra, F. (2022). Olive oil-based oleogel as fat replacer in a sponge cake: A comparative study and optimization. *Foods*, 11(17), 2643. <https://doi.org/10.3390/foods11172643>
43. 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, 108590. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108590>
44. Meng, X., Wang, H., Lu, Y., Yu, N., & Ye, Q. (2024). The gelation characteristics of *Torreya grandis* wax in diacylglycerol and its preparation of oleogel substitution for shortening. *International Journal of Biological Macromolecules*, 271, 132592. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132592>
45. Monto, A.R., Yuan, L., Xiong, Z., Shi, T., Li, M., Wang, X., Jin, W., Li, J., Gao, R. (2023). α -tocopherol stabilization by soybean oil and glyceryl monostearate made oleogel: Dynamic changes and characterization for food application. *LWT-Food Science and Technology*, 187, 115325. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115325>
46. Nguyen Doan Mai, H., Phan Thi Lan, K., Techapun, C., Leksawasdi, N., Taesuwan, S., Hanprom, N., & Khemacheewakul, J. (2023). Quality evaluation of butter cake prepared by substitution of wheat flour with green soybean (*Glycine max* L.) okara. *Journal of Culinary Science & Technology*, 21(4), 606–619. <https://doi.org/10.1080/15428052.2021.1978363>
47. Palla, C., & Carrín, M.E. (2024). Monoglyceride Oleogels. In *Advances in Oleogel Development, Characterization, and Nutritional Aspects* (pp. 115–131): Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46831-5_5
48. Palla, C., Dominguez, M., & Carrín, M. (2022). An overview of structure engineering to tailor the functionality of monoglyceride oleogels. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21, 2587–2614. In Press. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12930>
49. Pancharoen, S., Leelawat, B., & Vattanukul, S. (2019). Using texture properties for clustering butter cake from various ratios of ingredient combination. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13, 34–42. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9916-z>
50. Prodromidis, P., Biliaderis, C.G., Katsanidis, E., & Moschakis, T. (2023). Effect of tween 20 on structure, phase-transition behavior and mechanical properties of monoglyceride oleogels. *Food Structure*, 38, 100345. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2023.100345>
51. Sagiri, S.S., Kasiviswanathan, U., Shaw, G.S., Singh, M., Anis, A., & Pal, K. (2016). Effect of sorbitan monostearate concentration on the thermal, mechanical and drug release properties of oleogels. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 33, 1720–1727. <https://doi.org/10.1007/s11814-015-0295-4>
52. 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. <https://doi.org/10.3390/gels9030180>
53. Singh, V.K., Pramanik, K., Ray, S.S., & Pal, K. (2015). Development and characterization of sorbitan monostearate and sesame oil-based organogels for topical delivery of antimicrobials. *Aaps Pharmscitech*, 16, 293–305. <https://doi.org/10.1208/s12249-014-0223-7>
54. Soares, M.G., Okuro, P.K., da Silva, M.F., Goldbeck, R., & Cunha, R.L. (2025). Ultra-long-chain sorbitol esters tailoring thermo-responsive rheological properties of oleogels. *Foods*, 14(6), 1030.
55. Su, T., Zhang, E., Yang, Y., Zheng, T., Xin, T., Dong, L., Huang, F., & Su, D. (2023). Utilization of ovalbumin-ferulic acid-carrageenan Pickering emulsion in baked bread for butter reduction: Bread microstructural properties and quality. *LWT-Food Science and Technology*, 185, 115124. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115124>
56. Sun, H., Xu, J., Lu, X., Xu, Y., Regenstein, J. M., Zhang, Y., & Wang, F. (2022). Development and characterization of monoglyceride oleogels prepared with crude and refined walnut oil. *LWT-Food Science and Technology*, 154, 112769. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112769>
57. Swe, M.T.H., & Asavapichayont, P. (2018). Effect of silicone oil on the microstructure, gelation and rheological properties of sorbitan monostearate–sesame oil oleogels. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 13(5), 485–497. <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2018.04.006>
58. Trujillo-Ramírez, D., Lobato-Calleros, C., Vernon-Carter, E.J., & Alvarez-Ramirez, J. (2019). Cooling rate, sorbitan and glyceryl monostearate gelators elicit different microstructural, viscoelastic and textural properties in chia seed oleogels. *Food Research International*, 119, 829–838. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.066>
59. Uslu, E.K., & Yilmaz, E. (2021). Preparation and characterization of oleogels with tallow and partially hydrolyzed tallow as organogelators. *Grasas y Aceites*, 72(1), e388–e388. <https://doi.org/10.3989/gya.1031192>
60. Uvanesh, K., Sagiri, S., Senthilguru, K., Pramanik, K., Banerjee, I., Anis, A., Al-Zahrani, S., & Pal, K. (2016). Effect of Span 60 on the microstructure, crystallization kinetics, and mechanical properties of stearic acid Oleogels: An in-depth analysis. *Journal of Food Science*, 81(2), E380–E387. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13170>

61. Wang, Z., Chandrapala, J., Truong, T., & Farahnaky, A. (2023). Oleogels prepared with low molecular weight gelators: Texture, rheology and sensory properties, a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(23), 6069–6113. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2027339>
62. Weeragul, K., & Pandolsook, S. (2022). Effects of manufacturing conditions on physical characteristics of recombined butter and quality of butter and sponge cakes. *Journal of Culinary Science & Technology*, 20(3), 197–212. <https://doi.org/10.1080/15428052.2020.1824831>
63. Wei, X., Xia, R., Wei, C., Shang, L., An, J., & Deng, L. (2024). The impact of beeswax and glycerol monolaurate on camellia oil oleogel's formulation and application in food products. *Molecules*, 29(13), 3192. <https://doi.org/10.3390/molecules29133192>
64. Yılmaz, E., & Öz, C. (2024). Utilization of hazelnut oil oleogels for the preparation of milk couverture type compound chocolates: Composition, properties, and sensory evaluations. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 101(12), 1401–1416. <https://doi.org/10.1002/aocs.12850>
65. Yilmaz, E., & Uslu, E.K. (2020). Comparison of the glycerol monostearate and polyglycerol stearate oleogels: Effects of amphiphile addition. *Authorea Preprints*. <https://doi.org/10.22541/au.158775697.74846507>
66. Yin, W.-t., Maradza, W., Xu, Y.-f., Ma, X.-t., Shi, R., Zhao, R.-y., & Wang, X.-d. (2022). Comparison of key aroma-active composition and aroma perception of cold-pressed and roasted peanut oils. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(5), 2968–2979. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15615>
67. Zarzycki, P., Wirkijowska, A., Nawrocka, A., Kozłowicz, K., Krajewska, M., Kłosok, K., & Krawęcka, A. (2022). Effect of Moldavian dragonhead seed residue on the baking properties of wheat flour and bread quality. *LWT-Food Science and Technology*, 155, 112967. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112967>
68. Zhang, Y., Xu, J., Tang, C., & Li, Y. (2023). Crystallization behavior and physical properties of monoglycerides-based oleogels as function of oleogelator concentration. *Foods*, 12(2), 345. <https://doi.org/10.3390/foods12020345>
69. Zhao, S., Zhu, Y., Zhang, L., Hu, F., Xu, W., Zheng, M., Zhou, Y., Li, S. (2025). The structuring mechanism and in vitro digestion of novel EPA-rich medium-and long-chain triacylglycerol oleogels. *LWT-Food Science and Technology*, 215, 117299. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117299>
70. Zulficar, A., Shabbir, M.A., Tahir, F., Khan, M.R., Ahmed, W., Yıkımsı, S., Manzoor, M., Abdi, G., Aadil, R .M. (2024). Development of oleogel by structuring the blend of corn oil and sunflower oil with beeswax to replace margarine in cookies. *Food Chemistry: X*, 23, 101676. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101676>