Iranian Food Science and Technology Research Journal
Homepage: https://ifstrj.um.ac.ir

Research Article
Vol. 22, No. 6, Jan.-Feb. 2027, p. 599-619

Comparison of Rheological and Physicochemical Properties of Palm Oil and Sunflower Oil-beeswax Oleogels

S. Pourabdollahy[1], A. Nasrollah zade[1*]
1- Department of Food Science and Technology, La.C., Islamic Azad University, Lahijan, Iran
(*- Corresponding Author Email: azinnasr@iau.ac.ir)

Received: 29.04.2026
Revised: 02.09.2026
Accepted: 16.09.2026
Available Online: 16.09.2026

How to cite this article:
Pourabdollahy, S., & Nasrollah zade, A., (2027). Comparison of rheological and physicochemical properties of palm oil and sunflower oil-beeswax oleogels. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, *22*(6), 599-619. (In Persian). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.98485.1569

Introduction

The increasing incidence of non-communicable diseases, particularly cardiovascular disorders, diabetes, and metabolic syndrome has intensified efforts to reduce the consumption of saturated fatty acids (SFAs) and trans fatty acids (TFAs) which are predominantly supplied through industrially processed fats such as partially hydrogenated oils and palm oil. Although palm oil remains one of the most widely used solid fats in food formulations, largely owing to its functional and technological advantages, concerns regarding its nutritional quality have encouraged the development of healthier alternatives. In this context, oleogel technology has emerged as a promising approach for structuring liquid oils into semi-solid systems while maintaining desirable physicochemical and sensory attributes.

Oleogels are formed through the immobilization of liquid oil within a three-dimensional crystalline network generated by gelator compounds. Among naturally derived gelators, beeswax has attracted considerable attention because of its excellent oil-structuring ability, food compatibility, and potential to generate stable gel matrices. Therefore, the objective of the present study was to formulate beeswax-based sunflower oil oleogels at different gelator concentrations and to evaluate their potential as healthier substitutes for palm oil based on comprehensive physicochemical and rheological characterization.

Materials and Methods

Sunflower oil was obtained from Giyahkala Co. (Sabzehvar, Iran), palm oil was supplied by Farsanchemecal Co. (Isfahan, Iran), and yellow granular beeswax was purchased from Moomila Co. (Tehran, Iran). Oleogels were prepared by dispersing beeswax in sunflower oil at concentrations of 4%, 7%, and 10% (w/w). The mixtures were heated at 80°C under continuous stirring until complete dissolution of the wax phase and subsequently allowed to stabilize at 23-25°C for 24 h to promote gel formation. The resulting systems were characterized and compared with palm oil using a completely randomized experimental design. Physicochemical analyses included fatty acid composition, peroxide value, oil-binding capacity, texture profile, and color measurements were performed. Rheological properties were investigated through strain sweep, frequency sweep, and temperature sweep analyses to assess structural integrity and viscoelastic performance. Statistical analyses were conducted using SPSS (Version 26), and significant differences among samples were determined by analysis of variance (ANOVA) at $p < 0.05$.

Results and Discussion

The results demonstrated that beeswax concentration significantly affected the structural and functional properties of the oleogels. Increasing beeswax content promoted network formation and improved the stability of

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).
https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.98485.1569

the structured lipid systems. The oleogel formulated with 10% beeswax showed color parameters closest to those of palm oil, supporting its potential as a direct replacement in food formulations.

Fatty acid analysis showed that all oleogels had more favorable lipid profile than palm oil. Unsaturated fatty acids content increased by 25%, while saturated and trans fatty acids content decreased by 67.5% and 70%, respectively ($p < 0.05$). This shift reflects the considerable nutritional advantage of structured sunflower oil systems.

Oil-binding capacity increased with gelator concentration, and the 7% and 10% formulations reached oil-retention levels comparable to palm oil, consistent with the formation of a denser crystalline wax network capable of immobilizing a larger oil fraction. Higher beeswax levels also improved peroxide value and increased mechanical strength. Oleogel hardness remained lower than that of palm oil; however, this may be advantageous in applications where reduced firmness is desirable without compromising structural integrity.

Rheological measurements confirmed the formation of viscoelastic gel networks in all formulations, with storage modulus (G′) exceeding loss modulus (G″) across the tested frequency range, indicating solid-like, gel-dominated behavior. The 7% and 10% formulations exhibited higher gel strength and greater resistance to deformation. The 10% oleogel formed the most densely interconnected network, yielding the highest elasticity, structural coherence, and thermal stability during temperature-sweep analysis.

Conclusion

The 10% beeswax formulation provided the best overall balance of nutritional quality, structural functionality and physicochemical stability. This oleogel reduced unhealthy fatty acids content while matching the rheological and technological performance of palm oil, supporting its use as an effective, sustainable palm oil alternative in food product development.

Keywords: Fat replacer, Structured oil, Structural properties, Trans

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
https://ifstrj.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۲۲، شماره ٦، بهمن–اسفند ١٤٠٥، ص. ٦١٩–٥٩٩

مقایسه ویژگی‌های رئولوژیکی و فیزیکوشیمیایی روغن پالم و اولئوژل حاصل از روغن آفتابگردان و موم زنبورعسل

سمیه پورعبداللهی[۱]– آذین نصرالله زاده[۱*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۵

چکیده

افزایش بیماری‌های غیرواگیر از جمله بیماری‌های قلبی، دیابت و غیره ارتباط مستقیمی با مصرف بالای اسیدهای چرب اشباع و ترانس دارد که عمدتا به واسطه‌ی روغن‌های نیمه‌هیدروژنه و روغن پالم وارد فرآورده‌های غذایی می‌شوند. در این راستا، توسعه روغن‌های ساختاریافته نظیر اولئوژل‌ها به‌عنوان جایگزین‌های سالم چربی مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، تولید، ارزیابی و مقایسه اولئوژل‌های مبتنی بر روغن آفتابگردان و موم زنبورعسل از نظر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و رئولوژیکی با روغن پالم بود. بدین‌منظور، اولئوژل موم زنبورعسل در سه سطح ۴، ۷ و ۱۰ درصد (w/w) تهیه و در قالب طرح کاملا تصادفی از نظر پروفایل اسیدهای چرب، شاخص پراکسید، ظرفیت نگهداری روغن، شاخص‌های رنگی، بافتی و رئولوژیکی (روبش کرنش، فرکانس و دما) مقایسه شدند. نتایج نشان داد ظرفیت نگهداری روغن در نمونه‌های ۷ و ۱۰ درصد به‌طور معنی‌داری بالاتر از نمونه ۴ درصد بوده و عملکردی مشابه روغن پالم داشتند. همچنین با افزایش غلظت موم، شاخص پراکسید کاهش و سختی و مدول الاستیک افزایش یافت ($p< ۰/۰۵$). تمامی اولئوژل‌ها رفتار ژل‌گونه داشتند، با این حال اولئوژل ۱۰ درصد شبکه ژلی پایدارتر و در روبش دما نیز رفتار مقاوم‌تری در برابر دما نشان داد. از نظر فاکتورهای رنگ نیز نمونه ۱۰ درصد بیشترین و اولئوژل ۴ درصد کمترین شباهت را به روغن پالم داشت. هر سه اولئوژل نسبت به روغن پالم، کاهش معنی‌داری در اسیدهای چرب اشباع (از ۳۲/۷۵ درصد به محدوده ۱۰/۴۵ تا ۱۰/۸۷ درصد) و اسیدهای چرب ترانس (از ۱/۷۶ درصد به محدوده ۰/۴۸ تا ۰/۵۴ درصد) و افزایش چشمگیری در اسیدهای چرب غیراشباع (از ۶۴/۰۳ درصد به محدوده ۸۸/۱۰ تا ۸۸/۶۳ درصد) نشان دادند. در نهایت، اولئوژل ۱۰ درصد موم زنبورعسل و روغن آفتابگردان در مقایسه با روغن پالم، توازن بهینه‌ای از نظر خواص فیزیکوشیمیایی و رئولوژیکی ارائه داد و می‌تواند به‌عنوان جایگزینی کارآمد در فرمولاسیون محصولات غذایی پیشنهاد شود.

واژه‌های کلیدی: ترانس، جایگزین چربی، روغن ساختاریافته، ویژگی بافتی

مقدمه

چربی‌ها و روغن‌ها مواد مغذی ضروری در رژیم غذایی ما و عمدتاً مسئول ویژگی‌های خاص مانند ساختار، بافت، پایداری هوادهی، تردی، طعم، عطر، سیری و پایداری اکسیداتیو مورد نیاز هر فرآورده هستند (López-Pedrouso, Lorenzo, Gullón, Campagnol, & Franco, 2021; Silva, Ferdaus, Foguel, & da Silva, 2023). روغن‌ها و چربی‌ها حاوی اسیدهای چرب مختلف اشباع‌شده، تک غیراشباع، چند غیراشباع، و همچنین چندین ترکیب جزئی دیگر می‌باشند (Pușcaș, Mureșan, Socaciu, & Muste, 2020; Tan *et al.*, 2023). مطالعات اخیر نشان داده است که مصرف غذاهای با سطح بالایی از چربی‌های ترانس و اشباع که در بسیاری از محصولات تجاری نظیر شیرینی‌ها، محصولات نانوایی، فرآورده‌های لبنی و گوشتی

۱– گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران
(*– نویسنده مسئول: Email: azinnasr@iau.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.98485.1569

وجود دارند با افزایش شیوع بیماری‌های قلبی و سایر اختلالات فیزیولوژیکی مانند دیابت نوع ۲، چربی خون بالا، التهاب، استرس اکسیداتیو، اختلال عملکرد اندوتلیال، وزن بالای بدن و سندرم متابولیک در کنار سایر پیامدهای مضر برای سلامتی، مرتبط است (López-Pedrouso *et al.*, 2021). سازمان بهداشت جهانی توصیه می‌کند سرانه دریافت چربی کل، اشباع و ترانس به‌ترتیب حداکثر ۳۰، ۱۰ و ۱ درصد از کل انرژی دریافتی باشد (Puşcaş *et al.*, 2020) و مطالعات نشان داده کاهش تنها ۵ درصد از چربی‌های اشباع در برنامه غذایی روزانه، می‌تواند خطر بیماری‌های قلبی و عروقی را ۲۲ تا ۳۷ درصد کاهش دهد (Kumar, Kumar, & Sharma, 2025). اما با این وجود، دستورالعمل تولید بیشتر محصولات غذایی صنعتی، به‌دلیل نقش مهم چربی در کیفیت حسی و تکنولوژیکی فرآورده‌های غذایی، نیاز به استفاده از چربی‌های نیمه‌جامد با درصد اسیدهای چرب اشباع بالا دارد (Abdolmaleki *et al.*, 2022; Malvano, Albanese, Cinquanta, Liparoti, & Marra, 2024). در صنایع غذایی به‌ویژه در صنعت شیرینی‌پزی، برای جایگزینی اسیدهای چرب ترانس با چربی‌های طبیعی به‌طور گسترده از روغن پالم استفاده می‌شود (Homolya *et al.*, 2024). این روغن به‌دلیل قیمت کمتر، پایداری اکسیداتیو بالا و ماندگاری طولانی در صنایع غذایی متداول است. حال آنکه براساس گزارشات، مصرف اسید پالمتیک خطر بیماری‌های قلبی-عروقی را افزایش می‌دهد. بنابراین براساس یافته‌های تغذیه‌ای، برای دستیابی به توسعه پایدار و تغذیه سالم استفاده از روغن پالم در صنایع غذایی باید کاسته شود و مطلوب است که آن را با چربی‌های سالم‌تر و پایدارتری جایگزین نمود که در دمای اتاق جامد یا نیمه‌جامد باشند و بدون چربی‌های ترانس، ماندگاری طولانی‌تری داشته باشند (Anushree, André, Guillaume, & Frédéric, 2017; Homolya *et al.*, 2024).

جایگزینی مستقیم چربی‌های اشباع با چربی‌های غیراشباع می‌تواند مشکلاتی را از نظر تکنولوژی مانند تغییرات نامطلوب در خواص مکانیکی و رئولوژیکی ایجاد کند (Malvano *et al.*, 2024). در سال‌های اخیر روش ارگانوژلاسیون برای ساختاردهی به روغن‌های مایع و تغییر ویژگی‌های فیزیکی روغن مورد توجه قرار گرفته است (Nasirzadeh Dizaji, Roufegarinejad, Tabibiazar, & Alizadeh, 2022). این فرآیند اجازه می‌دهد تا روغن‌های مایع عملکرد چربی‌های سنتی مانند شورتنینگ را در عین حفظ پروفایل اسید چرب سالم‌تر، تقلید کنند (Kumar *et al.*, 2025). ارگانوژل‌ها اغلب در صنایع غذایی به‌عنوان «اولئوژل» شناخته می‌شوند و ترکیب اصلی آنها شامل روغن‌های گیاهی مانند ذرت، سویا، آفتابگردان و ... است که مقادیر کمی از ژل‌کننده‌ها نظیر پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها (Gengatharan, Mohamad, Zahari, & Vijayakumar, 2023)، مونو و دی‌گلیسریدها، فیتواسترول، الکل استر اسید چرب، فسفولیپید، موم‌های گیاهی و اتیل سلولز به آنها افزوده شده است (Kumar *et al.*, 2025). اولئوژلاتورهای مورد استفاده برای تهیه روغن‌های ساختاریافته، از طریق پیوندهای الکترواستاتیکی، واندروالسی و هیدروژنی می‌توانند ساختار سه‌بعدی خاصی در روغن‌ها به‌وجود آورند که باعث می‌شود روغن به حالت نیمه‌جامد تبدیل شده و علی‌رغم افزایش نقطه ذوب و بهبود خصوصیات فیزیکی، فاقد اسید چرب ترانس باشد (Nasirzadeh Dizaji *et al.*, 2022). روغن آفتابگردان پس از روغن سویا در جایگاه دوم تولید روغن خوراکی جهان است و به‌دلیل ارزش غذایی آن در میان سایر روغن‌های نباتی در رژیم غذایی برجسته شده است (Khan, Choudhary, Pandey, Khan, & Thomas, 2015). این روغن با نسبت بالای اسیدهای چرب چند غیراشباع امگا ۶، نسبت ناچیز اسیدهای چرب چند غیراشباع امگا ۳ و همچنین مقدار کمی از اسیدهای چرب اشباع (Fayaz, Calligaris, & Nicoli, 2020; Nakonechna *et al.*, 2024)، منبع مهم و قابل‌توجه ویتامین E و آنتی‌اکسیدان‌ها (Franco, Iseppi, & Taverna, 2018)، با اثر کاهندگی در لیپوپروتئین‌های کم‌چگال و افزایش لیپوپروتئین‌های با چگالی بالا در برنامه غذایی توصیه می‌شود (Fayaz *et al.*, 2020; Nakonechna *et al.*, 2024). موم زنبورعسل نیز به‌دلیل خواص بافتی مطلوب، پایداری اکسیداتیو بالا، رفتار حرارتی مناسب و توانایی تبلور، تشکیل شبکه سه‌بعدی و به‌دام اندازی بالای روغن مایع، یکی از مؤثرترین موم‌های خوراکی برای تولید اولئوژل محسوب می‌شود (Nasrollahzadeh *et al.*, 2024). ساختار کریستالی این موم وابسته به زمان نگهداری بوده و افزایش تبلور در طول نگهداری منجر به افزایش سفتی و خاصیت ارتجاعی آن می‌شود (Bogdanov, 2016). البته مورفولوژی کریستال‌های تشکیل‌شده به نوع روغن وابسته است (Soleimanian, Goli, Varshosaz, & Maestrelli, 2018). نتایج پژوهش‌های پیشین در رابطه با توسعه و شناسایی اولئوژل‌های مبتنی بر روغن بادام زمینی برای جایگزینی چربی‌های اشباع در فرمولاسیون کوکی‌ها نشان داد که اولئوژل روغن بادام زمینی با موم زنبورعسل در مقایسه با اولئوژل حاوی موم سبوس برنج ویژگی‌های بهتری دارد و مشخصات اسیدهای چرب، خواص حرارتی و ساختار کریستالی اولئوژل ۱۲ درصد موم زنبورعسل از نظر تغذیه‌ای برتر از شورتنینگ تجاری بود و می‌تواند به‌طور موثر جایگزین ۲۵ درصد شورتنینگ تجاری در کوکی‌ها شود (Kumar *et al.*, 2025). همچنین هوملیا و همکاران (Homolya *et al.*, 2024)، در پژوهشی با مقایسه روغن پالم و اولئوژل حاوی موم زنبورعسل، مونوگلیسرید و روغن آفتابگردان (حاوی اولئیک بالا) گزارش دادند اولئوژل حاوی ۱۵ درصد موم و ۵ درصد مونوگلیسرید، سختی، مدول ذخیره و ویسکوزیته بالایی نشان داده و حتی می‌تواند جایگزین مناسبی برای روغن پالم در شکلات‌سازی شود

(Homolya *et al.*, 2024). یکی از نقاط برجسته در پژوهش حاضر، طراحی و توسعه اولئوژل‌ها با بهره‌گیری از روغن آفتابگردان (به‌عنوان یک روغن در دسترس، مقرون‌به‌صرفه و اسیدهای چرب غیراشباع و آنتی اکسیدان‌های ارزشمند) و موم زنبورعسل (به‌عنوان یک ساختاردهنده طبیعی، زیست‌تخریب‌پذیر و بومی) می‌باشد. با توجه به اینکه علی‌رغم شواهد علمی متعدد مبنی بر اثرات نامطلوب روغن پالم بر سلامت (نظیر افزایش اسیدهای چرب اشباع و ترانس)، این روغن همچنان کاربرد گسترده‌ای در صنایع پخت دارد، نوآوری این مطالعه در مقایسه مستقیم و جامع ویژگی‌های رئولوژیکی، مکانیکی و فیزیکوشیمیایی روغن پالم تجاری با اولئوژل‌های حاصل از روغن آفتابگردان ساختاریافته با موم زنبورعسل است. این رویکرد تطبیقی، نه‌تنها امکان ارزیابی دقیق قابلیت جایگزینی روغن پالم را فراهم می‌آورد، بلکه مسیری عملی برای تولید محصولات کم‌چرب و فاقد اسیدهای چرب ترانس با تکیه بر منابع طبیعی و پایدار ارائه می‌دهد که از جنبه‌های نوآورانه و کاربردی این تحقیق محسوب می‌شود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، روغن خالص آفتابگردان از شرکت گیاه کالا (سبزوار، ایران)، روغن پالم از شرکت فرسان شیمی (اصفهان، ایران) و موم زنبورعسل به‌صورت گرانول زرد رنگ از شرکت مومیلا (تهران، ایران) تهیه شدند.

آماده‌سازی اولئوژل موم زنبورعسل

برای آماده‌سازی اولئوژل‌ها با غلظت‌های مختلف مطابق جدول ۱، ابتدا مقدار مورد نیاز موم زنبورعسل با استفاده از ترازوی دیجیتال (مدل Sartorius ۱۲۰۰) توزین و در یک بشر شیشه‌ای ۶۰۰ml حاوی روغن آفتابگردان با نسبت‌های از پیش تعیین شده قرار داده شد. سپس بشر حاوی روغن و موم زنبورعسل روی یک صفحه همزن مغناطیسی (N.I.A. Scientifica، ایتالیا) به‌مدت ۳۰ دقیقه با سرعت کم همزده و تا دمای ۸۰°C (روغن آفتابگردان و موم زنبورعسل با نقطه ذوب ۶۵–۶۲ درجه سانتی‌گراد) تا رسیدن به انحلال و شفافیت کامل حرارت داده شد (Abdolmaleki *et al.*, 2022; Homolya *et al.*, 2024). در پایان نمونه‌های تهیه شده در ظروف مخصوص مطابق شکل تخلیه گردید و به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط آزمایشگاه (۲۵–۲۳ درجه سانتی‌گراد) و بدون ایجاد هرگونه جابه‌جایی قرار داده شدند تا ساختار پایدار اولئوژل شکل گیرد (Ghalamkari & Abbasi, 2022).

جدول ۱- غلظت‌های روغن پالم، روغن آفتابگردان و موم زنبورعسل
Table 1- Concentrations of palm oil, sunflower oil and beeswax

کد نمونه Sample Code	فرمولاسیون Formulation (percent)		
	اولئوژل Oleogel		روغن پالم Palm oil
	روغن آفتابگردان Sunflower oil	موم زنبورعسل Beeswax	
T1(control)	0	0	100
T2	96	4	0
T3	93	7	0
T4	90	10	0

(T1 (control)= روغن پالم، T2= اولئوژل ۴ درصد، T3= اولئوژل ۷ درصد، T4= اولئوژل ۱۰ درصد)
(T1= Palm oil (control), T2= oleogel 4%, T3= oleogel 7%, T4= oleogel 10%)



شکل ۱- نمونه‌های آماده‌سازی شده
Fig. 1. Prepared samples

آزمون‌های فیزیکوشیمیایی

ظرفیت به‌دام‌اندازی روغن (OBC[1])

ابتدا حدود ۱ ml از اولئوژل ذوب شده در لوله اپندورف با وزن (a) پر شد و به‌مدت ۱ ساعت در یخچال نگه داشته شد، لوله‌های حاوی اولئوژل نیز توزین گردید (b)، سپس لوله‌ها به‌مدت ۱۵ دقیقه با دور ۱۵۰۰۰ rpm در دمای محیط آزمایشگاه (۲۳–۲۵ درجه سانتی‌گراد) سانتریفیوژ شدند (دستگاه میکروسانتریفیوژ مدل M.L۲۴، پارس آزما ایران)، بعد از آن لوله‌های سانتریفیوژ شده روی کاغذ فیلتر واژگون و به‌مدت ۳ دقیقه به همین حالت قرار گرفتند تا همه‌ی روغن مایع اضافی خارج شود و دوباره توزین گردیدند (c). ظرفیت به‌دام اندازی روغن از طریق فرمول‌های ۱ و ۲ محاسبه شد (Abdolmaleki, Alizadeh, Sheikhi, & Nayebzadeh, 2022)؛

$$OBC\ (\%) = 100 - Released\ oil\ (\%) \quad (۱)$$

$$\text{released oil } (\%) = [\,(b-a) - (c-a)\,] / (b-a) \times 100 \quad (۲)$$

شاخص پراکسید

عدد پراکسید نمونه‌های روغن پالم و اولئوژل‌ها براساس استاندارد مرجع AOCS Cd 8b-90 تعیین گردید (AOCS, 2017). بدین‌منظور، ابتدا مقدار دقیق ۰/۰۱ ± ۵ گرم از نمونه در یک ارلن ۲۵۰ میلی‌لیتری توزین شد و جهت حصول اطمینان از یکنواختی نمونه‌برداری برای اولئوژل‌ها، نمونه‌ها در محیطی بسته و تحت دمای ملایم (حداکثر ۴۵ درجه سانتی‌گراد) ذوب شدند تا از بروز اکسیداسیون حرارتی جلوگیری به عمل آید. سپس نمونه در ۳۰ میلی‌لیتر حلال ترکیبی شامل اسید استیک گلاسیال و ایزواکتان (با نسبت حجمی ۳ به ۲) کاملاً حل شد. پس از آن، ۰/۵ میلی‌لیتر محلول اشباع یدید پتاسیم (KI) تازه تهیه شده به ارلن افزوده شد و ظرف به‌مدت دقیق ۶۰ ثانیه به شدت تکان داده شد تا واکنش کامل صورت پذیرد. پس از اینکه به‌مدت ۵ دقیقه در تاریکی قرار گرفت، ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر به مخلوط اضافه گردید. ید آزاد شده با استفاده از محلول استاندارد تیوسولفات سدیم ۰/۰۱ نرمال تیتر شد. در نزدیکی نقطه پایانی تیتراسیون، هنگامی که رنگ زرد محلول به رنگ کاهی کم‌رنگ تبدیل شد، از ۰/۵ میلی‌لیتر معرف نشاسته (۱ درصد وزنی/حجمی) به‌عنوان شناساگر استفاده گردید. تیتراسیون تا زمان ناپدید شدن کامل رنگ آبی ادامه یافت. به‌منظور اصلاح خطاهای احتمالی ناشی از ناخالصی حلال‌ها، آزمایش بلانک (بدون نمونه روغن) نیز همزمان انجام شد. در نهایت، عدد پراکسید برحسب میلی‌اکی‌والان اکسیژن در کیلوگرم روغن با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه گردید:

$$\text{شاخص پراکسید} = \frac{(S-B)\times N\times 1000}{W} \quad (۳)$$

S= حجم تیوسولفات سدیم مصرفی برای نمونه (ml)،

B= حجم تیوسولفات مصرفی برای بلانک (ml)،

N = نرمالیته محلول تیوسولفات سدیم،

W= وزن نمونه (gr)

اندازه‌گیری ترکیب اسیدهای چرب

برای هر یک از نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC B14 Shimadzu، ژاپن، مدل B۱۴ مجهز به آشکارساز FID و ستون مویینه BPX۷۰ به‌طول ۶۰m، قطر ۰/۲۵ mm و ضخامت داخلی ۰/۲۵µm) مقادیر اسیدهای چرب کل، اسیدهای چرب ترانس و محتوای چربی‌های اشباع، تک و چندغیراشباع مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (Kumar *et al.*, 2025). آماده‌سازی متیل‌استرهای اسیدهای چرب طبق روش ترانس متیلاسیون "سریع" در شرایط قلیایی و آنالیز پروفایل اسیدچرب تیمارها به‌ترتیب مطابق با استاندارد ملی ایران به شماره ۲–۱۳۱۲۶ و ۴–۱۳۱۲۶ انجام شد (INSO, 2016, 2022). تزریق با نسبت (۱:۳۰) انجام و هلیم به‌عنوان گاز حامل استفاده گردید. مقدار تزریق نمونه ۱ میکرولیتر و دمای آون ۱۷۵°C و دمای تزریق‌کننده و آشکارساز به‌ترتیب ۲۵۰°C و ۲۸۰°C بود.

رنگ‌سنجی

پارامترهای L^* شاخص روشنایی، a^* شاخص نزدیکی رنگ نمونه به قرمز و سبز و b^* شاخص نزدیکی رنگ نمونه به آبی و زرد و c^* شدت رنگ با استفاده از یک دستگاه رنگ‌سنج (NR۶۰CP Colorimeter ۳nh، چین) تعیین شد. حدود ۵ گرم از نمونه‌ها در دمای اتاق بر روی پلیت شفاف قرار گرفته و توسط دستگاه پارامترهای رنگی اندازه‌گیری شد (Aliasl khiabani, Tabibazar, Roufegarinejad, Hamishekar, & Alizadeh, 2020) و اختلاف رنگ کل اولئوژل‌ها در مقایسه با نمونه مرجع (روغن پالم)، طبق معادله ۴ محاسبه شد:

$$\Delta E = \sqrt{(L^*_1 - L^*_0)^2 + (a^*_1 - a^*_0)^2 + (b^*_1 - b^*_0)^2} \quad (۴)$$

که در آن L^*، a^* و b^* پارامترهای رنگ نمونه مقایسه‌ای (اولئوژل‌های ۴، ۷ و ۱۰ درصد) و L^*_1، a^*_1 و b^*_1 پارامترهای رنگ نمونه کنترل (روغن پالم) هستند (Szymanska, Zbikowska, & Onacik-Gür, 2024).

1- Oil Binding Capacity

ارزیابی بافت

برای ارزیابی سفتی، از دستگاه بافت‌سنج (مدل ۳CT-۱۵۰۰ Brookfield، آمریکا) استفاده شد. به‌طوری‌که حدود ۲ ± ۲۰ gr نمونه اولئوژل در ظروف استوانه‌ای با ابعاد ۲۹× ۴۵ cm تهیه شد. سپس میزان نفوذ با استفاده از پروب استوانه‌ای به‌قطر ۲/۶ mm و سل با وزن ۱۰۰ نیوتون با سرعت ۲۵ $mm.min^{-1}$ و تا عمق ۵ mm اجرا شد (Ebrahimzadeh, Mazaheri Tehrani, & Ghasemi, 2024).

آزمون‌های رئولوژیکی

آزمون‌های رئولوژیکی شامل روبش کرنش، روبش فرکانس و روبش دما با استفاده از دستگاه رئومتر (Anton Paar MCR۳۰۱، اتریش) با هندسه صفحه موازی (۵۰mm) و فاصله ۱/۰ mm و دمای ثابت ۲۵ °C انجام شد. برای تنظیم دما از سیستم صفحه Peltier با حساسیت ۰/۰۱ مجهز به گردش آب استفاده شد. برای تعیین محدوده ویسکوالاستیک خطی (LVR[1])، در مقادیر فرکانس ثابت (۱ هرتز)، منحنی G′ (مدول ذخیره) و G″ (مدول افت) برحسب افزایش دامنه کرنش (۰/۰۱ تا ۱۰ درصد) ترسیم شد و بر اساس نتایج آن، کرنش ۰/۱ درصد برای آزمون روبش فرکانس و روبش دما انتخاب گردید. این کرنش به‌دلیل قرارگیری در محدوده‌ی ویسکوالاستیک خطی برای تمام تیمارها انتخاب شد. در این کرنش، ساختار شبکه‌ی ژل دست نخورده باقی می‌ماند و رفتار ماده مستقل از کرنش است، بنابراین می‌توان ویژگی‌های ساختاری نمونه‌ها را بدون تخریب شبکه مقایسه کرد. همچنین در آزمون‌های روبش فرکانس که در کرنش ثابت انجام می‌شوند، انتخاب کرنش ۰/۱ درصد به‌عنوان یک کرنش در ناحیه‌ی خطی، امکان مقایسه‌ی معتبر بین تیمارها را فراهم می‌کند. این آزمون همچنین برای تعیین تنش تسلیم و ارزیابی پایداری ساختار در برابر تغییر شکل‌های اعمال‌شده مورد استفاده قرار گرفت. آزمون روبش فرکانس در محدوده‌ی فرکانسی از ۰/۱ تا ۵۰ هرتز با کرنش ثابت ۰/۱ درصد انجام شد تا پایداری شبکه ارزیابی گردد. آزمون روبش دما نیز با افزایش دما از ۱۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ گرمایش ۱ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه، کرنش ثابت ۰/۱ درصد و فرکانس ۱ هرتز انجام شد تا دمای ذوب و مقاومت حرارتی نمونه‌ها ارزیابی شود (Abdolmaleki *et al.*, 2022). پارامترهای رئولوژیکی توسط نرم‌افزار (۴۰. ۳۲V۳ Anton Paar Rheoplus software /Rheoplus) تعیین شد.

تجزیه و تحلیل آماری

این پژوهش در قالب طرح کاملا تصادفی و در سه تکرار برای تیمارها شامل روغن پالم و اولئوژل‌ها بر پایه موم زنبورعسل با غلظت‌های ۴، ۷ و ۱۰ درصد در روغن آفتابگردان انجام شد. برای ارزیابی ابتدا تجزیه واریانس (ANOVA) انجام گرفت و سپس در صورت وجود اختلاف معنادار در داده‌ها، میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P\leq$۰/۰۵) مورد مقایسه قرار گرفتند. تجزیه‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۲۶ و رسم نمودارها با استفاده از Microsoft office LTSC ۲۰۲۱ و توسط برنامه Excel ۲۰۱۶ انجام شد.

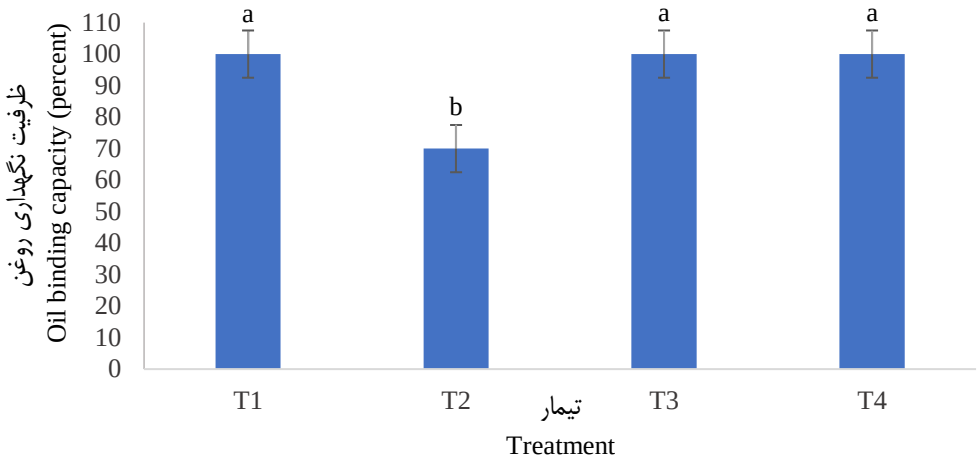
نتایج و بحث

ظرفیت به‌دام اندازی روغن

این مؤلفه که نشان‌دهنده میزان به‌دام انداختن روغن در شبکه سه‌بعدی توسط ژلاتور بوده با توجه به مقدار بالای روغن مایع در ساختار اولئوژل و توانایی بالای اولئوژل در نگهداری روغن در یک محصول تجاری پایدار، بسیار اهمیت دارد (Callau, Sow-Kébé, Nicolas-Morgantini, & Fameau, 2020). شکست در ساختار اولئوژل، منجر به نشت روغن به پیرامون و در نتیجه خرابی ماتریس مواد غذایی می‌شود (Blake, Toro-Vazquez, & Hwang, 2018). همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود نتایج حاکی از آن است که ظرفیت نگهداری روغن نمونه‌ها از لحاظ آماری باهم اختلاف معنی‌داری دارند ($p<$۰/۰۵) و با افزایش غلظت موم ظرفیت اتصال روغن، بهبود می‌یابد. به‌طوری‌که نمونه حاوی ۴ درصد موم زنبورعسل، کمترین ظرفیت نگهداری روغن (۷۰ درصد) را داشت در حالی‌که اولئوژل‌های حاوی ۷ و ۱۰ درصد موم زنبورعسل (۱۰۰ درصد)، با روغن پالم تفاوت معنی‌داری در میزان نگهداری روغن نداشتند ($p>$۰/۰۵). این ظرفیت بالاتر در اولئوژل‌های حاوی غلظت بالای موم زنبورعسل می‌تواند به‌دلیل کاهش میزان مهاجرت روغن با افزایش غلظت موم و تشکیل شبکه ژلی متراکم‌تر با تعداد بیشتر کریستال‌ها و نقاط اتصالی باشد که فضای آزاد برای حرکت روغن را کاهش داده و روغن را مؤثرتر در ماتریکس به‌دام می‌اندازد (Xiong, Han, Wu, Jia, & Cai, 2025). علاوه براین، موم با خاصیت امولسیون‌کنندگی و پایدارکنندگی، از طریق افزایش ویسکوزیته موجب کاهش تحرک قطرات روغن شده و با تسریع فرآیند کریستالیزاسیون به کاهش مهاجرت روغن در اولئوژل کمک می‌کند. از سوی دیگر، هنگامی‌که غلظت مناسب موم در روغن حل و سپس سرد می‌شود، منجر به پراکندگی یکنواخت و تثبیت میکروکریستال‌ها در فاز پیوسته شده که این امر ناشی از ویژگی ژل‌کنندگی و توانایی بالقوه موم

1- Linear viscoelastic region

در بهدام انداختن روغن درون شبکه سه‌بعدی می‌باشد (Ghalamkari & Abbasi, 2022). ظرفیت نگهداری روغن ارتباط مستقیمی با سختی، پایداری اکسیداتیو و رفتار رئولوژیکی اولئوژل دارد. تشکیل شبکه کریستالی متراکم‌تر که منجر به ظرفیت بهدام اندازی روغن بالاتری می‌شود، به‌طور طبیعی مقاومت مکانیکی (سختی) و مدول الاستیک (G´) را افزایش می‌دهد. همچنین این شبکه به‌عنوان سد فیزیکی در برابر نفوذ اکسیژن عمل کرده و با کاهش تماس روغن با عوامل اکسیدان، پایداری اکسیداتیو را بهبود می‌بخشد (Xiong *et al.*, 2025).



شکل ۲- نتایج ظرفیت نگهداری روغن تیمارها (T1= روغن پالم، T2= اولئوژل ٤ درصد، T3= اولئوژل ۷ درصد، T4= اولئوژل ۱۰ درصد)

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده‌ی وجود اختلاف معنی‌دار در بین تیمارهای مختلف می‌باشد (p< ۰/۰۵).

Fig. 2. Results of oil binding capacity of treatments (T1= Palm oil, T2= oleogel 4%, T3= oleogel 7%, T4= oleogel 10%)

Different superscripts in a column indicate significant difference (P<0.05).

نتایج ظرفیت به‌دام اندازی مشابه این پژوهش که به قدرت بالای موم زنبورعسل در کاهش مهاجرت روغن با تشکیل شبکه ژلی پایدار در ساختار اولئوژل مرتبط است با کمک روغن دانه انار[1] و موم پروپولیس (Fayaz *et al.*, 2017) و روغن هسته انگور[2] و مونوگلیسرید (Ghalamkari & Abbasi, 2022) در مطالعات پیشین گزارش شده است.

شاخص پراکسید

نتایج نشان داد شاخص پراکسید در اولئوژل‌های روغن آفتابگردان با موم زنبورعسل از روغن پالم کمتر است و با افزایش درصد موم نیز شاخص پراکسید در اولئوژل‌ها به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است (p<۰/۰۵). به‌طوری‌که بیشترین میزان شاخص پراکسید مربوط به روغن پالم (۰/۵۵ meqO2.kg^{-1} oil) و کمترین مربوط به تیمارهای T۳ و T۴ به‌ترتیب (۰/۴۵ meqO2.kg^{-1} oil و ۰/۴۴) می‌باشد (شکل ۳). با توجه به مقدار پراکسید اولیه روغن آفتابگردان و روغن پالم به‌ترتیب (۰/۱۴ meqO2.kg^{-1} oil و ۰/۱۵)، شرایط تهیه اولئوژل‌ها (حرارت‌دهی کوتاه‌مدت)، امکان وقوع اکسیداسیون قابل‌توجه در طی فرآیند تولید وجود نداشته و اختلاف عدد پراکسید بین تیمارها عمدتاً ناشی از ساختار شبکه‌ای و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی موجود در موم، روغن آفتابگردان و روغن پالم می‌باشد. بنابراین طبق پژوهش‌های گزارش شده، میزان اکسیداسیون اولیه بر اساس عدد پراکسید در اورگانوژل‌ها وابستگی زیادی به ماهیت ژلاتور، اسیدهای چرب غیراشباع موجود در روغن و به میزان ترکیبات آنتی‌اکسیدانی موجود در روغن دارد (Yılmaz & Öğütcü, 2015). به‌دلیل حضور مقادیر بالایی از کاروتنوئیدها، توکوفرول‌ها، فنول‌ها و توکوترینول‌ها با فعالیت آنتی‌اکسیدانی (Petraru, Ursachi, & Amariei, 2021) و همچنین وجود منابع غنی از فلاونوئیدها (کوئرستین، کامفرول) و فنولیک اسیدها (کلروژنیک اسید، گالیک اسید) در موم زنبورعسل (Mekky *et al.*, 2025)، قدرت آنتی‌اکسیدانی در اولئوژل‌ها بالا بوده و منجر به تعویق در اکسیداسیون و کاهش شاخص پراکسید اولئوژل‌ها در مقایسه با روغن پالم می‌شود (Radzievska & Melnyk, 2015). البته روغن پالم نیز به‌طور طبیعی حاوی ترکیبات آنتی‌اکسیدانی نظیر توکوفرول‌ها و توکوترینول‌ها (به‌ویژه-۷ توکوترینول) می‌باشد که اگرچه در مقایسه با روغن آفتابگردان چشمگیر نبوده اما تا حدی در برابر اکسیداسیون از آن

1- Pomegranate seed oil

2- Grape seed oil

محافظت می‌کنند (Gunstone, 2011). کاهش شاخص پراکسید در غلظت‌های بالاتر موم نشان‌دهنده‌ی تشکیل شبکه سه‌بعدی متراکم‌تری است که به‌عنوان سد فیزیکی در برابر نفوذ اکسیژن عمل کرده و تماس روغن با اکسیژن را کاهش می‌دهد. اگرچه روغن پالم به‌دلیل درصد بالاتر اسیدهای چرب اشباع، سختی اولیه بیشتری نسبت به اولئوژل‌ها دارد (جدول ۳)، اما پیوستگی[1] بالاتر اولئوژل ۱۰ درصد نشان‌دهنده‌ی یکپارچگی و انسجام درونی بیشتر شبکه کریستالی این تیمار است. این انسجام ساختاری، با ایجاد سد فیزیکی مؤثرتر در برابر نفوذ اکسیژن، نقش تعیین‌کننده‌تری در کاهش شاخص پراکسید ایفا می‌کند، چراکه صرفاً سختی بالا بدون پیوستگی کافی نمی‌تواند از اکسیداسیون جلوگیری نماید (Sobolev, Frolova, Sarkisyan, Makarenko, & Kochetkova, 2022). این شبکه قوی‌تر در آزمون‌های رئولوژیکی با افزایش مدول ذخیره (G′) و گستردگی بیشتر محدوده‌ی ویسکوالاستیک خطی در تیمار ۱۰ درصد موم مشاهده شد که با ایجاد فاز شبکه‌ای منسجم، علاوه بر افزایش استحکام ساختاری، از اکسیداسیون روغن نیز جلوگیری می‌کند. هم‌راستا با نتایج این پژوهش، محجوب و همکاران (Mahjoub, Hakimzadeh, Ataye Salehi, & Farmani, 2021) گزارش کردند بین سفتی ساختار اولئوژل و شاخص پراکسید همبستگی منفی وجود دارد، به‌طوری‌که شبکه‌های محکم‌تر، سد مؤثرتری در برابر اکسیژن و نور ایجاد کرده و اکسایش را به‌تأخیر می‌اندازند. همچنین اولئوژل‌های با شبکه بلوری قوی‌تر، ضمن حفظ ظرفیت نگهداری روغن بالاتر، کاهش اکسیداسیون اولیه بهتری از خود نشان می‌دهند که با یافته‌های پژوهش حاضر مبنی بر کاهش هم‌زمان شاخص پراکسید و افزایش سفتی در تیمار ۱۰ درصد موم مطابقت دارد. بنابراین کاهش شاخص پراکسید در تیمارهای حاوی ۱۰ درصد موم، هم‌زمان با افزایش سفتی و استحکام شبکه، بیانگر نقش دوگانه‌ی ساختار کریستالی موم در بهبود هم‌زمان خواص مکانیکی و مقاومت اکسیداسیونی است. مطالعات بر روی اولئوژل روغن گلرنگ با موم‌های زنبورعسل و سبوس برنج نیز نشان داد موم‌های مورد بررسی اندیس پراکسید کمتری نسبت به شورتینگ‌ها در دمای پخت داشتند (Badem & Baştürk, 2023).

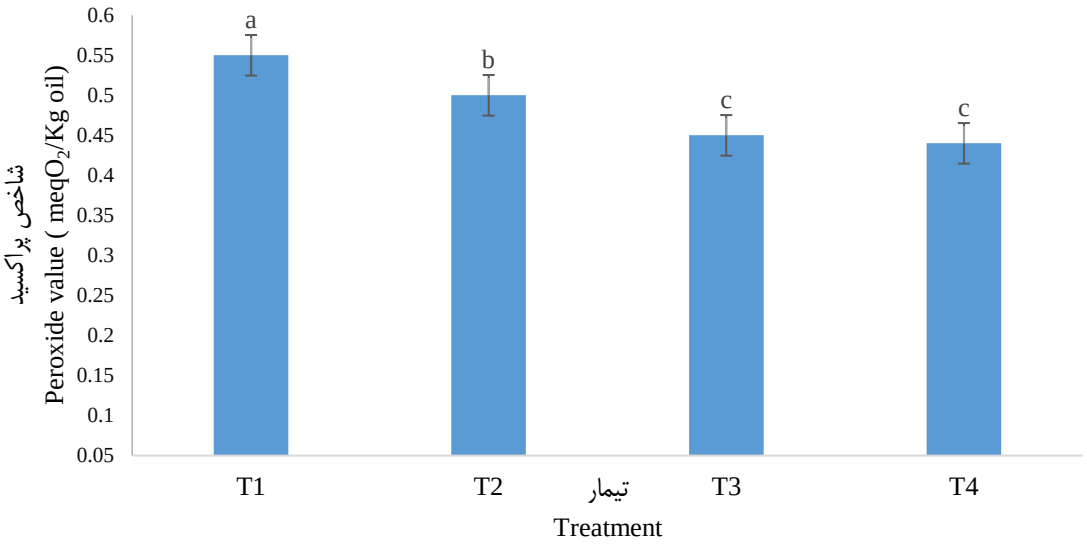
شاخص‌های رنگی

طبق یافته‌ها روغن پالم بیشترین میزان روشنایی L^* (۰/۹۲ ± ۶۸/۰۳) و اولئوژل حاوی ۴ درصد موم زنبورعسل کمترین میزان روشنایی (۱/۶۷ ± ۳۲/۱۶) را در بین نمونه‌ها داشتند و اولئوژل موم زنبورعسل با غلظت ۱۰ درصد در مقایسه با سایر اولئوژل‌ها از نظر میزان روشنایی بیشترین شباهت (۱/۱۴ ± ۵۳/۱۸=L^*) به روغن پالم را نشان داد (جدول ۲). مطالعات بر روی اولئوژل روغن کبدماهی و موم‌های کارنوبا و زنبورعسل با نتایج این پژوهش از نظر افزایش میزان روشنایی با افزایش درصد موم مطابقت داشت (Yılmaz & Öğütcü, 2015). نتایج شاخص قرمزی a^* و زردی b^* نیز نشان داد که بین نمونه‌ها با نمونه شاهد تفاوت معنی‌دار وجود دارد ($p<0/05$). به‌طوری‌که بیشترین میزان پارامتر a^* (۰/۱۴ ± ۲/۵۲) برای تیمار T۱ به‌دلیل رنگدانه‌های طبیعی موجود در روغن پالم (Imoisi, Ilori, Agho, & Ekhator, 2015) و کمترین مقدار (۰/۰۱ ± ۰/۰۷) برای تیمار T۴ گزارش شد. زردتر بودن اولئوژل ۱۰ درصد در مقایسه با سایر اولئوژل‌ها می‌تواند به‌دلیل رنگ زرد موم زنبورعسل باشد. با افزایش درصد موم شاخص زردی b^* افزایش یافت بنابراین زردی طبیعی موم بر روی شدت زردی اولئوژل تأثیر می‌گذارد. بیشترین میزان زردی مربوط به روغن پالم (۰/۱۸ ± ۶/۱۸) و اولئوژل ۱۰ درصد (۰/۱۰ ± ۶/۰۰) بود که با هم اختلاف معنی‌داری نداشتند ($p>0/05$) و کمترین زردی نیز در اولئوژل ۴ درصد (۰/۱۴ ± ۳/۴۹) گزارش شد. نتایج شدت رنگ نیز نشان داد که با افزایش موم زنبورعسل، شدت رنگ به‌طور معنی‌داری افزایش یافت ($p<0/05$). اما این افزایش کمتر از روغن پالم بود. یافته‌های مربوط به تغییرات رنگ هم بیانگر این بود که با افزایش مقدار موم زنبورعسل، تغییرات رنگ به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد ($p<0/05$). در مطالعات پیشین نتایج مشابه در رابطه با افزایش زردی و شدت روشنایی با افزایش غلظت موم زنبورعسل گزارش شده است (Cristiano, Froiio, Mancuso, & De Gaetano, 2020).

ویژگی‌های بافتی

سختی مهم‌ترین فاکتور بافت‌سنجی برای ارزیابی اولئوژل‌ها می‌باشد که به‌عنوان حداکثر نیروی لازم برای ایجاد تغییر دائمی در بافت تعریف می‌شود. براساس نتایج جدول ۳ سختی نمونه‌ها از لحاظ آماری باهم اختلاف معنی‌داری دارند ($p<0/05$). یافته‌ها نشان می‌دهد اگرچه سختی اولئوژل روغن آفتابگردان با افزایش غلظت موم زنبورعسل افزایش یافت اما همواره سختی آن کمتر از روغن پالم شده است. مطالعات اوگوتچو و همکاران (Öğütcü & Yılmaz, 2015) نشان داده است با افزایش درصد موم در اولئوژل‌ها، سختی افزایش یافته و اولئوژل‌های حاوی موم حتی در غلظت‌های بالاتر از ۳ درصد، یک رفتار شبه‌جامد پایدار از خود نشان می‌دهند. بنابراین سختی به وجود شبکه کریستالی متراکم‌تر و پیوندهای قوی‌تر بین بلورهای موم زنبورعسل نسبت داده شد.

1- Cohesiveness



شکل ۳- نتایج شاخص پراکسید تیمارها (T1= روغن پالم، T2= اولئوژل ٤ درصد، T3= اولئوژل ۷ درصد، T4= اولئوژل ۱۰ درصد)

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده‌ی وجود اختلاف معنی‌دار به‌ترتیب در بین تیمارها می‌باشد (p< ۰/۰۵).

Fig. 3. Peroxide value results of treatments (T1= Palm oil, T2= oleogel 4%, T3= oleogel 7%, T4= oleogel 10%)

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments (p < 0.05).

جدول ۲- نتایج مقایسه میانگین شاخص‌های رنگی روغن پالم با اولئوژل حاوی روغن آفتابگردان و موم زنبورعسل

Table 2- Mean comparison of color parameters results of palm oil with oleogels containing sunflower oil and beeswax

تیمار Treatment	a* قرمزی	b* زردی	L* روشنایی	c* شدت رنگ	ΔE تغییرات رنگ
T1	2.52 ± 0.14 A	6.18 ± 0.18 A	68.03 ± 0.92 A	6.63 ± 0.18 A	-
T2	0.42 ± 0.02 B	3.49 ± 0.14 C	32.16 ± 1.67 D	3.57 ± 0.13 D	36.01 ± 0.90 A
T3	0.20 ± 0.01 C	4.16 ± 0.12 B	47.67 ± 0.74 C	4.08 ± 0.04 C	20.58 ± 1.56 B
T4	0.07 ± 0.01 C	6.00 ± 0.10 A	53.18 ± 1.14 B	6.01 ± 0.16 B	15.05 ± 1.97 C

داده‌ها به‌صورت میانگین ± انحراف استاندارد گزارش شده‌اند. حروف غیرمشابه در یک ستون نشان‌دهنده‌ی وجود اختلاف معنی‌دار در بین تیمارهای مختلف می‌باشد (p< ۰/۰۵)

(T1= روغن پالم، T2= اولئوژل ۴ درصد، T3= اولئوژل ۷ درصد، T4= اولئوژل ۱۰ درصد)

Values are represented as mean ± standard deviation. Different superscripts in a column indicate significant difference (P<0.05).

(T1= Palm oil, T2= oleogel 4%, T3= oleogel 7%, T4= oleogel 10%)

همچنین اندازه‌گیری قابلیت ارتجاعی و پیوستگی در این مطالعه با هدف ارزیابی توانایی اولئوژل برای تقلید رفتار مکانیکی روغن پالم به‌عنوان یک چربی جامد نیمه‌طبیعی انجام گرفت (Öğütcü & Yılmaz, 2015). براساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌های قابلیت ارتجاعی و پیوستگی، با افزایش غلظت موم زنبورعسل، این دو پارامتر به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (p<۰/۰۵). افزایش سختی و استحکام اولئوژل همراه با افزایش غلظت ژلاتور ناشی از تجمع پیوندهای هیدوژنی در روغن (Ghalamkari & Abbasi, 2022) و افزایش نقاط اتصال در ساختار ژل می‌باشد، به‌علاوه در غلظت‌های بالای ژلاتور، افزایش تعداد بلورهای موم زنبورعسل منجر به تشکیل شبکه کریستالی مستحکم‌تر شده، در نتیجه ویسکوزیته افزایش و تحرک ترکیبات کاهش می‌یابد (Moradabbasi, Goli, & Fayaz, 2020; Sulaiman *et al.*, 2022). یافته‌های مشابهی نیز گزارش شده است که بیانگر افزایش سختی اولئوژل روغن کبد ماهی با افزایش غلظت موم کارنوبا و موم زنبورعسل می‌باشند (Yılmaz & Öğütcü, 2015). روغن پالم به‌دلیل محتوای بالای تری‌آسیل‌گلیسرول‌های جامد، دارای ساختاری با قابلیت ارتجاعی و پیوستگی مشخص است که آن را برای کاربرد در صنایع‌غذایی (به‌ویژه محصولات پخته‌شده، کرم‌ها و اسپردها) مناسب می‌کند. بنابراین، هر جایگزین بالقوه‌ای باید بتواند رفتار مکانیکی مشابهی ارائه دهد تا عملکرد محصول نهایی تحت‌تأثیر قرار نگیرد. نتایج این پژوهش نشان داد علی‌رغم اینکه روغن پالم به‌طور مشخصی سختی و قابلیت ارتجاعی بالاتری نسبت به اولئوژل‌های حاوی موم دارد ولی افزایش غلظت موم می‌تواند این فاصله را کاهش دهد یافته‌های مطالعه عبدالملکی و همکاران (Abdolmaleki *et al.*, 2022) نیز در رابطه با بررسی جایگزینی روغن پالم با اولئوژل موم

زنبورعسل نشان داد که اولئوژل موم ۱۰ درصد نزدیکترین ویژگی‌های رئولوژیکی و بافتی با روغن پالم را داشته است.

جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های بافتی روغن پالم با اولئوژل حاوی روغن آفتابگردان و موم زنبورعسل

Table 3- Mean comparison of textural properties results of palm oil with oleogels containing sunflower oil and beeswax

تیمارها Treatment	سختی Hardness(gr)	قابلیت ارتجاعی Springiness (mm)	پیوستگی Cohesiveness
T1	21.36±0.65 A	2.00±0.20 C	0.07±0.01 D
T2	6.36±0.45 D	0.11±0.23 C	0.43±0.03 C
T3	8.66±0.60 C	0.30±0.40 B	0.55±0.03 B
T4	16.40±0.70 B	1.20±0.80 A	0.62±0.03 A

داده‌ها به‌صورت میانگین ± انحراف استاندارد گزارش شده‌اند. حروف غیرمشابه در یک ستون نشان‌دهنده‌ی وجود اختلاف معنی‌دار در بین تیمارهای مختلف می‌باشد (p< ۰/۰۵)
(T1= روغن پالم، T2= اولئوژل ۴ درصد، T3= اولئوژل ۷ درصد، T4= اولئوژل ۱۰ درصد)

Values are represented as mean ± standard deviation. Different superscripts in a column indicate significant difference (P<0.05).
(T1= Palm oil, T2= oleogel 4%, T3= oleogel 7%, T4= oleogel 10%)

ترکیب اسیدهای چرب

ارزیابی پروفایل اسیدهای چرب روغن پالم و اولئوژل‌های مورد بررسی نشان می‌دهد در اولئوژل‌های روغن آفتابگردان مقدار اسیدهای چرب اشباع و اسید چرب ترانس بسیار کمتر از روغن پالم می‌باشد به‌طوری‌که متوسط اسیدهای چرب ترانس در اولئوژل‌ها (۰/۵۲ درصد) و در روغن پالم (۱/۷۶ درصد) بوده است. بنابراین، استفاده از اولئوژل‌ها منجر به کاهش تقریبا ۷۰ درصدی اسیدهای چرب ترانس نسبت به روغن پالم شد (جدول ۴). همچنین مقدار میانگین اسیدهای چرب اشباع در اولئوژل‌ها (محدوده ۱۰/۴۵ تا ۱۰/۸۷ درصد) به‌طور معنی‌داری کمتر از روغن پالم (۳۲/۷۵ درصد) بود که بیانگر کاهش حدود ۶۷/۵ درصدی این ترکیبات در اولئوژل‌ها نسبت به روغن پالم می‌باشد. از سوی دیگر، متوسط محتوای اسیدهای چرب غیراشباع در اولئوژل‌ها (۸۸/۳۷ درصد) و در روغن پالم (۶۴/۰۳ درصد) گزارش شد. بنابراین استفاده از اولئوژل می‌تواند منجر به افزایش ۲۵ درصدی اسیدهای چرب غیراشباع در مقایسه با روغن پالم شود. در بین اسیدهای چرب شاخص، مقدار اسید پالمتیک که با افزایش خطر ابتلا به بیماری‌های قلبی عروقی مرتبط است در روغن پالم (۲۵/۴ درصد) و مقدار متوسط آن در اولئوژل‌های مورد بررسی (۶/۰۷ درصد) اندازه‌گیری شد. همچنین محتوای اسید لینولئیک در اولئوژل‌ها (۶۵/۴۶ درصد) تقریبا دو برابر بیشتر از روغن پالم (۳۱/۱۵ درصد) بود (جدول ۴). بنابراین اولئوژل‌ها در مقایسه با روغن پالم از سطوح بالاتر اسیدهای چرب غیراشباع، مقدار کمتر اسیدهای چرب اشباع و ترانس برخوردار بوده که می‌توانند به‌عنوان جایگزین سالم‌تری در صنایع پخت استفاده شوند. نتایج این پژوهش مشابه با یافته‌های مطالعه‌ای در مورد تأثیر جایگزینی روغن پالم با اولئوژل موم زنبورعسل بر ویژگی‌های مارگارین بود. به‌طوری‌که جایگزینی روغن پالم و پالم اولئین هیدروژنه نسبی با اولئوژل موم زنبورعسل منجر به کاهش اسید چرب اشباع و ترانس در مارگارین به‌ترتیب به میزان ۲۸ درصد و ۸۰ درصد شد (Abdolmaleki *et al.*, 2022).

آزمون‌های رئولوژیک

روبش کرنش[1]

آزمون روبش کرنش با ارزیابی ویژگی‌های ویسکوالاستیک مواد غذایی، محدوده‌ای از کرنش که رفتار ماده در ناحیه خطی ویسکوالاستیک قرار گرفته را نشان می‌دهد و نقطه شروع تخریب شبکه (حد تسلیم[2]) شبکه خواهد بود (Szymanska *et al.*, 2024). برای تعیین انتهای محدوده ویسکوالاستیک خطی در آزمون روبش کرنش، کرنش اعمال شده به تدریج افزایش داده می‌شود و همزمان مدول ذخیره اندازه‌گیری می‌گردد. انتهای این محدوده زمانی تعیین می‌شود که مقدار G´ به میزان ۵ درصد نسبت به میانگین مقدار G´ در ناحیه پلاتوی اولیه (ناحیه مستقل از کرنش) کاهش یابد. این نقطه، نشان‌دهنده پایان رفتار خطی و شروع تخریب ساختار شبکه ژل است و کرنش متناظر با آن به‌عنوان حد تسلیم در نظر گرفته می‌شود.

1- Amplitude Sweep

2- Yield Strain

جدول ٤- نتایج میانگین ترکیب اسیدهای چرب روغن پالم و اولئوژل‌های حاوی روغن آفتابگردان و موم زنبورعسل

Fig. 4. Average Fatty acid composition results of palm oil and sunflower oil oleogels containing beeswax

تیمار Treatment	اسیدهای چرب Fatty acid (%)												نسبت اسیدهای چرب اشباع، غیراشباع و ترانس Ratio of Saturated, Unsaturated and Trans					
	اسید لوریک Lauric acid(12:0)	اسید میریستیک Myristic acid(14:0)	اسید پالمیتیک Palmitic acid(16:0)	اسید استئاریک Stearic acid(18:0)	اسید آرائشیدیک Arachidic acid(20:0)	اسید بهنیک Behenic acid(22:0)	اسید لیگنوسریک Lignoceric acid(24:0)	اسید پالمیتولئیک Palmitoleic acid(16:1)	اسید اولئیک Oleic acid(18:1)	اسید لینولئیک (Cis) Linoleic acid(18:2)	اسید لینولئیک (Cis) Linolenic acid(18:3)	اسید اروسیک Eicosenoic acid(22:1)	کل اسیدهای چرب اشباع Total SFAs	کل اسیدهای چرب غیراشباع Total USFAs	کل اسیدهای چرب ترانس Total TFAs	اسیدهای چرب غیراشباع به اشباع USFAs to SFAs	اسیدهای چرب اشباع روغن پالم به اولئوژلها SFAs Palm oil to Oleogels	اسیدهای چرب ترانس روغن پالم به اولئوژلها TFAs Palm oil to Oleogels
T1	0.14	0.43	25.4	6.24	0.44	0.1	-	0.13	30.17	31.15	2.58	-	32.75	64.03	1.76	1.95		
T2	-	0.04	6.00	3.37	0.34	0.52	0.18	-	22.90	65.61	0.12	-	10.45	88.63	0.48	8.48	3.13	3.67
T3	-	0.06	6.07	3.41	0.38	0.50	0.17	-	22.81	65.45	0.11	-	10.59	88.37	0.54	8.35	3.09	3.26
T4	-	0.13	6.16	3.63	0.39	0.47	0.09	-	22.78	65.31	0.01	-	10.87	88.10	0.54	8.10	3.01	3.26

T1= روغن پالم، T2= اولئوژل ۴ درصد، T3= اولئوژل ۷ درصد، T4= اولئوژل ۱۰ درصد، - : عدم وجود

T1= Palm oil, T2= oleogel 4%, T3= oleogel 7%, T4= oleogel 10% . - : absent

بیشتر بودن ناحیه ویسکوالاستیک خطی در اولئوژل‌ها به معنای پایداری بیشتر آنها در آزمون روبش کرنش بوده و ارزیابی این محدوده می‌تواند جهت تفکیک ژل‌های قوی از ضعیف استفاده گردد (Niknam, Ayaseh, & Ghanbarzadeh, 2018). مدول الاستیک G′ (مدول ذخیره)، مقدار انرژی بازیافت شده طی هر سیکل تغییر شکل را نشان می‌دهد بنابراین برای یک ماده کاملاً جامد، تمام انرژی در آن ذخیره گشته و با کرنش اعمال شده، هم‌فاز هستند. از طرف دیگر مدول ویسکوز G′′ (مدول افت) نیز نشان‌دهنده مقدار انرژی تلف شده به‌صورت گرما در اثر اصطکاک بین مولکول‌ها است و برای یک ماده کاملاً مایع که در آن تمام انرژی به‌صورت گرما تلف شده، مقدار مدول الاستیک صفر بوده و در نتیجه، بین تنش و کرنش اعمال شده ۹۰ درجه اختلاف فاز وجود خواهد داشت (Franco *et al.*, 2018). با افزایش کرنش، مقادیر G′ و G′′ نمونه‌ها وارد فاز غیرخطی ویسکوالاستیک می‌شوند. در نقطه‌ی تلاقی G′ و G′′، شبکه به‌طور کامل شکسته شده و رفتار مایع‌گونه (نقطه جریان) غالب می‌شود بنابراین کرنش در این نقطه، برابر حداکثر کرنشی است که نمونه می‌تواند پیش از شکست شبکه، تحمل کند. مقادیر G′ و G′′ در این نقطه بیانگر میزان قوت ویژگی‌های ویسکوالاستیک نمونه است (Ghalamkari & Abbasi, 2022). آزمون روبش کرنش نمونه‌ها برای تعیین محدوده‌ی ویسکوالاستیک خطی در مقادیر فرکانس ثابت (۱ هرتز)، منحنی G′ و G′′ برحسب افزایش دامنه کرنش از ۰/۰۱ تا ۱۰ درصد در نظر گرفته شد. نتایج در شکل ۴ نشان داد روغن پالم دارای محدوده ویسگوالاستیک خطی بسیار محدودی بوده و نقطه جریان (نقطه تلاقی مدول‌ها) آن در تنش (۰/۲۳ ± ۳/۸۷ Pa) رخ داد که نشان‌دهنده شکست کامل شبکه است. همانطور که در جدول ۵ گزارش شده است با افزایش غلظت موم، مدول ذخیره به‌طور چشمگیری افزایش یافت به‌گونه‌ای که مدول ذخیره اولئوژل ۱۰ درصد (۱/۰۹ ± ۸۴۵۰ Pa) نسبت به اولئوژل‌های ۷ درصد (۱/۰۲ ± ۲۵۶۰ Pa) و ۴ درصد (۰/۴۵ ± ۱۴۰ Pa) به‌ترتیب ۳ و ۶۰ برابر بیشتر بوده است که نشان می‌دهد افزایش غلظت موم موجب تشکیل شبکه بلوری متراکم‌تر و افزایش اتصالات میان بلورها در ساختار اولئوژل شده است. مقدار G″ نیز مشابه G′ افزایش یافته است. به‌عبارت دیگر، با افزایش غلظت موم، مدول ذخیره (G′) به‌عنوان شاخص استحکام ساختاری و مدول اتلاف (G″) به‌عنوان شاخص رفتار ویسکوز، هر دو افزایش یافتند که نشان‌دهنده‌ی تشکیل شبکه‌ای مستحکم‌تر با قابلیت جذب انرژی بیشتر است. در اولئوژل ۴ درصد، مدول ویسکوز (G″) اندکی بیشتر از مدول الاستیک (G′) بود که نشان‌دهنده‌ی نزدیک شدن رفتار ماده به نقطه‌ی گذار بین حالت جامد و مایع است. اولئوژل ۴ درصد با نقطه شکست شبکه (۰/۶۷ ± ۲/۱۳ Pa) کمترین مقدار را در بین تیمارهای اولئوژل داشت که نشان‌دهنده‌ی شبکه‌ی ضعیف‌تری است که در تنش پایین‌تری به طور کامل شکسته می‌شود. افزایش غلظت موم به ۷ و ۱۰ درصد، نقطه شکست شبکه را به‌ترتیب حدود ۱۵ و ۴۹ برابر نسبت به اولئوژل ۴ درصد افزایش داد. اولئوژل ۱۰ درصد با بیشترین نقطه جریان (۰/۴۱ ± ۱۰۵ Pa) نسبت به سایر اولئوژل‌ها از استحکام ساختاری بالایی برخوردار بود که بیانگر تشکیل شبکه‌ی ژلی پایدارتر است. همچنین نقطه جریان اولئوژل ۱۰ درصد حدود ۲۷ برابر بیشتر از روغن پالم (۰/۲۳ ± ۳/۸۷ Pa) بود که نشان‌دهنده‌ی مقاومت بالای ساختار این تیمار در برابر شکست مکانیکی است. از سوی دیگر، همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، محدوده ویسکوالاستیک خطی در اولئوژل ۱۰ درصد از سایر نمونه‌ها طولانی‌تر است. این محدوده طبق تعریف محدوده‌ای از کرنش است که در آن مدول ذخیره (G′) مستقل از کرنش بوده و ساختار ژل دست‌نخورده باقی می‌ماند (Liu, Lu, & Zhang, 2018). با افزایش کرنش، G′ کاهش یافته و در نهایت در نقطه تلاقی G′ و G″، شبکه ژل شکسته شده و رفتار مایع‌گونه غالب می‌شود. بنابراین در اولئوژل‌های با مدول الاستیک بالاتر، پایداری بیشتری در محدوده ویسکوالاستیک خطی نشان داده و این محدوده گسترده‌تر شده است. همچنین، در نمونه‌های با غلظت بالاتر موم، با ایجاد پیوندهای فیزیکی بیشتر، ذرات محکم‌تر به‌هم فشرده شده، مقدار شاخص الاستیسیته افزایش و سیالیت کاهش یافته و تشکیل قویترین شبکه ژلی با رفتار شبه‌جامد غالب در تیمار اولئوژل ۱۰ درصد دیده می‌شود. به علاوه خاصیت ارتجاعی نسبتا بالا (مدول ذخیره بالا)، شبکه کریستالی پایدارتر و متراکم‌تری دیده خواهد شد که منجر به تقویت مقاومت اولئوژل در برابر تغییر شکل می‌شود (Mahjoub *et al.*, 2021).

همچنین مطالعات بسیاری نشان داده‌اند هنگامی‌که ذرات کریستالی چربی جامد از یک حدی کمتر باشد، یک شبکه قوی تشکیل نشده و در نتیجه الاستیسیته کاهش می‌یابد (Abdolmaleki *et al.*, 2022; Blake, & Marangoni, 2015). تحقیقات پیرامون ویسکوزیته نشان می‌دهد هرچه حرکت مولکول‌ها کندتر شود ویسکوزیته اولئوژل بیشتر خواهد شد و از آنجایی‌که در اولئوژل‌ها، حرکت ذرات توسط شبکه سه‌بعدی ژلاتور کند می‌شود، بنابراین با افزایش غلظت موم زنبورعسل، نمونه بسیار متراکم‌تر خواهد شد (Cristiano *et al.*, 2020). در مطالعات پیشین همبستگی مثبتی بین مقادیر G′، سختی و غلظت موم‌ها (کاندلیلا، سبوس برنج، زنبورهای عسل زرد و کارنوبا) گزارش شده به‌طوری‌که با افزایش غلظت ژلاتورهای مومی، تجمع کریستال‌ها در اولئوژل‌ها بیشتر و شبکه متراکم‌تری تشکیل شد (Silva, Martins, Fasolin, & Vicente, 2021).

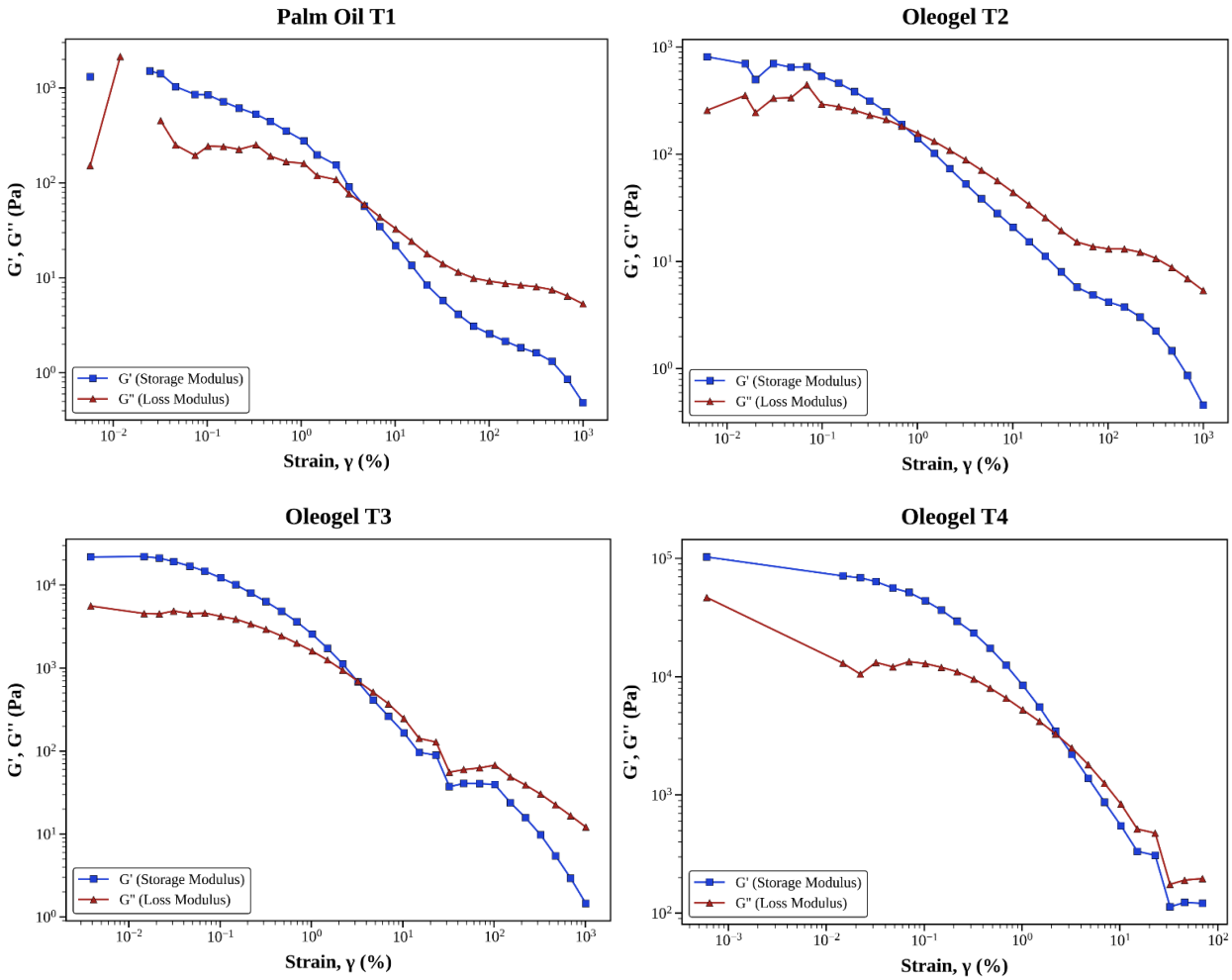
جدول ۵- پارامترهای روبش کرنش روغن پالم و اولئوژل‌های حاوی روغن آفتابگردان و موم زنبورعسل

Table 5- Strain sweep parameters of palm oil and oleogels containing sunflower oil and beeswax

تیمار Treatment	مدول ذخیره (G´) Storage modulus (Pa)	مدول افت (G˝) Loss modulus (Pa)	تانژانت افت tanδ	نقطه جریان Flow point (Pa)
T1	277 ± 0.76 C	160 ± 0.14 C	1.04 ±0.02 A	3.87 ± 0.23 C
T2	140 ± 0.45 D	157 ± 0.08 C	1.03 ±0.05 A	2.13 ± 0.67 C
T3	2560 ± 1.02 B	1600 ± 1.17 B	1.02 ± 0.03 A	31.4 ± 0.04B
T4	8450 ± 1.09 A	5250 ± 1.58 A	1.01 ± 0.02 A	105 ± 0.41A

داده‌ها به‌صورت میانگین ± انحراف استاندارد گزارش شده‌اند. حروف غیرمشابه در یک ستون نشان‌دهنده‌ی وجود اختلاف معنی‌دار در بین تیمارهای مختلف می‌باشد (p< ۰/۰۵).
مقادیر G′ و G″ در محدوده‌ی ویسکوالاستیک خطی (LVR) و در کرنش ۱ درصد گزارش شده‌اند.
(T1= روغن پالم، T2= اولئوژل ۴ درصد، T3= اولئوژل ۷ درصد، T4= اولئوژل ۱۰ درصد)

Values are represented as mean ± standard deviation. Different superscripts in a column indicate significant difference (P<0.05).
(T1= Palm oil, T2= oleogel 4%, T3= oleogel 7%, T4= oleogel 10%) .
The values of G′ and G″ were reported within the linear viscoelastic region (LVR) at 1% strain.



شکل ٤- مدول الاستیک (G´) و ویسکوز (G´´) اولئوژل‌های روغن آفتابگردان و روغن پالم با تغییر کرنش

(T1= روغن پالم، T2= اولئوژل ۴ درصد، T3= اولئوژل ۷ درصد، T4= اولئوژل ۱۰ درصد)

Fig. 4. Elastic (G´) and viscous (G´´) modulus of sunflower oleogels and palm oil
(T1= Palm oil, T2= oleogel 4%, T3= oleogel 7%, T4= oleogel 10%)

روبش فرکانس[1]

آزمون روبش فرکانس ارزیابی رفتار ویسکوالاستیک، پایداری شبکه و وابستگی آن به فرکانس اعمالی را مشخص می‌کند و کاهش شیب منحنی G′ با افزایش غلظت موم نشان‌دهنده‌ی کاهش وابستگی به فرکانس و تشکیل شبکه‌ی بلوری متراکم‌تر و پایدارتر در غلظت‌های بالاتر موم است به‌طوری‌که شیب نزدیک به صفر نشان‌دهنده‌ی شبکه‌ی پایدار با وابستگی کم به فرکانس است. همچنین نسبت G´´ به G´، تانژانت افت (tanδ) نامیده می‌شود. زمانی‌که تانژانت افت کمتر از ۱ باشد، رفتار الاستیک غالب است و چنانچه مقادیر تانژانت افت بالاتر از ۱ باشد حاکی از رفتار ویسکوز می‌باشد. در مقادیر تانژانت افت بین ۰/۱ و ۱، ژل واقعی بوده و ساختاری بین یک بیوپلیمر با غلظت بالا و ژل واقعی دارد (Niknam *et al.*, 2018). نتایج به‌دست آمده (در شرایط جابجایی فرکانس از ۰/۱ تا ۵۰ هرتز با کرنش ۰/۱ درصد و دمای ۲۵°C) در شکل ۵ نشان می‌دهد که مدول الاستیک از مدول ویسکوز بیشتر بوده که حاکی از رفتار جامدگونه است. براساس پارامترهای حاصل از آزمون روبش فرکانس که شامل مدول الاستیک (G′) و مدول ویسکوز (G″) و تانژانت افت بوده (جدول ۶)، بیشترین مقدار G´ مربوط به اولئوژل ۱۰ درصد (۰/۱۴ Pa ± ۵۵۲۳۲) و کمترین مقدار مربوط به اولئوژل ۴ درصد (۰/۰۷ Pa ± ۱۰۰۹) بود. این افزایش نشان می‌دهد که با افزایش غلظت موم، ساختار از یک شبکه نسبتاً ضعیف به یک شبکه سه‌بعدی متراکم و مقاوم تبدیل شده است. در اولئوژل‌های این پژوهش، مدول الاستیک اولئوژل ۱۰ درصد نسبت به اولئوژل ۷ و ۴ درصد از نظر کمی به‌ترتیب ۴ و ۵۵ برابر بیشتر است. بنابراین افزایش غلظت موم نقش غالبی در تقویت ساختار شبکه‌ای اولئوژل داشته و این افزایش مدول، در فرکانس‌های بالاتر مشهودتر است. افزایش غلظت موم موجب تشکیل شبکه سه‌بعدی با پیوستگی بیشتر در فاز روغنی می‌شود که این نتایج با ارزیابی بافتی و بررسی پیوستگی در پژوهش حاضر نیز همخوانی دارد. با افزایش تراکم کریستال‌های مومی، نقاط اتصال شبکه بیشتر شده و توانایی ژل برای مقاومت در برابر تغییر شکل افزایش می‌یابد، در نتیجه مدول الاستیک افزایش پیدا می‌کند. این یافته با نتایج با مطالعات گذشته که نشان دادند اولئوژل حاوی ۱۰ درصد موم زنبورعسل نزدیک‌ترین خواص رئولوژیکی را به روغن پالم دارد، هم‌خوانی دارد (Abdolmaleki *et al.*, 2022).

همچنین در همه تیمارها مقدار G´ از G´´ بزرگتر است، بنابراین پاسخ نمونه‌ها عمدتاً الاستیک و جامدگونه و تشکیل ژل موفق بوده است. افزایش همزمان G´ و G´´ نشان‌دهنده‌ی تشکیل شبکه‌ی بلوری است که ضمن تقویت استحکام الاستیک (G´)، مقاومت ویسکوز ماده (G´´) را نیز بهبود می‌بخشد. در تمام تیمارها مقدار tanδ کمتر از ۱ است، بنابراین همه نمونه‌ها رفتار ژلی و جامدگونه نشان داده‌اند. اولئوژل ۴ درصد دارای بالاترین tanδ (۰/۶۳)، ضعیف‌ترین ساختار ژلی و بیشترین رفتار ویسکوزی را از خود نشان داد. از سوی دیگر، مقدار tanδ در اولئوژل‌های ۷ و ۱۰ درصد و روغن پالم (به‌ترتیب ۰/۴۲، ۰/۴۱ و ۰/۳۹) از لحاظ آماری باهم اختلاف معنی‌داری نداشته (p>۰/۰۵) و همگی رفتار الاستیک غالب و شبکه‌ی ژلی پایدار دارند.

این نتایج با یافته‌های پیشین همسو بوده و نشان می‌دهد که با افزایش غلظت اولئوژلاتور، مقدار تانژانت افت کاهش‌یافته و تغییر رفتار ماده به سمت ماهیت الاستیک غالب‌تر و تشکیل شبکه ژلی پایدارتر گرایش پیدا می‌کند. بنابراین نتایج روبش فرکانس پژوهش حاضر، با افزایش G´ در تیمار ۱۰ درصد موم، تأییدی بر تشکیل شبکه ژلی مستحکم‌تر است (Tanislav *et al.*, 2022).

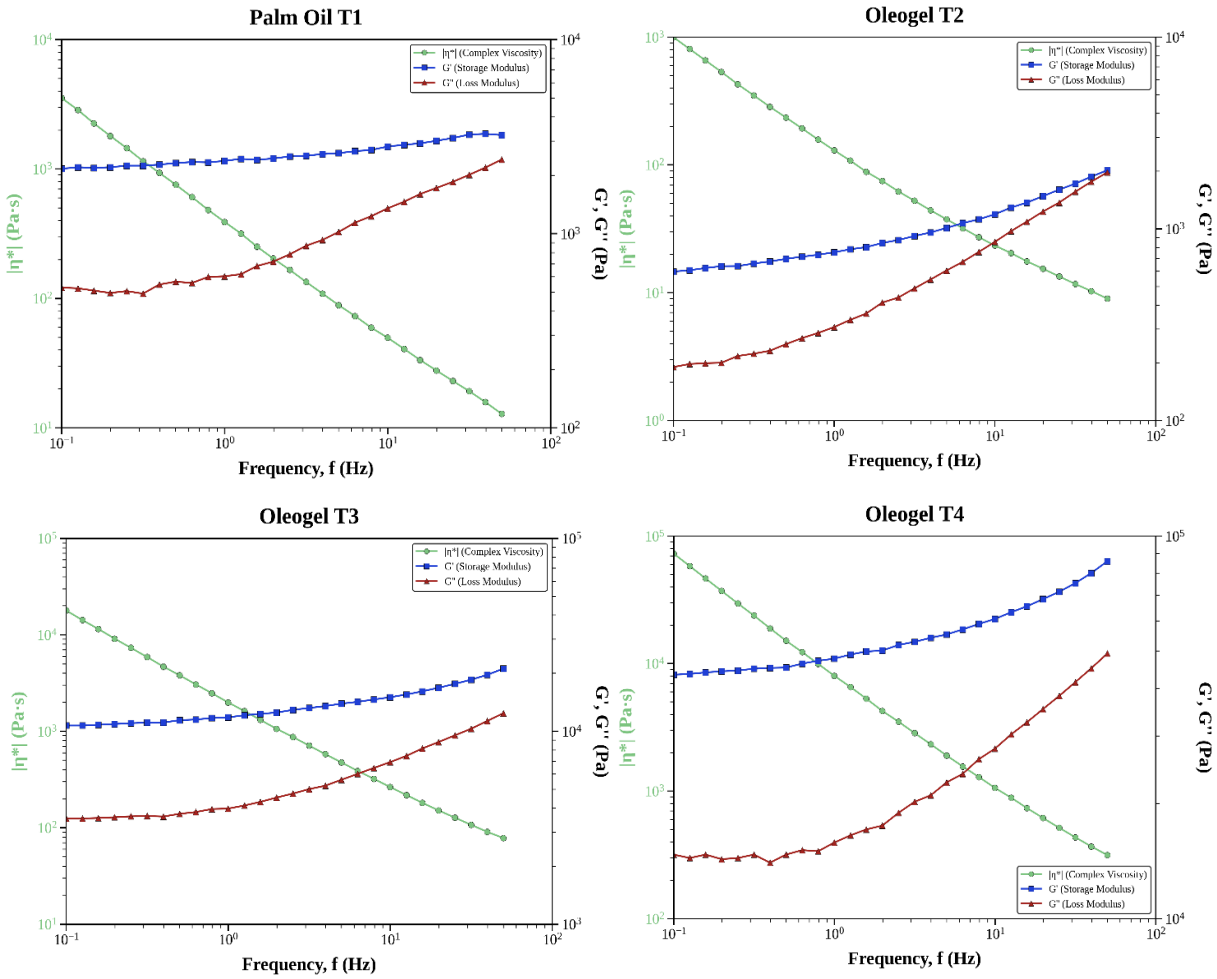
در مقایسه با روغن پالم، اولئوژل حاوی ۴ درصد موم کاهش معنی‌داری (p<۰/۰۵) در مدول ذخیره نشان داد که بیانگر عدم تشکیل شبکه ژلی کافی در این غلظت است. در مقابل، افزایش غلظت موم به ۷ و۱۰ درصد موجب افزایش معنی‌دار G´ و G´´ شد؛ به‌طوری‌که مقادیر G´ به‌ترتیب حدود ۵ و ۲۱ برابر بیشتر از روغن پالم بودند. همچنین مقایسه مقادیر tanδ بین روغن پالم و اولئوژل‌های ۷ و ۱۰ درصد (p>۰/۰۵) نشان داد که موم زنبورعسل با ایجاد شبکه کریستالی پایدار در روغن و تثبیت این ساختار با ایجاد تجمعات کریستال‌های چربی در بافت مومی خود، مانع حرکت شده و با تبدیل فاز کاملا مایع روغن آفتابگردان به بافتی جامدگونه توانست ساختاری پایدار با رفتار الاستیک غالب ایجاد کند و به‌عنوان جایگزین مناسب روغن پالم مطرح شوند. همسو با پژوهش حاضر، نادری و همکاران (Naderi, Ziaiifar, Rashidi, & Jafari, 2022) نشان دادند با افزایش میزان ژلاتور وابستگی به فرکانس کاهش یافته و مدول الاستیک نمونه‌ها به مدل ویسکوز غالب بوده که نشان‌دهنده‌ی استحکام ژل‌های تشکیل شده آنها است.

روبش دما[2]

مقاومت شبکه در برابر افزایش دما با آزمون روبش دما مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمون نقطه تلاقی مدول‌های الاستیک و اتلاف، در مرحله افزایش دما، به‌عنوان دمای ذوب اولئوژل تعریف می‌شود. دمایی که در آن مقدار tan δ از ۱ عبور کند نشان‌دهنده‌ی نرم شدن اولئوژل، شروع ذوب و جریان یافتن آن است. در واقع، هر چه منحنی زاویه فاز اولئوژل، دیرتر این خط را قطع کند، بافت اولئوژل انسجام بیشتری داشته و ویژگی‌های جامدگونه خود را در مقابل افزایش دما برای مدت طولانی‌تری حفظ می‌کند (Mahjoub *et al.*, 2021).

1- Frequency Sweep

2- Temperature Sweep



شکل ۵- نمودار تغییرات مدول‌های الاستیک و ویسکوز اولئوژل‌های روغن آفتابگردان و روغن پالم با تغییر فرکانس

(T1= روغن پالم، T2= اولئوژل ۴ درصد، T3= اولئوژل ۷ درصد، T4= اولئوژل ۱۰ درصد)

Fig. 5. Elastic and Viscous modulus rate changes of sunflower oleogels and palm oil with Frequency Sweep

(T1= Palm oil, T2= oleogel 4%, T3= oleogel 7%, T4= oleogel 10%)

جدول ٦- پارامترهای روبش فرکانس روغن پالم و اولئوژل‌های حاوی روغن آفتابگردان و موم زنبورعسل

Table 6- Frequency sweep parameters of palm oil and oleogels containing sunflower oil and beeswax

تیمار Treatment	مدول ذخیره (G′) Storage modulus (Pa)	مدول افت (G″) Loss modulus (Pa)	تانژانت افت tanδ
T1	2575 ± 0.35 ^{C}	1017 ± 0.78 ^{C}	0.39 ±0.23 ^{B}
T2	1009 ± 0.07 ^{D}	642 ± 0.46 ^{D}	0.63 ±0.01^{A}
T3	13646 ± 0.40 ^{B}	5761 ± 0.43 ^{B}	0.42 ± 0.13 ^{B}
T4	55232 ± 0.14 ^{A}	23064 ± 0.29 ^{A}	0.41 ± 0.07 ^{B}

داده‌ها به‌صورت میانگین ± انحراف استاندارد گزارش شده‌اند. حروف غیرمشابه در یک ستون نشان‌دهنده‌ی وجود اختلاف معنی‌دار در بین تیمارهای مختلف می‌باشد (p< ۰/۰۵)

(T1= روغن پالم، T2= اولئوژل ۴ درصد، T3= اولئوژل ۷ درصد، T4= اولئوژل ۱۰ درصد)

Values are represented as mean ± standard deviation. Different superscripts in a column indicate significant difference (P<0.05).

(T1= Palm oil, T2= oleogel 4%, T3= oleogel 7%, T4= oleogel 10%)

نتایج حاصله از آزمون روبش دما برای تعیین دمای تلاقی یا نقطه ذوب اولئوژل‌ها (شیب گرمایش از ۱۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد با کرنش ثابت ۰/۱ درصد، فرکانس ۱ هرتز و نرخ گرمایش ۱ درجه سانتی‌گراد در دقیقه) در جدول ۷ گزارش شده است. همانطور که در شکل ۶

مشاهده می‌شود و براساس یافته‌های حاصل، مقدار مدول ذخیره در نقطه‌ی تلاقی مربوط به روغن پالم (۰/۶۷ Pa ± ۱۲۰) بیشترین و در اولئوژل‌های ۷ و ۱۰ درصد به‌ترتیب (۰/۹۱ Pa ± ۱/۲۵) و (۰/۹۹ Pa ± ۱۶/۶)، کمترین مقدار است.

مقایسه رفتار اولئوژل‌ها در آزمون روبش دما نشان می‌دهد افزایش دما باعث ذوب تدریجی کریستال‌های موم می‌شود و بنابراین مقدار لحظه‌ای مدول‌ها الزاماً نشان‌دهنده استحکام نهایی ساختار نیست. در واقع، اولئوژل‌های ۷ و ۱۰ درصد در دمای شروع مدول الاستیک بالاتری داشته اما شیب تغییرات آنها نسبت به اولئوژل ۴ درصد کندتر بود که توانسته‌اند ساختار خود را تا دماهای بسیار بالاتری حفظ کنند. همچنین تغییرات کمتر G″ در اولئوژل‌های غلیظتر نیز نشان می‌دهد علی‌رغم اینکه با افزایش دما ساختار وارد ناحیه تغییر فاز شده است، اما همچنان توانسته‌اند پایداری کلی خود را حفظ کنند.

دمای ذوب روغن پالم، اولئوژل ۴، ۷ و ۱۰ درصد به‌ترتیب ۳۱/۳، ۲۹/۲، ۵۶/۶ و ۵۴/۱ درجه سانتی‌گراد گزارش شد. با توجه به اینکه نقطه تلاقی در آزمون روبش دما بر اساس هم‌ترازی مدول‌های ذخیره و اتلاف تعیین می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت اولئوژل ۴ درصد حتی پایداری حرارتی کمتری از روغن پالم دارد. افزایش غلظت موم زنبورعسل به ۷ و ۱۰ درصد منجر به افزایش شدید دمای ذوب شد؛ به‌طوری‌که اولئوژل ۷ درصد حدود ۱/۷ برابر و اولئوژل ۱۰ درصد حدود ۱/۸ برابر دمای ذوب بالاتری نسبت به روغن پالم نشان دادند. این موضوع بیانگر آن است که افزایش غلظت موم موجب تشکیل ساختار کریستالی مقاوم‌تر در برابر ذوب و افزایش پایداری حرارتی اولئوژل شده است.

به‌طور کلی، آزمون روبش دما نشان داد افزایش غلظت موم موجب افزایش معنی‌دار دمای ذوب شد ($p< ۰/۰۵$). اولئوژل‌های ۷ و ۱۰ درصد دمای گذار بالاتری نسبت به روغن پالم و اولئوژل ۴ درصد گزارش دادند که نشان‌دهنده‌ی تشکیل ساختار کریستالی پایدارتر و مقاومت بیشتر در برابر تخریب حرارتی در دماهای بالا است. از سوی دیگر، اگرچه مقدار مدول ذخیره روغن پالم در نقطه تلاقی (۰/۶۷ Pa ± ۱۲۰) بالاتر از اولئوژل ۱۰ درصد (۰/۹۹ Pa ± ۱۶/۶) بود، این تفاوت لزوما نشان‌دهنده‌ی پایداری حرارتی بیشتر روغن پالم نیست. در آزمون روبش دما، نقطه تلاقی به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم برای ارزیابی پایداری حرارتی و مقاومت ساختار ژلی در برابر افزایش دما در نظر گرفته می‌شود نه مقدار مدول در این نقطه. در نقطه تلاقی، غالبیت رفتار الاستیک بر ویسکوز از بین رفته و با افزایش دما، تخریب شبکه ساختاری و گذار از حالت ژل‌گونه به سیال رخ می‌دهد (Soares, Okuro, da Silva, Goldbeck, & Cunha, 2025; Zhang, Xu, Tang, & Li, 2023). بنابراین با توجه به بالاتر بودن دمای تلاقی اولئوژل ۱۰ درصد (۵۴/۱ درجه سانتی‌گراد) در مقایسه با روغن پالم (۳۱/۳ درجه سانتی‌گراد)، می‌توان نتیجه گرفت که ساختار ژلی اولئوژل ۱۰ درصد در برابر افزایش دما مقاومت بیشتری داشته و تا دمای بالاتر ساختار خود را حفظ کرده است. در کاربردهای صنعتی که فرآورده ممکن است در معرض دماهای بالا (مانند پخت یا نگهداری در شرایط گرم) قرار گیرد، دمای ذوب پایین‌تر اولئوژل ۴ درصد نشان‌دهنده‌ی محدودیت این غلظت برای حفظ ساختار در دماهای بالاتر از نقطه‌ی ذوب خود می‌باشد؛ هرچند که این غلظت ممکن است در دماهای پایین‌تر (همانند دمای یخچال) ساختاری جامد و پایدار داشته باشد. بنابراین افزایش غلظت موم به ۷ و ۱۰ درصد با افزایش دمای ذوب، موجب گسترش محدوده‌ی کاربردپذیری اولئوژل در دماهای بالاتر است. مقاومت دمایی نسبتاً بالای شبکه‌های ژلی تشکیل شده می‌تواند به‌دلیل نقطه ذوب لغزشی بالاتر فرآیند بلورینه شدن در اولئوژل ۷ و ۱۰ درصد نسبت به روغن پالم و اولئوژل ۴ درصد باشد. در مجموع، اولئوژل‌های ۷ و ۱۰ درصد دارای خواص جامدگونه غالب‌تر و مقاومت گرمایی بالایی نسبت به روغن پالم بوده و در محدوده دمایی نسبتاً بالا همچنان ساختار ژلی و رفتار الاستیک غالب خود را حفظ می‌نمایند و در واقع، ماهیت الاستیک آنها در این محدوده دمایی غالب است. محجوب و همکاران (Mahjoub *et al.*, 2021) گزارش کردند که با افزایش میزان اولئوژلاتور مونوآسیل گلیسرول و پلی‌گلیسرول استر مقاومت حرارتی اولئوژل افزایش یافته و ساختار پایدارتری در دمای بالا تشکیل شد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به روشنی نشان داد که اولئوژل تهیه‌شده از روغن آفتابگردان و موم زنبورعسل با غلظت ۱۰ درصد، جایگزینی پایدار، سلامت محور و کارآمد برای روغن پالم در فرمولاسیون‌های غذایی محسوب می‌شود. این اولئوژل با تشکیل شبکه سه‌بعدی قوی ($G´ > G´´$)، ظرفیتی بالا برای نگهداری روغن و شاخص پراکسید کمتری نسبت به روغن پالم داشت. از نظر بافت‌سنجی، اولئوژل ۱۰ درصد، سختی، انسجام و خاصیت ارتجاعی مطلوبی داشته و شبیه‌ترین ویژگی‌ها را به روغن پالم ارائه داد. پروفایل اسیدچرب اولئوژل‌ها نیز حاوی اسیدهای چرب اشباع و ترانس کمتر، نسبت اسیدهای چرب غیراشباع به اشباع بالاتر و اسید لینولئیک بیشتری بوده که ارزش تغذیه‌ای آنها را ارتقاء می‌بخشد.

جدول ۷- پارامترهای روبش دما روغن پالم و اولئوژل‌های حاوی روغن آفتابگردان و موم زنبورعسل

Table 7- Temperature sweep parameters of palm oil and oleogels containing sunflower oil and beeswax

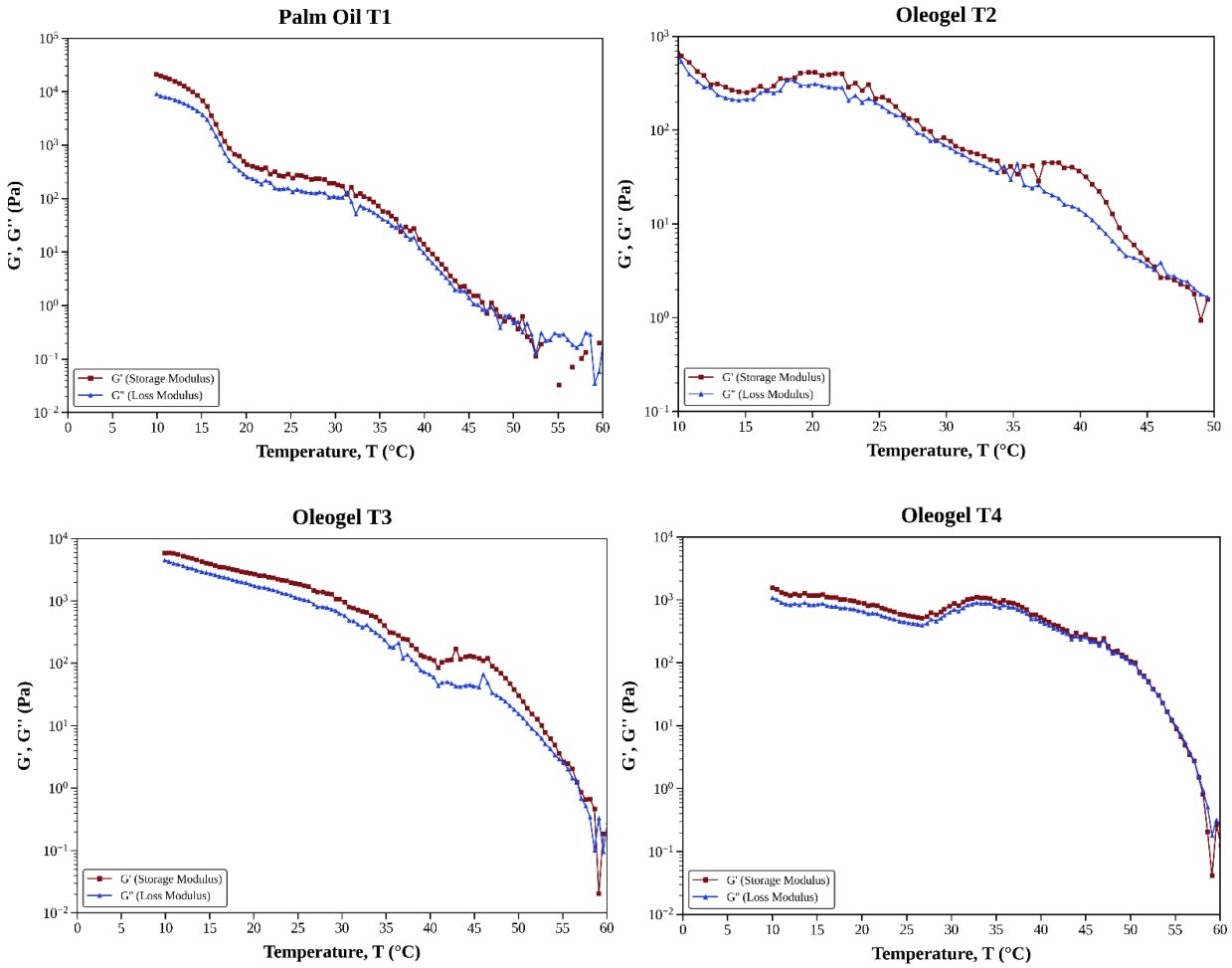
تیمار Treatment	مدول ذخیره (G′) Storage modulus (Pa)	مدول افت (G″) Loss modulus (Pa)	دمای ذوب Melting point (°C)
T1	120 ± 0.67 A	131 ± 0.16 A	31.3 B
T2	76.8 ± 0.19 B	78.4 ± 0.20 B	29.2 C
T3	1.25 ± 0.91 D	1.33 ± 0.07 D	56.6 A
T4	16.6 ± 0.99 C	16.6 ± 0.73 C	54.1 A

داده‌ها به‌صورت میانگین ± انحراف استاندارد گزارش شده‌اند. حروف غیرمشابه در یک ستون نشان‌دهنده‌ی وجود اختلاف معنی‌دار در بین تیمارهای مختلف می‌باشد (p< ۰/۰۵)

(T1= روغن پالم، T2= اولئوژل ۴ درصد، T3= اولئوژل ۷ درصد، T4= اولئوژل ۱۰ درصد)

Values are represented as mean ± standard deviation. Different superscripts in a column indicate significant difference (P<0.05).

(T1= Palm oil, T2= oleogel 4%, T3= oleogel 7%, T4= oleogel 10%)



شکل ٦- نمودار تغییرات مدول ذخیره (G′) و مدول افت (G″) اولئوژل‌های روغن آفتابگردان و روغن پالم در برابر افزایش دما

(T1= روغن پالم، T2= اولئوژل ۴درصد، T3= اولئوژل ۷درصد، T4= اولئوژل ۱۰درصد)

Fig. 5. Elastic and Viscous modulus rate changes of sunflower oleogels and palm oil with Temperature Sweep

(T1= Palm oil, T2= oleogel 4%, T3= oleogel 7%, T4= oleogel 10%)

به‌علاوه تغییرات رنگی در اولئوژل‌ها معنادار نبود و با افزایش موم، رنگ محصول به روغن پالم نزدیک‌تر شد که از منظر پذیرش بصری، مزیتی کلیدی برای کاربرد صنعتی محسوب می‌شود. در آزمون‌های رئولوژی، اولئوژل ۱۰ درصد پایداری حرارتی و مکانیکی بالاتری در مقایسه با روغن پالم داشته و در دماهای بالاتر ساختار خود را حفظ کرد. به‌طور کلی، اولئوژل ۱۰ درصد روغن آفتابگردان با موم زنبورعسل، ترکیبی پایدار، تکنیکی، سلامت محور و سازگار با الزامات تغذیه سالم ایجاد می‌کند که می‌تواند گامی مؤثر در جهت کاهش مصرف روغن پالم در صنایع غذایی باشد.

پیشنهادها

در پژوهش حاضر، ضمن اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و ارزیابی خواص رئولوژیکی، شاخص پراکسید نیز به‌عنوان معیار اولیه اکسیداسیون در زمان تولید اندازه‌گیری گردید که با توجه به اهمیت پایداری اکسیداتیو در طولانی‌مدت، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، روند تغییرات شاخص پراکسید در فواصل زمانی مختلف طی دوره نگهداری پایش شود تا درک جامع‌تری از روند اکسیداسیون اولئوژل‌ها حاصل گردد. همچنین به‌منظور تکمیل ارزیابی کیفی و بررسی محصولات ثانویه اکسیداسیون، سنجش شاخص‌های آنیزیدین و عدد توتوکس در کنار شاخص پراکسید توصیه می‌شود تا تصویر دقیق‌تری از وضعیت اکسیداتیو نهایی فرآورده ارائه داده و امکان مقایسه جامع‌تر با چربی‌های صنعتی نظیر روغن پالم را فراهم آورند. چنین رویکردی می‌تواند به بهینه‌سازی فرمولاسیون و تعیین زمان ماندگاری اولئوژل‌های تولیدی کمک شایانی نماید.

منابع تأمین مالی

این پژوهش هیچ کمک مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیر انتفاعی دریافت نکرده است.

میزان مشارکت نویسندگان

سمیه پورعبداللهی: مدیریت داده‌ها، نرم‌افزار، جمع‌آوری داده‌ها، نوشتن– تأمین مالی ،اعتبارسنجی، منابع، آماده‌سازی پیش‌نویس اصلی.

آذین نصرالله زاده: مفهوم‌سازی و روش‌شناسی، مدیریت پروژه، تحلیل رسمی، نظارت، نوشتن، تجسم، منابع، بررسی و ویرایش.

References

1. Abdolmaleki, K., Alizadeh, L., Nayebzadeh, K., Baranowska, H.M., Kowalczewski, P.Ł., & Mousavi Khaneghah, A. (2022). Potential application of hydrocolloid-based oleogel and beeswax oleogel as partial substitutes of solid fat in margarine. *Apply Science, 12*. https://doi.org/10.3390/app122312136
2. Abdolmaleki, K., alizadeh, L., Sheikhi, Z., & Nayebzadeh, K. (2022). Effects of replacing palm oil with beeswax oleogel on the characteristics of low-saturated fatty acid margarine. *Iranian Journal of Nutrition Sciences and Food Technology*, *16*(4), 53-66. (In Persian). https://doi.org/20.1001.1.17357756.1400.16.4.3.2
3. Aliasl Khiabani, A., Tabibazar, M., Roufegarinejad, L., Hamishekar, H., & Alizadeh, A. (2020). Assessing the feasibility of carnauba wax/adipic acid oleogel application as a shortening replacer in cake. *Journal of Food Science and Technology(Iran), 17*(103), 83-93. (In Persian). https://doi.org/10.52547/fsct.17.103.83
4. Anushree, S., André, M., Guillaume, D., & Frédéric, F. (2017). Stearic sunflower oil as a sustainable and healthy alternative to palm oil. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *37*(3), 18. https://doi.org/10.1007/s13593-017-0426-x
5. AOSC Official Method Cd 8b-90. (2017). Sampling and analysis of commercial fats and oil Peroxide Value.
6. 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
7. Blake, Toro-Vazquez, J.F., & Hwang, H.-S. (2018). Wax oleogels. In *Edible oleogels* (pp. 133-171): Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814270-7.00006-X
8. Blake, A., & Marangoni, A. (2015). Factors affecting the rheological properties of a structured cellular solid used as a fat mimetic. *Food Research International, 74*, 284-293. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.04.045
9. Bogdanov, S. (2016). Beeswax. *Beeswax book. Bee Product Science*, 2-10.
10. Callau, M., Sow-Kébé, K., Nicolas-Morgantini, L., & Fameau, A.-L. (2020). Effect of the ratio between behenyl alcohol and behenic acid on the oleogel properties. *Journal of Colloid and Interface Science, 560*, 874-884. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.10.111
11. Cristiano, M.C., Froiio, F., Mancuso, A., & De Gaetano, F. (2020). The rheolaser master and kinexus rotational rheometer®to evaluate the influence of topical drug delivery systems on rheological features of topical poloxamer gel. *Molecules, 25*. https://doi.org/10.3390/molecules25081979
12. Ebrahimzadeh, A., Mazaheri Tehrani, M., & Ghasemi, M. (2024). Investigation of oleogel production using sunflower oil with a mixture of carnauba and beeswaxes as a replacement for solid fats (shortening) in cookie

formulation. *Food Engineering Research, 22*(75), 133-154. (In Persian). https://doi.org/10.22092/fooder.2024.354397.1369
13. Fayaz, G., Calligaris, S., & Nicoli, M.C. (2020). Comparative study on the ability of different oleogelators to structure sunflower oil. *Food Biophysics, 15*(1), 42-49. https://doi.org/10.1007/s11483-019-09597-9
14. Fayaz, G., Goli, S.A.H., Kadivar, M., Valoppi, F., Barba, L., Balducci, C., . . . Nicoli, M.C. (2017). Pomegranate seed oil organogels structured by propolis wax, beeswax, and their mixture. *European Journal of Lipid Science and Technology, 119*(10), 1700032. https://doi.org/10.1002/ejlt.201700032
15. Franco, R., Iseppi, L., & Taverna, M. (2018). Sunflower oil functional properties for specialty food. *Nutrition and Food Science International Journal, 5*(4). https://doi.org/10.19080/NFSIJ.2018.05.555668
16. Gengatharan, A., Mohamad, N.V., Zahari, C.N.M.C., & Vijayakumar, R. (2023). Oleogels: Innovative formulations as fat substitutes and bioactive delivery systems in food and beyond. *Food Structure, 38*. https://doi.org/10.1016/j.foostr.2023.100356
17. Ghalamkari, S., & Abbasi, H. (2022). Optimization of grape seed oil Oleogel production using beeswax and monoglyceride. *Journal of Food Research, 32*(4), 37-55. (In Persian). https://doi.org/10.22034/FR.2022.47244.1798
18. Gunstone, F.D. (2011). Vegetable oils in food technology: Composition, properties and uses (Vol. 1): Blackwell Publishing. https://doi.org/10.1002/9781444339925
19. Homolya, S., Vozáry, E., Badak Kerti, K., Kaszab, T., Mardani, M., & Lambert Meretei, A. (2024). Oleogel containing beeswax and monoglycerides as a potential substitute for confectionery palm fats. *Progress in Agricultural Engineering Sciences, 20*(1), 139-157. https://doi.org/10.1556/446.2024.00120
20. Imoisi, O., Ilori, G., Agho, I., & Ekhator, J. (2015). Palm oil, its nutritional and health implications. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management, 19*(1), 127-133. https://doi.org/10.4314/jasem.v19i1.17
21. INSO. (2016). Animal and vegetable fats and oils-Gas chromatography of fatty acid methyl esters- Part 4: Determination by capillary gas chromatography (1st edition). No.13126-4. In. Iran. (In Persian). https://doi.org/10.22059/ijbse.2020.302866.665310
22. INSO. (2022). Animal and vegetable fats and oils-gas chromatography of fatty acid methyl esters-Part :2 Preparation of methyl esters of fatty acids (1st Revision) No. 13126-2. In. Iran. (In Persian). https://doi.org/10.22059/ijbse.2020.302866.665310
23. Khan, S., Choudhary, S., Pandey, A., Khan, M.K., & Thomas, G. (2015). Sunflower oil: Efficient oil source for human consumption. *Emergent Life Sciences Research, 1*, 1-3.
24. Kumar, A., Kumar, N., & Sharma, H. (2025). Development and characterization of groundnut oil-based oleogels for replacing saturated fats in cookies formulations. *Discover Food, 5*(1), 30. https://link.springer.com/article/10.1007/s44187-025-00301-0
25. Liu, H., Lu, Y., & Zhang, J. (2018). A comprehensive investigation of the viscoelasticity and time-dependent yielding transition of waxy crude oils. *Journal of Rheology, 62*, 527-541. https://doi.org/10.1122/1.5002589
26. López-Pedrouso, M., Lorenzo, J.M., Gullón, B., Campagnol, P.C.B., & Franco, D. (2021). Novel strategy for developing healthy meat products replacing saturated fat with oleogels. *Current Opinion in Food Science, 40*, 40-45. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.06.003
27. Mahjoub, R., Hakimzadeh, V., Ataye Salehi, E., & Farmani, J. (2021). Production and evaluation of physicochemical and rheological properties of monoacylglycerol and polyglycerol ester-based Oleogels as a low saturated shortening. *Iranian Food Sciences and Technology Research Journal 17*(1), 187-204. (In Persian). https://doi.org/10.22067/ifstrj.v17i1.86529
28. Mekky, A.E., El-Barkey, N.M., Abd El Halim, H.M., Nasser, S.A., Mahmoud, N.N., Zahra, A.A., & Nasr-Eldin, M.A. (2025). Exploring the potential of hydro alcoholic crude extract of beeswax as antibacterial antifungal antiviral antiinflammatory and antioxidant agent. *Scientific Reports, 15*(1), 32512. https://doi.org/10.1038/s41598-025-17830-4
29. 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
30. Moradabbasi, M., Goli, A., & Fayaz, G. (2020). Effect of sodium caseinate and xanthan gum biopolymers concentration on oleogel production capability based on oil-in-water emulsion system. *Journal of Food Science and Technology, 17*(107), 147-159. (In Persian). https://doi.org/10.52547/fsct.17.107.147
31. Naderi, Ziaiifar, A., Rashidi, L., & Jafari, S. (2022). Study of the physicochemical and rheological behaviors of hybrid oleogels based on monoacylglycerol and carboxymethyl cellulose. *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology, 17*(1). (In Persian). https://doi.org/10.52547/fsct.17.107.14710.52547/nsft.17.1.65
32. Nakonechna, K., Ilko, V., Berčíková, M., Vietoris, V., Panovská, Z., & Doležal, M. (2024). Nutritional, utility, and sensory quality and safety of sunflower oil on the central European market. *Agriculture, 14*(4), 536. https://doi.org/10.3390/agriculture14040536

33. Nasirzadeh Dizaji, R., Roufegarinejad, L., Tabibiazar, M., & Alizadeh, A. (2022). Preparation of the soybean structured oil based on propolis wax and its feasibility as shortening replacer in cakes. *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology*, *17*(3), 67-76. (In Persian). https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17357756.1401.17.3.5.9
34. Nasrollahzadeh, A., Taefeh, M., Heidari, S., Darvishi Jouryabi, A., Alavi Kalshtajani, S.M., & Nourozi, M. (2024). *Study of oleogel production,its components and new structures in oil products*. Paper presented at the 2st International conference on agriculture,food industry and environment. (In Persian). https://civilica.com/doc/1948368
35. Niknam, R., Ayaseh, A., & Ghanbarzadeh, B. (2018). Steady shear flow and dynamic rheology of the emulsions containing ultrasound-assisted extracted *Plantago major* seed gum. *Journal of Food Science and Technology (Iran), 15*(83), 281-298. (In Persian)
36. Öğütcü, M., & Yılmaz, E. (2015). Characterization of hazelnut oil oleogels prepared with sunflower and carnauba waxes. *International Journal of Food Properties, 18*(8), 1741-1755. https://doi.org/10.1080/10942912.2014.933352
37. Petraru, A., Ursachi, F., & Amariei, S. (2021). Nutritional characteristics assessment of sunflower seeds, oil and cake. perspective of using sunflower oilcakes as a functional ingredient. *Plants* (*Basel*), *10*(11). https://doi.org/10.3390/plants10112487
38. Pușcaș, A., Mureșan, V., Socaciu, C., & Muste, S. (2020). Oleogels in food: A review of current and potential applications. *Foods, 9*(1). https://doi.org/10.3390/foods9010070
39. Radzievska, I., & Melnyk, O. (2015). Kinetic characteristics of oil natural antioxidants. *Science and Innovation, 11*(4), 30-34. https://doi.org/10.15407/scine11.04.030
40. Silva, Martins, A.J., Fasolin, L.H., & Vicente, A.A. (2021). Modulation and characterization of wax-based olive oil organogels in view of their application in the food industry. *Gels 7*(12). https://doi.org/10.3390/gels7010012
41. 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
42. Sobolev, R., Frolova, Y., Sarkisyan, V., Makarenko, M., & Kochetkova, A. (2022). Effect of beeswax and combinations of its fractions on the oxidative stability of oleogels. *Food Bioscience, 48*, 101744. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101744
43. 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).
44. https://doi.org/10.3390/foods14061030
45. Soleimanian, Y., Goli, S.A.H., Varshosaz, J., & Maestrelli, F. (2018). Propolis wax nanostructured lipid carrier for delivery of β sitosterol: Effect of formulation variables on physicochemical properties. *Food Chemistry, 260*, 97-105. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.145
46. Sulaiman, N., Sintang, M., Mantihal, S., Zaini, H., Munsu, E., Mamat, H., & Pindi, W. (2022). Balancing functional and health benefits of food products formulated with palm oil as oil sources. *Heliyon, 8*(10). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11041
47. Szymanska, I., Zbikowska, A., & Onacik-Gür, S. (2024). New insight into food-grade emulsions: candelilla wax-based oleogels as an internal phase of novel vegan creams. *Foods, 13*(5), 729. https://doi.org/10.3390/foods13050729
48. Tan, T.H., Chan, E.S., Manja, M., Tang, T.K., Phuah, E.T., & Lee, Y.Y. (2023). Production, health implications and applications of oleogels as fat replacer in food system: A review. *Journal of the American Oil Chemists' Society, 100*(9), 681-697. https://doi.org/10.1002/aocs.12720
49. Tanislav, A.E., Pușcaș, A., Păucean, A., Mureșan, A.E., Semeniuc, C.A., Mureșan, V., & Mudura, E. (2022). Evaluation of structural behavior in the process dynamics of oleogel-based tender dough products. *Gels, 8*(5), 317. https://doi.org/10.3390/gels8050317
50. Xiong, M., Han, X., Wu, S., Jia, P., & Cai, Y. (2025). Effect of gelator type and concentration on the rice bran oil-based oleogels: Focusing on physicochemical properties, oxidation stability and formation mechanism. *Food Chemistry*, 147365. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.147365
51. Yılmaz, E., & Öğütcü, M. (2015). The texture, sensory properties and stability of cookies prepared with wax oleogels. *Food & Function, 6*(4), 1194-1204. https://doi.org/10.1039/c5fo00019j
52. 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). https://doi.org/10.3390/foods12020345