



## Comparison of water-in-oil emulgels containing different oleogelators for fat modification used in chocolate muffin cakes

Seyed Mohammad Najibi Hosseini<sup>1</sup> and Babak Ghanbarzadeh<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>MSc Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>2</sup>Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

✉ Corresponding author: [ghanbarzadeh@tabrizu.ac.ir](mailto:ghanbarzadeh@tabrizu.ac.ir)

### ARTICLE INFO

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**  
Received: 2025-06-25  
Accepted: 2025-08-17  
Published: 2025-08-23

**Keywords:**  
Bakery products, Beeswax, Fat replacer, Glycerol monostearate, Rice bran wax, Water in oil emulgel

### ABSTRACT

**Background:** The adverse health effects associated with high consumption of saturated and trans fatty acids have increased focus in novel fat alternatives, such as emulgels.

**Aims:** This study aimed to evaluate the properties and potential of emulgels based on beeswax and rice bran wax, with or without glycerol monostearate (GMS), as a fat replacer in chocolate muffins.

**Methods:** Four types of emulgels were formulated with a 25% aqueous phase, 9% gelator, and 1% emulsifier. These emulgels were characterized for their microstructure, firmness, thermal behavior, physical stability, and oxidative stability (peroxide value). Selected emulgels were then used to replace 25% of the margarine in a chocolate muffin formulation. The final products were analyzed for moisture content, texture (firmness), and sensory properties.

**Results:** The findings indicated that the beeswax emulgel, compared to the rice bran wax emulgel, exhibited a smaller mean particle size (3.43 vs. 6.55  $\mu\text{m}$ ), greater firmness (2.29 vs. 0.88 N), and enhanced physical and oxidative stability. The addition of GMS reduced particle size, which in turn enhanced the firmness and the thermal and physical stability of the emulgels. The incorporation of emulgels into the muffins resulted in a product with higher moisture content (25.12% to 26.93%) and a softer texture (firmness between 15.26 and 22.32 N) compared to the control, while no significant differences were observed in sensory attributes.

**Conclusion:** The partial replacement (25%) of margarine with an emulgel, particularly the formulation containing beeswax and glycerol monostearate which exhibited the best physicochemical characteristics, is a successful strategy. It yields a chocolate muffin with a softer texture and an improved nutritional profile without negatively impacting the sensory acceptance of product.



### Extended Abstract

**Introduction:** Fats are essential components in the formulation of many food products and often contain high levels of saturated and trans fatty acids. The excessive consumption of these fats is associated with adverse health effects, including becoming overweight, elevated blood cholesterol, diabetes, and cardiovascular diseases. Accordingly, the World Health Organization (WHO) and the Food and Agriculture Organization (FAO) have recommended that the energy intake from saturated and trans fatty acids should not exceed 10% and 1% of total daily calories, respectively. Furthermore, a concurrent rise in consumer awareness regarding nutrition and health has led to an increased demand for low-fat and low-calorie food products. Nevertheless, the elimination or reduction of fat poses a significant challenge for food scientists, as fats play a vital role in developing desirable texture, flavor, and sensory properties, particularly in bakery products. To overcome this challenge, various gelled systems have been explored. Oleogels, formed by structuring vegetable oils into solid-like materials using oleogelators, have emerged as a promising approach. Oleogels can mimic the physical properties of solid fats while containing lower levels of saturated and trans fats. However, since they are composed of over 90% oil, oleogels remain high in calories, limiting their application for calorie reduction. A more advanced strategy involves the use of emulgels, which are gelled emulsion systems. Specifically, water-in-oleogel (W/O) emulgels offer a dual benefit: they provide the structure of a solid fat while also reducing caloric content by incorporating a dispersed aqueous phase within the continuous oleogel phase. This structure is crucial for maintaining a fat-like sensory perception, as the continuous oil phase interacts directly with the sense of taste. The physicochemical properties of these emulgels depend on the chemical composition of the oleogelators, the type of oil, and the production process conditions. Waxes, such as beeswax (BW) and rice bran wax (RBW), are common oleogelators, but their use alone can be challenging. Therefore, the addition of a suitable emulsifier is critical for creating stable systems. Glycerol monostearate (GMS), a non-ionic, lipophilic surfactant, can act as both an emulsifier and an oleogelator. Despite the great potential of W/O emulgels, research on their application in bakery products has been limited, with most studies focusing on oil-in-hydrogel systems.

Muffins, as one of the most popular bakery products, typically contain high levels of fat (15-20%) and serve as an excellent model for investigating novel fat replacement strategies. This study was therefore designed with two primary objectives. First, to develop and characterize W/O emulgels structured with either beeswax or rice bran wax, with and without the addition of GMS as an emulsifier. The second objective was to evaluate the impact of replacing 25% of the margarine in a chocolate muffin formulation with the selected emulgels on the final product's physical and sensory properties.

**Materials and Methods:** Glycerol monostearate (GMS), potassium iodide, and starch were sourced from Merck (Germany). Rice bran wax (RBW) was obtained from H&B Oils Center Co., and beeswax (BW) was procured from a local market in Tabriz, Iran. Cold-pressed sunflower oil (Borooje brand, Iran) was used as the oil phase. All other reagents, including hexane, ammonium thiosulfate, acetic acid, and chloroform, were supplied by Mojallali Co. (Iran). Four W/O emulgel formulations were prepared: a beeswax-based emulgel (BWE), a beeswax-based emulgel with GMS (BWGE), a rice bran wax-based emulgel (RWE), and a rice bran wax-based emulgel with GMS (RWGE). The formulations were developed based on the method described by Pandolsook and Kupongsak (2017) with modifications. The oil phase was prepared by heating the oleogelators (9% w/w of either BW or RBW) and, where applicable, the emulsifier (1% w/w GMS) in cold-pressed sunflower oil for 10 minutes in an 80°C water bath. A 25% (w/w) aqueous phase (deionized water), also heated to 80°C, was then added to the oil phase. The mixture was homogenized at 12,000 rpm for 5 minutes in 50°C. The resulting emulgels were cooled to room temperature and stored at 5°C until further analysis. The microstructure of the emulgels was observed using a light microscope at 1000x magnification. The firmness of the emulgels was measured using a back-extrusion test performed with a Tensile Tester-SUT 2.5N (Sanaf, Iran). Differential Scanning Calorimetry (DSC) was used to analyze the thermal behavior of the emulgels on a DSC-400 instrument (Sanaf, Iran). The physical stability of the emulgels was assessed by measuring their ability to hold oil and water (Solvent Holding Capacity). The peroxide value (PV) of the emulgels and the pure sunflower oil was measured on day 1 and day 30 of storage at 25°C using the AOCS official method (Cd 8-53).

Four muffin formulations were prepared: a control made with 100% margarine and three treatments where 25% of the margarine was replaced by the selected emulgels (BWE, BWGE, and RWGE). 45 g of batter was weighed into each paper mold and baked at 165°C for 20 minutes in a convection oven. After cooling, the muffins were analyzed for moisture content, firmness, and sensory attributes. Moisture was determined by drying approximately 2 g of each muffin sample in a hot air oven at 105°C until a constant weight was achieved. Muffin firmness was evaluated using a compression test with the same instrument used for the emulgels. Sensory attributes (texture, color, taste, and overall acceptability) were evaluated by a panel of 15-20 semi-trained assessors using a 5-point hedonic scale. All experiments were performed in triplicate in a completely randomized design. Data were subjected to a one-way analysis of variance (ANOVA), and means were compared using Duncan's multiple range test at a 95% confidence level ( $p < 0.05$ ) with SPSS software (version 27).

**Results and discussion:** The macroscopic properties of the emulgels are directly influenced by their underlying microstructure. Microscopic analysis confirmed that all four formulations were W/O emulgels, characterized by water droplets dispersed within a continuous oil phase. A clear distinction was observed between the two wax types. The beeswax-based emulgel (BWE) exhibited smaller and more uniformly distributed water droplets, with a mean particle size of 3.43  $\mu\text{m}$ , while the rice bran wax-based emulgel (RWE) had significantly larger and more heterogeneously distributed droplets with a mean particle size of 6.55  $\mu\text{m}$ . This difference is attributed to the higher content of surface-active free fatty acids and fatty alcohols in beeswax. The superior microstructure of the beeswax emulgel directly correlated with its mechanical properties. The BWE sample (2.29 N) was significantly firmer than the RWE sample (0.88 N), a result of the denser gel network formed by finer crystals and reinforced by the smaller water droplets acting as "active fillers." This enhanced network integrity also led to superior physical stability, with BWE showing an oil holding capacity of 98.69% compared to 69.8% for RWE. Due to its surface-active properties, the addition of glycerol monostearate (GMS) had a significant and positive impact across all analyses. GMS incorporation significantly reduced the mean water droplet size in both wax systems, down to 1.98  $\mu\text{m}$  in BWGE and 4.74  $\mu\text{m}$  in RWGE. This reduction in particle size directly led to a

significant increase in gel firmness, with the BWGE sample being the firmest at 3.51 N. The improved stability was also evident in the oil holding capacity of BWGE, which was 100%. Furthermore, GMS enhanced oxidative stability; after 30 days of storage, the samples followed the trend BWGE (5.91 meq  $\text{O}_2/\text{kg}$ ) < BWE (6.27) < RWGE (8.83) < RWE (9.19), indicating a direct correlation between gel firmness and resistance to oxidation. Finally, DSC analysis confirmed the superior structural integrity of the GMS-containing systems, with the addition of GMS leading to higher melting peaks and thus enhanced thermal stability. The application of these emulgels as partial fat replacers in muffins yielded products with significant improvements in quality attributes. All muffins containing emulgels had a significantly higher moisture content (ranging from 25.12% to 26.93%) compared to the control muffin (22.15%). This higher moisture resulted in a softer texture, with all three emulgel-based muffins being significantly softer than the control (27.92 N). The BWGE-M was the softest (15.26 N), followed by BWE-M (19.53 N) and RWGE-M (22.32 N). These textural improvements are considered highly desirable in cake-like products. Crucially, these benefits were achieved without compromising consumer perception. The sensory panel found no significant differences in taste, texture, color, or overall acceptability between the control and the reformulated muffins. Notably, the BWE-M and BWGE-M samples obtained higher scores than the 100% margarine control in most sensory parameters, including texture, taste, and overall acceptability.

**Conclusion:** The evaluation of the emulgels demonstrated that beeswax, compared to rice bran wax, resulted in emulgels with greater firmness and more favorable physical and oxidative stability. Furthermore, the addition of glycerol monostearate played a key role in enhancing the emulgels' properties by reducing droplet size, reinforcing the gel network, and increasing thermal stability. Moreover, replacing 25% of the margarine with the beeswax-based emulgels (BWE and BWGE) in the chocolate muffin formulation improved the final product's qualitative attributes. The reformulated muffins had significantly increased moisture and a softer texture, and also possessed an enhanced nutritional profile due to the reduced fat content. Crucially, these desirable textural and nutritional properties were achieved without any negative impact on the sensory acceptance (taste, texture, color, and overall acceptability) of the muffins. It

can therefore be concluded that the use of these emulgels is a practical and successful strategy for

producing healthier, higher-quality chocolate muffins.

## مقایسه‌ی امولژل‌های آب در روغن حاوی اولئوژلاتورهای مختلف برای اصلاح چربی مورد استفاده در کیک مافین شکلاتی

سیدمحمد نجیبی حسینی<sup>۱</sup> و بابک قنبرزاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>۲</sup> استاد گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه تبریز

✉ مسئول مکاتبه: [ghanbarzadeh@tabrizu.ac.ir](mailto:ghanbarzadeh@tabrizu.ac.ir)

### چکیده

### مشخصات مقاله

**زمینه‌ی مطالعاتی:** تبعات منفی ناشی از مصرف بالای اسیدهای چرب اشباع و ترانس، توجه به جایگزین‌های نوین چربی مانند امولژل‌ها را افزایش داده است.

**هدف:** هدف از این مطالعه ارزیابی ویژگی‌ها و پتانسیل امولژل‌های بر پایه‌ی موم زنبور عسل و موم سبوس برنج، با یا بدون گلیسرول مونواستئارات، به‌عنوان جایگزین چربی در مافین شکلاتی بود. **روش کار:** چهار نوع امولژل حاوی ۲۵٪ فاز آبی، ۹٪ ژلاتور و ۱٪ امولسیفایر تولید شد. این امولژل‌ها از نظر ریزساختار، سفتی، رفتار حرارتی، پایداری فیزیکی و پایداری اکسیداتیو (عدد پراکسید) مورد ارزیابی قرار گرفتند. سپس نمونه‌های منتخب به‌عنوان جایگزین ۲۵٪ از مارگارین در فرمولاسیون مافین استفاده و محصول نهایی از نظر رطوبت، سفتی و ویژگی‌های حسی بررسی شد.

**نتایج:** نتایج نشان دادند که امولژل موم زنبور عسل در مقایسه با موم سبوس برنج، میانگین اندازه‌ی ذرات ریزتر (۳/۴۳ در مقابل ۶/۵۵ میکرومتر)، سفتی بیشتر (۲/۲۹ در مقابل ۰/۸۸ نیوتن) و پایداری فیزیکی و اکسیداتیو بالاتری داشت. افزودن گلیسرول مونواستئارات نیز با کاهش اندازه‌ی ذرات، موجب افزایش سفتی و پایداری حرارتی و فیزیکی امولژل‌ها شد. استفاده از امولژل‌ها در مافین، منجر به تولید محصولی با رطوبت بالاتر (۲۵/۱۲ تا ۲۶/۹۳٪) و بافت نرم‌تر (سفتی بین ۱۵/۲۶ تا ۲۲/۳۲ نیوتن) نسبت به نمونه‌ی شاهد شد، درحالی‌که تفاوت معنی‌داری در ویژگی‌های حسی مشاهده نشد.

**نتیجه‌گیری کلی:** جایگزینی ۲۵٪ از مارگارین با امولژل، به‌ویژه نمونه‌ی بر پایه‌ی موم زنبور عسل و گلیسرول مونواستئارات که بهترین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی را از خود نشان داد، یک استراتژی موفق برای تولید مافین شکلاتی با بافت نرم‌تر و پروفایل تغذیه‌ای بهبودیافته بود، که تأثیر منفی بر پذیرش حسی محصول نداشت.

### نوع مقاله:

علمی پژوهشی

### تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۴/۴/۴

پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۲۶

انتشار: ۱۴۰۴/۶/۱

### کلید واژه:

امولژل آب در اولئوژل، جایگزین چربی، فراورده‌های نانوایی، گلیسرول مونواستئارات، موم سبوس برنج، موم زنبور عسل

## مقدمه

چربی‌ها در فرمولاسیون بسیاری از محصولات غذایی، استفاده می‌شوند و شامل مقادیر بالایی از اسیدهای چرب اشباع و ترانس هستند که مصرف زیاد آن‌ها منجر به اضافه وزن، افزایش کلسترول خون، دیابت و بیماری‌های قلبی-عروقی می‌شود (دل مرکادو و همکاران، ۲۰۲۵؛ عثمان و همکاران، ۲۰۱۸). در همین راستا، سازمان بهداشت جهانی<sup>۱</sup> (WHO) و سازمان خواربار و کشاورزی<sup>۲</sup> (FAO) توصیه کرده‌اند که انرژی دریافتی از اسیدهای چرب اشباع و ترانس به ترتیب از ۱۰ و ۱٪ کل کالری روزانه فراتر نرود (گیاکوموزی و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین امروزه همزمان با افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان نسبت به تغذیه و سلامتی، تقاضا برای محصولات غذایی کم‌چرب و کم‌کالری نیز افزایش یافته است (عثمان و همکاران، ۲۰۱۸). با این وجود، حذف یا کاهش چربی یک چالش بزرگ برای متخصصان صنایع غذایی است، زیرا چربی‌ها نقش حیاتی در ایجاد بافت، طعم و خواص حسی مطلوب، به‌ویژه در فراورده‌های نانوائی، ایفا می‌کنند (گوتیرز-لونا و همکاران، ۲۰۲۲). اخیراً برای غلبه بر این چالش، استفاده از سیستم‌های ژلی مانند امولژل‌های آب در اولئوژل پیشنهاد شده است (توتوسائوس و همکاران، ۲۰۲۴). سیستم‌های ژلی را می‌توان بر اساس قطبی بودن فاز مایع، به ترتیب، هیدروژل، امولژل و اولئوژل نامید (مارتینز و همکاران، ۲۰۱۸). اولئوژل‌ها از تشکیل ساختار در روغن توسط اولئوژلاتورها (در غلظت‌های پایین) به‌دست می‌آیند. با وجود این‌که اولئوژل‌ها معمولاً حاوی بیش از ۹۰٪ روغن هستند، اما خواص فیزیکی مشابه با چربی‌ها دارند (لی، ۲۰۱۸)؛ بنابراین اولئوژل‌ها ضمن ارائه ویژگی‌های منحصربه‌فرد چربی‌ها، حاوی اسیدهای چرب اشباع و ترانس کمتری هستند (دال و همکاران، ۲۰۲۴). با این حال اولئوژل‌ها همچنان کالری بالایی دارند (مائو و همکاران، ۲۰۲۰) و با توجه به این محدودیت امولژل‌ها به‌عنوان سیستم‌های مناسب‌تری برای اصلاح و کاهش چربی در محصولات غذایی در نظر گرفته می‌شوند (ویجارنپرچا و همکاران، ۲۰۲۱). امولژل‌ها سیستم-

هایی هستند که از تشکیل ژل در امولسیون تولید می‌شوند (گوتیرز-لونا و همکاران، ۲۰۲۲). آن‌ها به دو نوع آب در اولئوژل و روغن در هیدروژل دسته‌بندی می‌شوند؛ در امولژل آب در اولئوژل، قطرات آب (به‌عنوان فاز پراکنده) در اولئوژل (به‌عنوان فاز پیوسته) پخش شده‌اند (پیتو و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین امولژل‌های آب در اولئوژل، روغن را بدون تغییر در خواص شیمیایی آن به ساختار ژلی تبدیل می‌کنند و همچنین به دلیل این‌که بخشی فرمولاسیون آن‌ها را آب تشکیل می‌دهد، سیستم‌هایی کم‌کالری هستند. معمولاً در تولید امولژل‌های آب در اولئوژل، موم‌های مختلف به‌عنوان پایدارکننده استفاده می‌شوند و خواص فیزیکی و شیمیایی این امولژل‌ها، به ترکیب شیمیایی موم‌ها، نوع روغن و شرایط فرآیند تولید بستگی دارد (جنونگ و همکاران، ۲۰۲۳). با این حال استفاده از موم‌ها به تنهایی، به‌عنوان عامل پایداری چالش‌برانگیز است. بنابراین شناسایی امولسیفایرهای مناسب برای ایجاد سیستم‌های پایدار حائز اهمیت است (ویجارنپرچا و همکاران، ۲۰۲۱). گلیسرول مونواسترات‌های یک سورفکتانت آب‌گریز، غیریونی و با وزن مولکولی پایین است و می‌تواند به‌عنوان یک امولسیفایر یا حتی اولئوژلاتور عمل کند (جنونگ و همکاران، ۲۰۲۱). مافین یکی از محبوب‌ترین فراورده‌های نانوائی است که به دلیل بافت نرم و طعم مطلوب، مصرف بالایی دارد و از آرد، شکر، چربی (مانند مارگارین و شورتینگ) و تخم‌مرغ به‌دست می‌آید (بانو و همکاران، ۲۰۲۳؛ گیاکوموزی و همکاران، ۲۰۲۲). با این حال، مافین‌ها با داشتن ۱۵ تا ۲۰٪ چربی، محصولاتی پرچرب محسوب می‌شوند؛ به‌همین دلیل، مصرف زیاد آن‌ها می‌تواند به‌آسانی منجر به عبور از میزان توصیه‌شده‌ی روزانه‌ی چربی شود (انگ و همکاران، ۲۰۲۱). با وجود پتانسیل بالای امولژل‌های آب در اولئوژل برای بهبود پروفایل تغذیه‌ای و حسی، تحقیقات در مورد استفاده از آن‌ها در فراورده‌های نانوائی محدود بوده و بیشتر مطالعات بر روی امولژل‌های روغن در هیدروژل (چن و همکاران، ۲۰۱۵؛ گوتیرز-لونا و همکاران، ۲۰۲۰؛ بانو و همکاران، ۲۰۲۳) متمرکز بوده‌اند. این در حالی

1- World health organization

2- Food and agriculture organization

امولسیفایر گلیسرول مونواستئارات (GMS) با غلظت ۱٪ وزنی/وزنی، در روغن آفتاب‌گردان پرس سرد به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب °C ۸۰ به دست آمدند. سپس آب مقطر هم‌دمای (۲۵٪ وزنی) به آن‌ها اضافه شده و هموژنیزاسیون (توسط هموژنایزر Mtops-SR30، کره‌ی جنوبی) در دمای °C ۵۰ به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۱۲۰۰۰ rpm انجام گردید. امولژل‌های حاصل بعد از رسیدن به دمای محیط، برای انجام آزمون‌ها در دمای °C ۵ نگهداری شدند. فرمولاسیون امولژل‌های بر پایه‌ی موم زنبور عسل (BWE)، موم زنبور عسل با امولسیفایر (BWGE)، موم سبوس برنج (RWE) و موم سبوس برنج با امولسیفایر (RWGE) در جدول ۱ ارائه شده است.

Table 1. Formulation of emulgels

| Composition (g) | BWE   | BWGE | RWE   | RWGE |
|-----------------|-------|------|-------|------|
| Beeswax         | 6.75  | 6.75 | -     | -    |
| Rice bran wax   | -     | -    | 6.75  | 6.75 |
| GMS             | -     | 0.75 | -     | 0.75 |
| Sunflower oil   | 68.25 | 67.5 | 68.25 | 67.5 |
| Water           | 25    | 25   | 25    | 25   |

### بررسی ریز ساختار

مقدار کمی از نمونه‌هایی که به مدت ۲۴ ساعت در دمای °C ۵ نگهداری شده بودند، روی یک لام قرار داده شده و توسط لامل پوشانده شدند. سپس با استفاده از یک میکروسکوپ نوری (صا ایران، ایران) مجهز به دوربین و نرم‌افزار Image viewer، در دمای اتاق و با عدسی شیئی ۱۰۰ عکس‌برداری شده و مورد بررسی قرار گرفتند (ویجارنپرچا و همکاران، ۲۰۱۹a).

### ارزیابی سفتی

برای ارزیابی سفتی نمونه‌ها از دستگاه Sanaf Tensile Tester-SUT 25N استفاده شد. مشابه روش بولدو و همکاران (۲۰۱۶) از آزمون پس‌اکستروژن<sup>۱</sup> استفاده شد. به این ترتیب نمونه‌ها بلافاصله بعد از تولید به قالب‌هایی با ۲۷ mm قطر و

است که حضور روغن به عنوان فاز پیوسته در امولژل‌های آب در اولئوژل می‌تواند خواص حسی مطلوب‌تری مشابه چربی سنتی در محصول ایجاد کند (ژنگ و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین هدف این مطالعه در مرحله‌ی اول، تولید و بهینه‌سازی امولژل‌های پایدار از نوع آب در اولئوژل با استفاده از موم زنبور عسل، موم سبوس برنج و گلیسرول مونواستئارات (به عنوان امولسیفایر) و سپس بررسی و مقایسه‌ی امولژل‌های تولید شده بود. در نهایت از امولژل‌های انتخاب شده به عنوان جایگزین چربی (۲۵٪ وزنی) در مافین شکلاتی استفاده شد و تأثیر آن بر ویژگی‌های کیفی و حسی محصول نهایی مورد ارزیابی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

#### مواد استفاده شده

از گلیسرول مونواستئارات، پتاسیم یدید و نشاسته‌ی گندم شرکت مرک (آلمان) استفاده شد. موم سبوس برنج از شرکت H&B Oils Center Co و موم زنبور عسل از عطاری (ایران، تبریز) و روغن آفتاب‌گردان پرس سرد از برند بروج (ایران، مشهد) خریداری شدند. هگزان، تیوسولفات آمونیوم، اسید استیک و کلروفرم شرکت مجللی (ایران) مورد استفاده قرار گرفت.

#### آزمون‌های امولژل

#### آماده‌سازی امولژل

ابتدا طبق پژوهش‌های پیشین غلظت‌های ۳، ۶ و ۹٪ وزنی/وزنی (نسبت به فاز روغنی) برای اولئوژلاتور، ۲۵ و ۵۰٪ وزنی/وزنی (نسبت به کل امولژل) برای آب و ۰/۵ و ۱٪ وزنی/وزنی (نسبت به فاز روغنی) برای امولسیفایر مورد ارزیابی گرفت. در نهایت غلظت امولسیفایر، اولئوژلاتورها و درصد فاز آبی نمونه‌های پایدار به عنوان غلظت بهینه انتخاب گردید. سپس امولژل‌ها مشابه روش پاندولسوک و کوپنگساک (۲۰۱۷) تولید شدند. به این ترتیب ابتدا اولئوژل‌ها با حرارت دادن اولئوژلاتورهای موم زنبور عسل و سبوس برنج (۹٪ وزنی/وزنی) با یا بدون

بعد، محلول با پتاسیم یدید اشباع مخلوط شده و به مدت ۱ دقیقه در مکان تاریک نگهداری شد. در انتها پس از اضافه کردن آب مقطر و محلول نشاسته‌ی ۱ درصد، با تیوسولفات سدیم  $N/0.1$ ، تیتراسیون انجام شد. معادله‌ی زیر برای محاسبه‌ی عدد پراکسید استفاده شد.

$$PV(\text{meq } O_2/\text{kg oil}) = \frac{(T - C) \times N \times 1000}{M}$$

T: حجم تیوسولفات سدیم مصرفی برای تیتراسیون محلول حاوی نمونه، C: حجم تیوسولفات سدیم مصرفی برای تیتراسیون شاهد، M: وزن روغن و N: نرمالیه تیوسولفات سدیم

### آزمون‌های مافین شکلاتی

#### روش تهیه‌ی مافین شکلاتی

مافین‌ها با اعمال تغییراتی در روش ارائه‌شده توسط گیاکوموزی و همکاران (۲۰۲۳) تولید شدند. طبق جدول چهار فرمولاسیون مختلف بر اساس نوع چربی تهیه گردید: (۱) نمونه شاهد (تهیه‌شده با ۱۰۰٪ مارگارین) و (۲) طبق نتایج آزمون‌های انجام‌شده برای امولژل‌ها، نمونه‌های BWE، BWGE و RWGE انتخاب و با توجه به پیش‌تست‌های انجام‌شده، جایگزین ۲۵٪ از مارگارین مورد استفاده در فرمولاسیون مافین-های شکلاتی شدند. به این ترتیب ابتدا، تخم مرغ و وانیل با استفاده از یک همزن برقی به مدت ۲/۵ دقیقه با دور متوسط مخلوط گردیدند. سپس شکر به مخلوط افزوده شد و عملیات هم‌زدن به مدت ۲ دقیقه دیگر ادامه یافت تا یک مخلوط یکنواخت و خامه‌ای حاصل شود. در مرحله‌ی بعد، چربی (مارگارین برای نمونه‌ی شاهد یا ترکیب مارگارین و امولژل برای تیمارها) به مخلوط اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه دیگر هم‌زدن ادامه یافت. سپس، شیر به مخلوط اضافه شد. در نهایت، مخلوط مواد خشک شامل آرد، پودر کاکائو، نمک و بیکنینگ پودر که از قبل سه مرتبه الک شده بود، به تدریج و با دور پایین هم‌زن به خمیر اضافه و تا زمانی که ذرات خشک ناپدید شده و خمیر یکنواختی به دست آید، مخلوط گردید. پس از آماده‌سازی خمیر، به میزان ۴۵ گرم از آن وزن شده و در

۲۰mm ارتفاع ریخته شده و در دمای  $5^\circ\text{C}$  نگهداری شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در دمای  $25^\circ\text{C}$  نگهداری شده و توسط یک پروب با قطر ۲۵ mm فشرده شدند. آزمون با سرعت  $1\text{ mm.s}^{-1}$  و با فشردن تا ۵۰٪ ارتفاع اولیه‌ی نمونه‌ها انجام شد و نقطه‌ی اوج نمودار نیرو-جاب‌جایی هر نمونه به-عنوان سفتی در نظر گرفته شد.

### بررسی رفتار حرارتی

برای ارزیابی رفتار حرارتی امولژل‌ها از روش ژنگ و همکاران (۲۰۲۲) با اندکی تغییرات استفاده شد. به این منظور روش گرماسنجی پویشی تفاضلی (DSC) توسط دستگاه DSC-400 (صناف، ایران) مورد استفاده قرار گرفت. ۱۰ میلی‌گرم از هر نمونه در ظرف آلومینیومی (پن) توزین شد و به همراه یک پن فاقد نمونه به عنوان مرجع در دستگاه قرار داده شد. نمونه‌ها در محدوده‌ی دمایی  $25^\circ\text{C}$  تا  $110^\circ\text{C}$  با سرعت گرمایش  $1^\circ\text{C.min}^{-1}$  ۱۰ حرارت داده شدند. در نهایت ترموگرام ذوب نمونه‌ها ثبت شده و مورد بررسی قرار گرفت.

### ظرفیت نگهداری حلال (SHC)

ظرفیت نگهداری حلال (آب و روغن) برای امولژل‌ها توسط سانتریفیوژ یخچال‌دار VS-180CFI (Vision, South Korea) و روش مارتینز و همکاران (۲۰۲۳) (با اندکی تغییر) مورد بررسی قرار گرفت. به این ترتیب نمونه‌ها بلافاصله پس از تولید به میکروتیوب ۲ میلی‌لیتری منتقل شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای  $5^\circ\text{C}$  نگهداری شدند. سپس با سرعت rpm ۱۰۰۰۰ به مدت ۱۵ دقیقه در دمای  $25^\circ\text{C}$  سانتریفیوژ شدند. در انتها میکروتیوب‌ها برگردانده شدند و حلال آزادشده توسط کاغذ صافی جذب شد. درصد SHC با تقسیم وزن حلال آزادشده بر وزن اولیه‌ی امولژل، ضرب در ۱۰۰ محاسبه شد.

### عدد پراکسید

عدد پراکسید نمونه‌ها با استفاده از روش American Oil Chemists' Society (۲۰۱۷) به شماره‌ی cd8-53 اندازه-گیری شد. ابتدا به هر کدام از روغن‌های استخراج‌شده از امولژل‌ها (توسط هگزان) و روغن آفتاب‌گردان پرس سرد، محلول ۳ به ۲ اسید استیک و کلروفرم اضافه شد. در مرحله‌ی

به مدت ۱ ساعت در دمای اتاق خنک شدند. سپس برای انجام آزمون‌ها، مورد استفاده قرار گرفتند.

قالب‌های کاغذی مافین قرار گرفت. پخت نمونه‌ها در فری که از قبل در دمای  $165^{\circ}\text{C}$  گرم شده بود، به مدت ۲۰ دقیقه و با فن روشن انجام شد. پس از پخت، مافین‌ها از فر خارج شده و

**Table 2. Formulations of chocolate muffins**

| Name    | BWE (g) | BWGE (g) | RWGE (g) | Margarine (g) | Flour (g) | Cocoa Powder (g) | Sugar (g) | Milk (g) | Egg (g) | Vanil (g) | Baking Powder (g) | Salt (g) |
|---------|---------|----------|----------|---------------|-----------|------------------|-----------|----------|---------|-----------|-------------------|----------|
| Control | -       | -        | -        | 65            | 170       | 40               | 120       | 180      | 50      | 1         | 10                | 0.75     |
| BWE-M   | 16.25   | -        | -        | 48.75         | 170       | 40               | 120       | 180      | 50      | 1         | 10                | 0.75     |
| BWGE-M  | -       | 16.25    | -        | 48.75         | 170       | 40               | 120       | 180      | 50      | 1         | 10                | 0.75     |
| RWGE-M  | -       | -        | 16.25    | 48.75         | 170       | 40               | 120       | 180      | 50      | 1         | 10                | 0.75     |

ارزیابی شد. نمونه‌های مافین جهت ارزیابی، به صورت تصادفی در اختیار ارزیاب‌ها قرار گرفتند (دال و همکاران، ۲۰۲۳).

#### آنالیز آماری

این مطالعه در قالب یک طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. به منظور بررسی وجود اختلاف آماری معنی دار، داده‌ها توسط آنالیز واریانس یک طرفه و مقایسه‌ی میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح اطمینان ۹۵٪ ( $p < 0.05$ ) تحلیل شدند. تمامی محاسبات آماری با نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۷ انجام شد.

#### نتایج و بحث

##### بررسی ریزساختار

خواص ماکروسکوپی امولژل‌ها تا حد زیادی به ریزساختار آن‌ها وابسته است (ویجارنپرچا و همکاران، ۲۰۲۱). شکل ۱ تصاویر حاصل از میکروسکوپ نوری امولژل‌ها را نشان می‌دهد. طبق انتظار هر چهار نمونه آب در اولئوژل بودند که با مطالعه‌ی واگنر و داویدوویچ-پینهایس (۲۰۲۴) مطابقت داشت. به طور کلی مکانیسم تشکیل امولژل‌های آب در اولئوژل شامل سه حالت می‌باشد: (۱) تولید امولسیون پیکرینگ: زمانی که اولئوژلاتور دارای خاصیت فعالیت سطحی باشد در لایه‌ی بین سطحی (سطح مشترک آب و روغن) قرار گرفته و مانند یک ذره‌ی پیکرینگ عمل می‌کند و موجب ایجاد یک مانع فیزیکی شده و از هم آمیختن قطرات و ناپایداری امولسیون جلوگیری می‌کند.

#### آزمون فشردن

برای ارزیابی سفتی پس از رسیدن مافین‌ها به دمای محیط، آزمون فشردن توسط دستگاه Tensile Tester-SUT 25N انجام شد. به این ترتیب از یک پروب استوانه‌ای با قطر ۴۵mm استفاده شد. نمونه‌ها با ارتفاع ۲۳mm و قطر ۳۰mm تا ۷۵٪ ارتفاع اولیه‌ی خود با سرعت  $1\text{ mm.s}^{-1}$  فشرده شدند. حداکثر نیروی ثبت شده در منحنی نیرو-جابجایی به عنوان سفتی در نظر گرفته شد (احسن و همکاران، ۲۰۲۵).

#### درصد رطوبت

میزان رطوبت مافین‌ها با استفاده از روش آون هوای داغ اندازه‌گیری شد. به این ترتیب حدود ۲ گرم از هر نمونه در پلیت شیشه‌ای توزین شد و در آون با دمای  $105^{\circ}\text{C}$  تا رسیدن به وزن ثابت خشک گردید. نمونه‌ها پس از خروج از آون، به مدت ۳۰ دقیقه در دسیکاتور خنک و سپس توزین شدند. درصد رطوبت از طریق معادله‌ی زیر محاسبه شد (انگ و همکاران، ۲۰۲۱).

$$\text{درصد رطوبت (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_s} \times 100$$

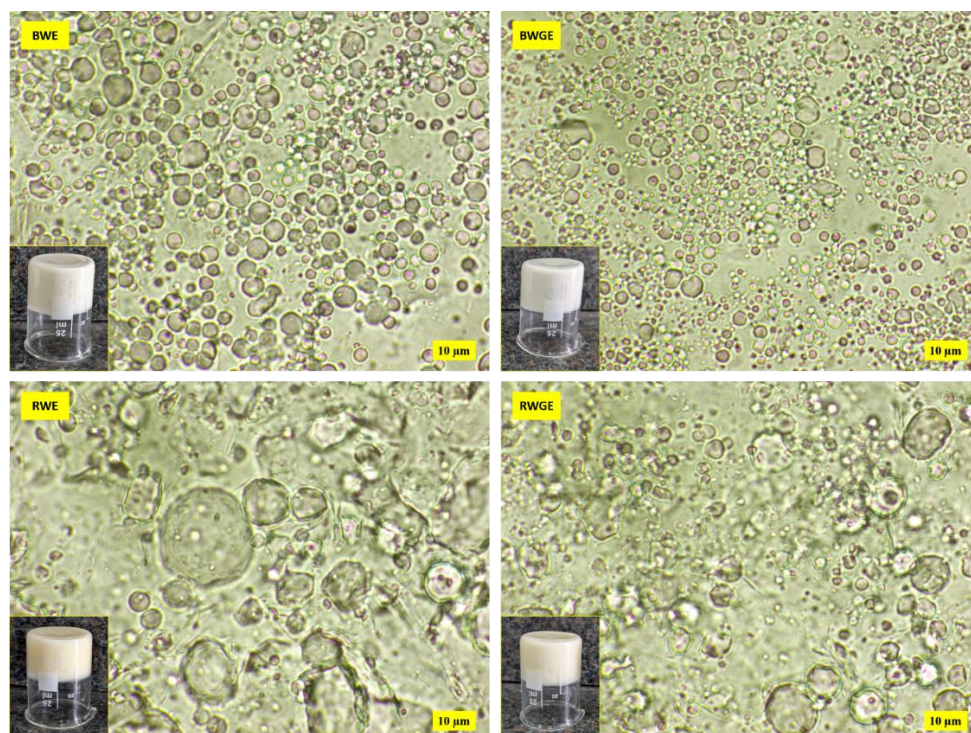
$W_1$ : وزن اولیه‌ی پلیت با نمونه،  $W_2$ : وزن پلیت با نمونه پس از خشک شدن،  $W_s$ : وزن اولیه‌ی نمونه

#### ارزیابی حسی هدونیک

ویژگی‌های حسی (بافت، رنگ، طعم و پذیرش کلی) مافین‌ها توسط ۱۵ تا ۲۰ ارزیاب نیمه‌آموزش دیده و با استفاده از مقیاس هدونیک پنج نقطه‌ای (۱: بسیار نامطلوب و ۵: بسیار مطلوب)

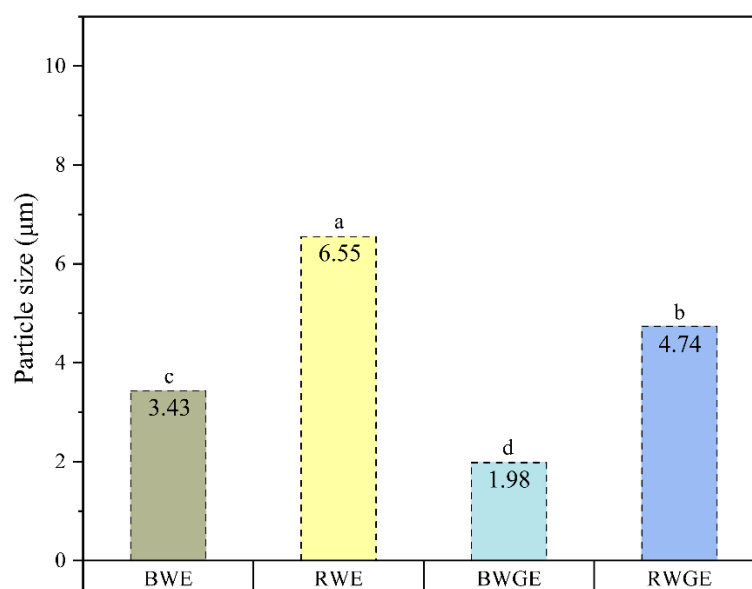
(۲) پایدار کردن از طریق تشکیل شبکه: در اولئوژلاتورها کریستال‌هایی که خاصیت فعالیت سطحی ندارند در غلظت‌های بالا پس از سرد شدن یک شبکه‌ی سه‌بعدی تشکیل می‌دهند که باعث افزایش ویسکوزیته‌ی فاز پیوسته شده و قطرات را در بر می‌گیرند. (۳) وقوع همزمان دو حالت قبلی (پناگوس و همکاران، ۲۰۲۳). به بیان دیگر ساختار یک سیستم آب در اولئوژل، به نوع و میزان برهم‌کنش‌های بین قطرات آب و اولئوژل (فاز پیوسته) بستگی دارد. زمانی که قطرات آب با شبکه‌ی اولئوژل برهم‌کنش مناسبی ایجاد کرده باشند می‌توان نتیجه گرفت که به‌عنوان پرکننده‌های فعال عمل کرده‌اند. در مقابل زمانی قطرات آب به‌عنوان پرکننده‌های غیرفعال در نظر گرفته می‌شوند که برهم‌کنش کمی با اولئوژل داشته و یا هیچ برهم‌کنشی نشان نمی‌دهند و بنابراین موجب کاهش استحکام اولئوژل می‌شوند (ویجارنپرچا و همکاران، ۲۰۱۹a). تصاویر میکروسکوپی نشان دادند که کریستال‌های موم‌ها ممکن است از طریق کریستالیزاسیون فاز پیوسته و همچنین قرار گرفتن در سطح مشترک موجب تشکیل اولئوژل‌ها شده و بنابراین مکانیسم تشکیل آن‌ها احتمالاً از حالت سوم پیروی می‌کند که با مطالعه‌ی دو و همکاران (۲۰۲۴) مطابقت داشت. با توجه به شکل ۱ و ۲ اولئوژل بر پایه‌ی موم زنبور عسل میانگین اندازه‌ی قطرات کوچک‌تر (۳/۴۳ میکرومتر) با توزیع یکنواخت‌تری را نسبت به اولئوژل بر پایه‌ی موم سبوس برنج نشان داد که می‌توان به تفاوت در ترکیب شیمیایی موم‌ها (داشتن عوامل فعال سطحی مانند اسیدهای چرب و الکل‌های چرب بیشتر) نسبت داد (پناگوس و همکاران، ۲۰۲۳). به‌طوری‌که موم زنبور عسل دارای ۸-۹٪ اسیدهای چرب آزاد و ۶-۷٪ الکل چرب آزاد است؛ درحالی‌که اسیدها و الکل‌های چرب آزاد در موم سبوس برنج به‌ترتیب ۰-۲٪ و به‌مقدار بسیار پایین وجود دارند (دیماکوپولو-پاپازوگلو و همکاران، ۲۰۲۳). ژنگ و همکاران (۲۰۲۳) نیز در مطالعه‌ی خود کاهش اندازه‌ی قطرات فاز پیوسته را با افزایش درصد موم زنبور عسل مرتبط دانسته و آن را به اسیدهای چرب، الکل‌های چرب و استرهای مومی موجود در موم نسبت دادند که به‌عنوان امولسیفایر کمکی عمل می‌کنند. در مقابل در اولئوژل بر پایه‌ی موم سبوس برنج میانگین اندازه‌ی قطرات بزرگ‌تر بود (۶/۵۵

میکرومتر) و توزیع پراکنده‌ای داشتند. همچنین کریستال‌های بزرگ سوزنی‌شکل نیز قابل مشاهده بود که در مقایسه با کریستال‌های ریز موم زنبور عسل عملکرد پایینی به‌عنوان ذرات پیکرینگ داشتند؛ زیرا اندازه‌ی کریستال‌ها باید بسیار کوچک‌تر از اندازه‌ی قطرات آب باشد تا توانایی جذب در سطح مشترک آب و روغن فراهم شود (گو و همکاران، ۲۰۲۳b). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که قطرات آب در اولئوژل بر پایه‌ی موم زنبور عسل، به‌عنوان یک پرکننده‌ی فعال و در اولئوژل بر پایه‌ی موم سبوس برنج به‌عنوان پرکننده‌های غیر فعال عمل کرده‌اند. پناگوس و همکاران (۲۰۲۳) قطرات آب اولئوژل‌های بر پایه‌ی موم زنبور عسل را به‌عنوان پرکننده‌های غیر فعال معرفی کردند و پایداری این اولئوژل را به شبکه‌ی اولئوژل نسبت دادند. ازسوی دیگر طبق شکل ۱ و ۲ با اضافه‌شدن گلیسرول مونواستئارات به اولئوژل‌ها، اندازه‌ی قطرات آب ریزتر شدند (با میانگین ۱/۹۸ میکرومتر در BWGE و ۴/۷۴ میکرومتر در RWGE) که با مطالعه‌ی گو و همکاران (۲۰۲۳a) مطابقت داشت. همچنین تورو-واکز و همکاران (۲۰۱۳) کاهش اندازه‌ی قطرات آب را در اولئوژل‌های بر پایه‌ی موم کاندلیلا، با افزایش غلظت مونوگلیسرید (به‌عنوان امولسیفایر) گزارش دادند. گلیسرول مونواستئارات به‌دلیل خاصیت دوگانه‌دوستی در مقایسه با کریستال‌های موم بیشتر بر سطح قطرات جذب شده و از هم‌آمیختن قطرات جلوگیری می‌کند (ویجارنپرچا و همکاران، ۲۰۱۹a). در مطالعه‌ی دیگری از ویجارنپرچا و همکاران (۲۰۱۹b) نیز در اولئوژل‌هایی که فقط از موم سبوس برنج استفاده شده بود، اندازه‌ی قطرات آب بزرگ‌تر بودند. با اضافه‌شدن پلی‌گلیسرول پلی‌ریسینولات (PGPR) به فرمولاسیون کریستالیزاسیون موم سبوس برنج در سطح مشترک آب و روغن کاهش یافت که به‌دلیل خاصیت فعالیت سطحی بالای PGPR بود که به‌جای استرهای مومی، در سطح مشترک قرار می‌گرفت. در نتیجه استفاده‌ی همزمان از موم و PGPR ایجاد یک شبکه‌ی کریستالی مومی، حرکت قطرات آب را محدود کرده و موجب پایداری سیستم شد.



**Figure 1. Visual appearance and microscopic images of emulgels based on beeswax (BWE), beeswax with glycerol monostearate (BWGE), rice bran wax (RWE), and rice bran wax with glycerol monostearate (RWGE)**

\*All images were captured in 1000× magnification



**Figure 2. Particle size of emulgels based on beeswax (BWE), rice bran wax (RWE), beeswax with glycerol monostearate (BWGE), and rice bran wax with glycerol monostearate (RWGE)**

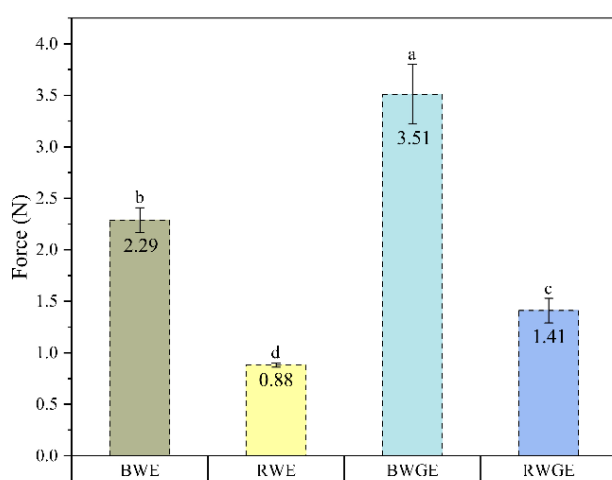
\*Different letters the indicator Significant difference It is between samples (Duncan's test,  $p < 0.05$ )

#### ارزیابی سفتی

۲۰۲۵). سفتی به حداکثر نیروی به دست آمده در طی آزمون (پس اکستروژن) گفته می‌شود که نشان‌دهنده‌ی قدرت ژل است (واگنر و داویدوویچ-پینها، ۲۰۲۴). این آزمون برای مقایسه-

از خواص مکانیکی مهم امولژل‌ها می‌توان به سفتی اشاره کرد که تاثیر زیادی بر بافت محصول نهایی دارد (ژو و همکاران،

از تقویت عوامل مطرح شده و در نتیجه ریزتر شدن اندازه‌ی قطرات آب بود. به‌طوری که ژنگ و همکاران (۲۰۲۳) نیز در پژوهش خود سفت‌تر شدن امولژل‌ها را با ریزتر شدن اندازه‌ی ذرات پراکنده مرتبط دانستند. همچنین امولژل‌های مورد مطالعه‌ی ژنگ و همکاران (۲۰۲۲)، با افزودن گلیسرول مونواستئارات به مقدار ۲٪ وزنی، سفت‌تر شدند که ناشی از افزایش قدرت اتصال شبکه‌های اولئوژل و در نتیجه تقویت مقاومت آن‌ها در برابر تغییر شکل بود.



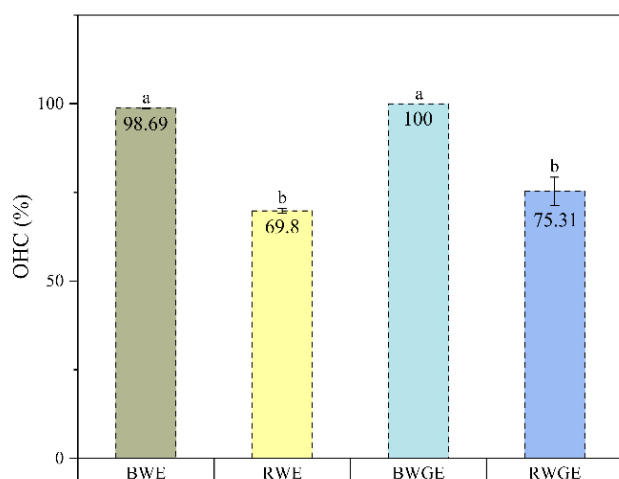
**Figure 3. Firmness values of emulgels based on beeswax (BWE), rice bran wax (RWE), beeswax with glycerol monostearate (BWGE), and rice bran wax with glycerol monostearate (RWGE)**

\*Different letters the indicator Significant difference It is between samples (Duncan's test,  $p < 0.05$ ).

### ظرفیت نگهداری حلال

ترکیب دو فاز آب و روغن به‌طور بالقوه می‌تواند منجر به ناپایداری امولژل‌ها شود؛ بنابراین بررسی پایداری آن‌ها حائز اهمیت است (واگنر و داویدوویچ-پینها، ۲۰۲۴). ظرفیت نگهداری حلال (آب و روغن) بیانگر پایداری فیزیکی امولژل‌ها بوده و نشان‌دهنده‌ی توانایی شبکه‌ی ژلی آن‌ها در حفظ آب و روغن است (ژو و همکاران، ۲۰۲۵). بنابراین برای ارزیابی پایداری امولژل‌ها این آزمون توسط دستگاه سانتیفریوژ انجام شد. با وجود ۲۵٪ آب در فرمولاسیون هر چهار امولژل، هیچ آبی از نمونه‌ها خارج نشد که می‌توان با نیروهای موئینگی قوی

ی امولژل‌های بر پایه‌ی دو موم زنبور عسل و سبوس برنج و همچنین بررسی تاثیر گلیسرول مونواستئارات بر سفتی آن‌ها، انجام شد. طبق شکل ۳ سفتی هر چهار نمونه در بازه‌ی ۰/۸۸ تا ۳/۵۱ N قرار گرفت و همه‌ی نمونه‌ها با یک‌دیگر اختلاف معنی‌دار داشتند ( $p < 0.05$ ). امولژل بر پایه‌ی موم زنبور عسل (BWE) سفت‌تری از امولژل بر پایه‌ی موم سبوس برنج (RWE) داشت. تراکم شبکه‌ی سه‌بعدی امولژل‌ها به‌طور مستقیم بر سفتی آن‌ها تاثیر می‌گذارد (ژو و همکاران، ۲۰۲۵). بنابراین طبق بحث‌های انجام‌شده در بخش بررسی ریزساختار، می‌توان نتیجه گرفت که دلیل سفتی بیشتر امولژل بر پایه‌ی موم زنبور عسل، تراکم بیشتر شبکه‌ی ژلی آن بود. این تراکم ناشی از اندازه‌ی ریزتر کریستال‌ها (گائو و وو، ۲۰۲۰) و همچنین خاصیت فعالیت سطحی بیشتر آن‌ها بود که با قرار گرفتن بیشتر در سطح مشترک آب و روغن و همچنین تشکیل شبکه‌ی پایدارتر در فاز پیوسته نسبت به کریستال‌های موم سبوس برنج، موجب جلوگیری از هم‌آمیختن قطرات آب شده و شبکه‌ی ژل را تقویت کردند (دو و همکاران، ۲۰۲۴). وی و همکاران (۲۰۲۵) نیز استحکام امولژل‌های آب در روغن را در مطالعه‌ی خود به دو عامل وجود شبکه‌ی کریستالی در فاز پیوسته و لایه-ی کریستالی در اطراف قطرات آب نسبت دادند. درحالی‌که واگنر و داویدوویچ-پینها (۲۰۲۴)، علاوه بر این دو عامل، به نقش مولکول‌های دی‌آسیل گلیسرول (اولئوژلاتور) در عمل به-عنوان جایگاه‌های هسته‌زایی برای کریستالیزاسیون ناهمگون در سطح مشترک آب و روغن، هنگام سرد شدن اشاره کردند که به ایجاد شبکه‌ی کریستالی در فاز پیوسته کمک می‌کند. همچنین با تکیه بر مطالعه‌ی ویجارنپرچا و همکاران (۲۰۱۹b)، نرم‌تر بودن امولژل بر پایه‌ی موم سبوس برنج را می‌توان به قطرات آب بزرگ با توزیع نامنظم و پراکنده نسبت داد که به‌عنوان پرکننده‌های غیرفعال عمل کردند و بنابراین، منجر به کاهش استحکام کل ساختار امولژل شدند. ازسوی دیگر اندازه‌ی قطرات آب یک شاخص مهم برای ارزیابی خواص مکانیکی امولژل‌ها است (گو و همکاران، ۲۰۲۳a). به‌طوری که با توجه به شکل ۳ می‌توان نتیجه گرفت که اضافه‌شدن گلیسرول مونواستئارات به امولژل‌ها موجب افزایش سفتی شد که ناشی



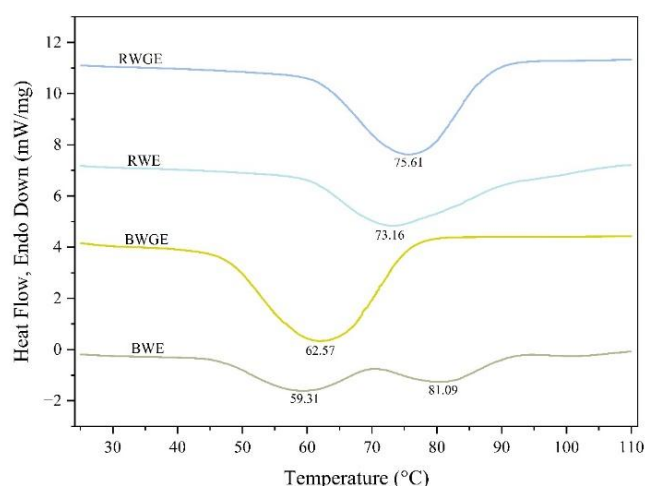
**Figure 4. Oil holding capacity of emulgels based on beeswax (BWE), rice bran wax (RWE), beeswax with glycerol monostearate (BWGE), and rice bran wax with glycerol monostearate (RWGE)**

\*Different letters the indicator Significant difference It is between samples (Duncan's test,  $p < 0.05$ ).

#### گرماسنجی پویشی تفاضلی

گرماسنجی پویشی تفاضلی (DSC) یک تکنیک رایج برای تحلیل رفتار حرارتی است (شپلی و مارانگونی، ۲۰۲۴). بنابراین برای بررسی و مقایسه‌ی رفتار ذوب امولژل‌ها از DSC استفاده شد. در شکل ۵ منحنی‌های ذوب امولژل‌ها ارائه شده است. طبق شکل ۵ در نمونه‌ی BWE دو پیک ذوب مشاهده شد که دمای پیک اول  $59/31^{\circ}\text{C}$  و پیک دوم  $81/09^{\circ}\text{C}$  بود و می‌توان به‌ترتیب به ذوب کریستال‌های موم زنبور عسل موجود در فاز پیوسته (واگنر و داویدوویچ-پینهاس، ۲۰۲۴) و کریستال‌های موجود در سطح مشترک آب و روغن (مانند الکل‌های چرب آزاد) نسبت داد. باین حال زمانی که گلیسرول مونواستئارات به این نمونه اضافه شد، تنها یک پیک ظاهر شد که ناشی از منظم‌تر شدن و همپوشانی دو پیک کریستال‌های موم بود (ژنگ و همکاران، ۲۰۲۲) و با مشاهدات ریزساختار در یک راستا بود. امولژل‌های بر پایه‌ی موم سبوس برنج هر دو یک پیک نشان دادند ( $73/16^{\circ}\text{C}$  و  $75/61^{\circ}\text{C}$ ) که مشابه با مطالعه‌ی گو و همکاران (۲۰۲۳b) بود. پیک مشاهده‌شده در این نمونه‌ها نیز با ذوب کریستال‌های موم سبوس برنج مرتبط بود. البته در نمونه‌ی RWE، پیک پهن‌تری مشاهده شد که بر خلاف نمونه‌ی

موجود در آن‌ها مرتبط دانست (ژنگ و همکاران، ۲۰۲۳). در مقابل، طبق شکل ۴ برخی نمونه‌ها جدا شدن روغن را نشان دادند. امولژل‌های بر پایه‌ی موم زنبور عسل (BWGE) و BWE با ظرفیت نگهداری روغن ۱۰۰ و ۹۸/۶۹٪، تفاوت معنی‌داری با دو امولژل بر پایه‌ی موم سبوس برنج (RWGE) داشتند ( $p < 0/05$ ). به‌طور کلی، توانایی نگهداری فاز مایع در ژل‌ها به ساختار میکروسکوپی شبکه‌ی ژلی و برهم‌کنش‌های درون ژل بستگی دارد (سو و همکاران، ۲۰۲۴) که در بخش بررسی ریزساختار مورد بحث قرار گرفت. همچنین در امولژل‌ها هر چقدر اندازه‌ی ذرات فاز پراکنده کوچک‌تر باشد، پایداری شبکه‌ی ژلی افزایش می‌یابد که به‌دلیل قرار گرفتن قطرات امولسیون به شکل متراکم‌تر در کنار هم است (وی و همکاران، ۲۰۲۵). بنابراین طبق تصاویر حاصل از میکروسکوپ نوری، برخلاف امولژل‌های بر پایه‌ی موم زنبور عسل، امولژل‌های بر پایه‌ی موم سبوس برنج به‌دلیل اندازه‌ی ذرات بزرگ‌تر و تراکم پایین، افت روغن بیشتری را نشان دادند. گو و همکاران (۲۰۲۳b) در مطالعه‌ی خود امولژل‌هایی با ۶ نوع موم تولید کردند و با بررسی و مقایسه‌ی ظرفیت نگهداری روغن آن‌ها، نتیجه گرفتند که امولژل‌های بر پایه‌ی موم زنبور عسل، آفتاب‌گردان و نیشکر، به‌دلیل اندازه‌ی قطرات ریزتر و یکنواخت‌تر، پایداری بیشتری بودند. ازسوی دیگر با وجود این‌که اضافه‌شدن گلیسرول مونواستئارات به امولژل‌ها اختلاف معنی‌دار نشان‌دهنده‌ی افزایش توانایی آن‌ها در حفظ روغن شد که به‌دلیل خاصیت فعالیت سطحی آن بود و با مطالعه‌ی ژنگ و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت داشت. به‌طوری که آن‌ها نتیجه گرفتند که گلیسرول مونواستئارات شبکه‌ی تشکیل‌شده توسط اتیل سلولز را اصلاح کرده و با متراکم‌تر کردن آن موجب افزایش ظرفیت نگهداری روغن می‌شود.



**Figure 5. Melting curves of emulgels based on beeswax (BWE), rice bran wax (RWE), beeswax with glycerol monostearate (BWGE), and rice bran wax with glycerol monostearate (RWGE)**

#### پراکسید

اکسیداسیون لیپیدها شامل سه مرحله‌ی آغاز، انتشار و پایان است. عدد پراکسید محصولات اکسیداسیون (هیدروپراکسیدها) در مراحل آغاز و انتشار را اندازه‌گیری می‌کند (اورهان و اروگلو، ۲۰۲۲) و به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی اکسیداسیون و کیفیت روغن مورد استفاده می‌گیرد (ماسوتا و همکاران، ۲۰۱۹). برای بررسی تاثیر ژلاسیون و امولسیفایر، این آزمون در روزهای ۱ و ۳۰ و در دمای ۲۵ °C انجام شد. عدد پراکسید امولژها با یکدیگر و با روغن آفتاب‌گردان خالص به‌عنوان نمونه‌ی شاهد، مورد مقایسه قرار گرفت. طبق جدول ۳ در روز یکم نمونه‌ی شاهد پایین‌ترین عدد پراکسید را داشت که می‌توان به شرایط مراحل تولید امولژ که شامل همزدن در حرارت ۵۰ °C به مدت ۸۰ دقیقه و سپس هموژنیزاسیون در دمای ۵۰ °C به مدت ۵ دقیقه است، نسبت داد (جئونگ و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین امولژهای بر پایه‌ی موم سبوس برنج، به‌مراتب عدد پراکسید بالاتری داشتند که احتمالاً به‌دلیل ناخالصی‌هایی مانند اسیدهای چرب آزاد بود که باعث پیشرفت اکسیداسیون شد (پاندولسوک و کوپانگساک، ۲۰۱۹). پس از گذشت ۳۰ روز همه‌ی امولژها عدد پراکسید پایین‌تری از نمونه‌ی شاهد نشان دادند که با مطالعه‌ی سو و همکاران (۲۰۲۴) مطابقت داشت و ناشی از وجود شبکه‌ی سه‌بعدی تشکیل‌شده توسط

BWE، پیک‌ها از هم جدا نشدند که می‌توان به پایین بودن غلظت عوامل فعال سطحی مانند الکل‌های چرب آزاد در موم سبوس برنج (دیماکوپولو-پاپازوگلو و همکاران، ۲۰۲۳) نسبت داد. در هر دو نوع امولژ اضافه‌شدن گلیسرول مونواستئارات، موجب افزایش عمق پیک ذوب و انتقال آن به دماهای بالاتر و بنابراین افزایش پایداری حرارتی نمونه‌ها شد که ناشی از خاصیت فعالیت سطحی آن بود که توسط ایجاد برهم‌کنش با کریستال‌های موم، موجب ریزتر شدن قطرات فاز پراکنده و متراکم‌تر شدن شبکه‌ی ژلی شد (کانتراس-رامیرز و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین از آنجایی که اضافه‌شدن ۱٪ وزنی گلیسرول مونواستئارات به فرمولاسیون موجب افزایش ماده‌ی جامد در فاز روغن می‌شود، احتمالاً دلیل دیگر افزایش دمای پیک باشد. به‌طوری که گو و همکاران (۲۰۲۳b) نیز بالاتر رفتن دمای پیک ذوب را با افزایش غلظت موم سبوس برنج، گزارش دادند. در مقابل تورو-واسکز و همکاران (۲۰۱۳)، با مطالعه‌ی رفتار حرارتی امولژهای بر پایه‌ی موم کاندلیلا و مونوگلیسرید، نتیجه گرفتند که افزایش درصد مونوگلیسرید به اندازه‌ی موم کاندلیلا در افزایش دمای ذوب امولژ مؤثر نبود و بنابراین هیچ برهم‌کنش مولکولی بین موم کاندلیلا و مونوگلیسرید وجود نداشت. ازسوی دیگر دمای پیک ذوب موم زنبور عسل، موم سبوس برنج و گلیسرول مونواستئارات خالص به‌ترتیب ۶۱ و ۷۹ و ۵۹ °C بود و طبق مطالعات حل کردن آن‌ها در روغن، به‌دلیل رقیق‌شدن، موجب انتقال دمای پیک ذوب به دماهای پایین‌تر می‌شود (ویجارنپرچا و همکاران، ۲۰۱۹a). با این وجود در امولژها فقط در نمونه‌ی BWGE، دمای پیک بالاتری از موم و گلیسرول مونواستئارات خالص مشاهده شد که احتمالاً در این نمونه علاوه‌بر نقش گلیسرول مونواستئارات، افزودن آب نیز موجب تشکیل ساختار متراکم‌تر شده بود که با نتایج آزمون سفتی و ظرفیت نگهداری حلال در یک راستا بود. به‌طوری که ونگ و همکاران (۲۰۲۲) نیز افزایش دمای پیک ذوب را به‌دلیل تشکیل شبکه‌ی متراکم با اضافه‌شدن آب به اولئوژل‌های بر پایه‌ی موم کاندلیلا و نشاسته‌ی سیب‌زمینی مشاهده کردند.

### محتوای رطوبت مافین

رطوبت یک شاخص کیفی مهم است و به‌عنوان درصد آب موجود در بافت کیک تعریف می‌شود (انگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ دال و همکاران، ۲۰۲۴). طبق جدول ۴ رطوبت مافین‌ها در بازه‌ی ۲۲/۱۵ تا ۲۶/۹۳ قرار گرفت که مشابه بازه‌ی مشاهده‌شده در مطالعه‌ی آزمون و همکاران (۲۰۲۳) بود. رطوبت مافین‌های تهیه‌شده از امولژل‌ها به‌طور معنی‌داری بالاتر از نمونه‌ی شاهد بود که می‌توان به وجود آب بیشتر در فرمولاسیون امولژل‌ها (۲۵٪) در مقایسه با مارگارین نسبت داد. به‌طور کلی استفاده از سیستم‌هایی مانند امولسیون‌ها به‌عنوان جایگزینی چربی یا روغن، منجر به ورود آب بیشتری به فرمولاسیون می‌شود (توتوسائوس و همکاران، ۲۰۲۴). مطالعات متعددی نیز این ارتباط را تایید کرده‌اند؛ برای مثال، مارتینز-کرورا و همکاران (۲۰۱۵) برای مافین‌های تولیدشده از امولسیون‌های سلولز اتر و بانو و همکاران (۲۰۲۳) برای مافین فرموله‌شده با امولسیون‌های بر پایه‌ی پروتئین. ازسوی دیگر مطابق با جدول رطوبت مافین‌های دارای امولژل نسبت به هم معنی‌دار نبود که با یکسان بودن درصد آب هر سه امولژل مرتبط است. بااین‌وجود دو مافین BWGE و RWGE رطوبت بالاتری از BWE داشتند. این امر می‌تواند به توانایی گلیسرول مونواستئارات به‌عنوان یک امولسیفایر در حفظ و نگهداری بهتر رطوبت در مافین نسبت داده شود. در راستای این نتیجه، دال و همکاران (۲۰۲۴) نیز رطوبت بالاتر در کوکی‌ها را به قابلیت نگهداری آب توسط امولسیفایر (اسپن ۸۰) در فرمولاسیون خود مرتبط دانستند.

### سفتی مافین

سفتی یک پارامتر مهم در بررسی بافت فراورده‌های نانوائی است که به حداکثر نیروی لازم برای فشردن محصول گفته می‌شود (دل مارکادو و همکاران، ۲۰۲۵). از اجزای مهم فرمولاسیون فراورده‌های نانوائی می‌توان به چربی اشاره کرد که تأثیر مستقیمی بر بافت این محصولات دارد (عثمان و همکاران، ۲۰۱۸؛ مارتینز-کرورا و همکاران، ۲۰۱۵). به‌طوری که با ممانعت از تشکیل شبکه‌ی گلوتهنی خمیر و همچنین حفظ جلوگیری از هم‌آمیختن حباب‌ها، باعث نرم‌تر شدن محصول نهایی می‌شود (انگ و همکاران، ۲۰۲۱). مطابق با جدول ۴

اولئوژلاتورها بود. این شبکه‌ی ژلی در امولژل‌ها از تماس مستقیم عوامل اکسیدکننده با قطرات روغن آفتاب‌گردان (سرشار از اسیدهای چرب غیر اشباع) جلوگیری کرد (ژنگ و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین امولژل‌های دارای گلیسرول مونواستئارات عدد پراکسید پایین‌تری نسبت به نمونه‌های بدون آن نشان دادند که می‌توان به تشکیل ژل متراکم‌تر و سفت‌تر در حضور گلیسرول مونواستئارات نسبت داد که به‌عنوان مانع قوی‌تری در برابر اکسیداسیون عمل می‌کند. این یافته با تصاویر حاصل از میکروسکوب نوری مطابقت داشت. به‌طور کلی بعد از ۳۰ روز اعداد پراکسید امولژل‌ها از روند  $BWGE < BWE < RWGE < RWE$  پیروی می‌کرد که مطابق با نتایج آزمون سفتی بود. به‌طوری که سفت‌ترین نمونه (BWGE)، کمترین افزایش عدد پراکسید را نشان داد. ونگ و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ی خود عدد پراکسید پایین‌تری را برای امولژل در مقایسه با امولسیون پیکرینگ مشاهده کردند. آن‌ها گزارش دادند که در امولژل به‌دلیل تشکیل ژل توسط ژلاتین، سطح مشترک بین فاز روغن و آب کاهش یافته و از تماس هیدروپراکسیدهای لیپیدی با پرواکسیدان‌ها جلوگیری می‌شود. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت از آنجایی که استاندارد کدکس (۲۰۲۱)، عدد پراکسید زیر ۱۵ را برای روغن‌های پرس سرد قابل قبول می‌داند؛ بنابراین امولژل‌های تولیدشده با داشتن عدد پراکسید پایین‌تر، قابل استفاده برای سیستم‌های غذایی بودند.

**Table 3. Peroxide values of sunflower oil (SFO), emugels based on beeswax (BWE), beeswax with glycerol monostearate (BWGE), rice bran wax (RWE), and rice bran wax with glycerol monostearate (RWGE)**

| Name | Day 1             | Day 30             |
|------|-------------------|--------------------|
| SFO  | $2.69 \pm 0.08^c$ | $13.50 \pm 0.32^a$ |
| BWE  | $3.82 \pm 0.04^b$ | $6.27 \pm 0.08^c$  |
| BWGE | $3.59 \pm 0.08^b$ | $5.91 \pm 0.11^c$  |
| RWE  | $6.55 \pm 0.28^a$ | $9.19 \pm 0.27^b$  |
| RWGE | $6.3 \pm 0.18^a$  | $8.83 \pm 0.17^b$  |

**Table 4. Firmness values (N) and moisture content (%) of the chocolate muffins**

BWGE-M: Muffin with 25% emulgel based on beeswax and glycerol monostearate; BWE-M: Muffin with 25% emulgel based on beeswax; RWGE-M: Muffin with 25% emulgel based on rice bran wax and glycerol monostearate; Control: Muffin with 100% margarine

| Name    | Firmness                  | Moisture content          |
|---------|---------------------------|---------------------------|
| BWE-M   | 19.53 ± 0.64 <sup>c</sup> | 25.12 ± 0.92 <sup>a</sup> |
| BWGE-M  | 15.26 ± 0.21 <sup>d</sup> | 26.93 ± 0.54 <sup>a</sup> |
| RWGE-M  | 22.32 ± 1.33 <sup>b</sup> | 26.18 ± 0.25 <sup>a</sup> |
| Control | 27.92 ± 0.76 <sup>a</sup> | 22.15 ± 0.72 <sup>b</sup> |

\*Different letters the indicator Significant difference It is between samples (Duncan's test,  $p < 0.05$ ).

#### ارزیابی حسی مافین

ارزیابی‌های دستگاهی محصول، بینش‌های ارزشمندی را در مورد برخی از ویژگی‌های حسی ارائه می‌دهند، اما موفقیت واقعی محصول به نحوه‌ی تجربه‌ی آن توسط مصرف‌کنندگان بستگی دارد (دال و همکاران، ۲۰۲۴). شکل ۶ میانگین امتیاز هر پارامتر را برای مافین‌های شکلاتی نشان می‌دهد. با توجه به آنالیز آماری انجام‌شده، هیچ کدام از مافین‌های شکلاتی تولید شده از امولژل‌ها تفاوت معنی‌داری در پارامترهای حسی (طعم، بافت، رنگ و پذیرش کلی) با نمونه‌ی شاهد (مافین تولیدشده از مارگارین) نداشتند. در مطالعه‌ای که توسط دال و همکاران (۲۰۲۴) در مورد جایگزینی کره در فرمولاسیون کوکی با اولئوژل انجام شد نیز هیچ تفاوت آماری معنی‌داری در خواص حسی کوکی‌ها مشاهده نشد. طبق شکل ۶ در بین مافین‌های فرموله‌شده با امولژل‌ها، تنها نمونه‌ی RWGE-M در سه پارامتر امتیاز پایین‌تری از نمونه‌ی شاهد داشت و دلیل آن را می‌توان با سفت‌تر و متراکم‌تر بودن بافت آن مرتبط دانست که با نتایج آزمون ارزیابی سفتی امولژل‌ها و مافین‌ها مطابقت داشت. در پارامتر رنگ نمونه‌ی شاهد پایین‌ترین امتیاز را کسب کرد که می‌توان به متراکم‌تر بودن بافت آن و در نتیجه کاهش رنگدانه‌ها

سفتی همه‌ی نمونه‌ها اختلاف معنی‌دار با یک‌دیگر نشان دادند ( $p < 0.05$ ). هر سه مافین تهیه‌شده از امولژل‌ها بافت نرم‌تری از نمونه‌ی شاهد داشتند که دلیل آن را می‌توان با پایین‌تر بودن سفتی امولژل‌ها نسبت به مارگارین مرتبط دانست که می‌تواند آسان‌تر و یکنواخت‌تر در خمیر مافین پخش شوند و بنابراین موجب نرم‌تر شدن محصول نهایی گردند (ونگ و همکاران، ۲۰۲۴). اوه و لی (۲۰۱۸) با استفاده از اولئوژل‌های بر پایه‌ی هیدروکسی پروپیل متیل سلولز (به‌عنوان جایگزین شورتنینگ) مافین تولید کردند؛ مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد که جایگزینی اولئوژل تا ۵۰٪ موجب افزایش سفتی بافت مافین نمی‌شود. در مقابل توتوسائوس و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از امولژل به-عنوان فاز چربی در فرمولاسیون مافین، سفتی بالاتری را در مقایسه با نمونه‌ی شاهد گزارش کردند. نمونه‌ی RWGE-M نزدیک‌ترین بافت را به نمونه‌ی شاهد داشت که احتمالاً به دلیل نرمی بیش از حد امولژل آن بود که موجب توانایی پایین آن در حفظ حباب‌های هوا طی فرآیند هم‌زنی شد. همچنین سفت‌تر بودن مافین شاهد احتمالاً ناشی از سفتی زیاد مارگارین بود که موجب تداخل در فرآیند هم‌زنی و در نتیجه وارد شدن کمتر حباب‌های هوا به خمیر شد. به‌علاوه گلیسرول مونواستئارات نیز نقش مهمی در نرم شدن مافین‌ها داشت. به‌طور کلی امولسیفایرها عملکردهای متعددی در تهیه‌ی خمیر فرآورده‌های نانوائی دارند؛ به‌عنوان مثال، با کمک به هوادهی خمیر موجب بهبود حجم و نرم‌تر شدن بافت می‌شوند (دال و همکاران، ۲۰۲۴). به‌طوری که در پژوهش جئونگ و همکاران (۲۰۲۱)، وجود گلیسرول مونواستئارات در اولئوژل‌های استفاده‌شده در فرمولاسیون مافین، موجب کاهش سفتی محصول نهایی شد. ازسوی دیگر سفتی به درصد رطوبت نیز بستگی دارد؛ به‌طوری که رطوبت بالا موجب کاهش سفتی می‌شود (آزمون و همکاران، ۲۰۲۱). با توجه به جدول ۴ می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌ی شاهد با کمترین رطوبت، دارای سفت‌ترین بافت بود و هر سه مافین تولیدشده از امولژل‌ها رطوبت بالاتر و بنابراین سفتی پایین‌تری از نمونه‌ی شاهد داشتند.

rice bran wax and glycerol monostearate; Control: Muffin with 100% margarine

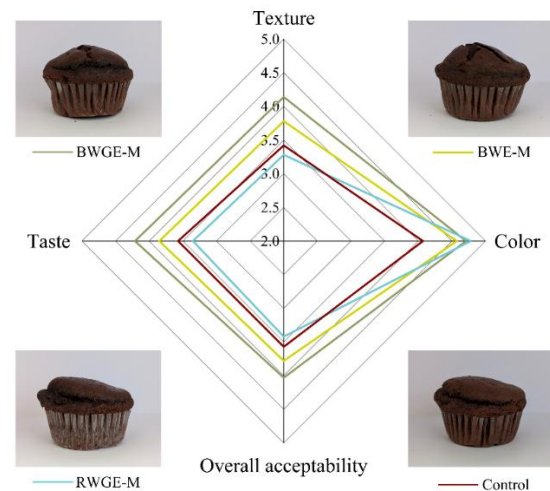
### نتیجه‌گیری

طبق نتایج ارزیابی امولژل‌ها، موم زنبور عسل در مقایسه با موم سبوس برنج، منجر به تولید امولژل‌هایی با سفتی و پایداری فیزیکی و اکسیداتیو بالاتر شد. همچنین، افزودن گلیسرول مونواستئارات با کاهش اندازه‌ی قطرات، تقویت شبکه‌ی ژلی و افزایش پایداری حرارتی نقشی کلیدی در بهبود ویژگی‌های امولژل‌ها ایفا کرد. علاوه‌براین جایگزینی ۲۵٪ از مارگارین با امولژل‌های بر پایه‌ی موم زنبور عسل و گلیسرول مونواستئارات (BWE و BWGE) در فرمولاسیون مافین شکلاتی نه تنها باعث بهبود ویژگی‌های کیفی محصول نهایی، از جمله افزایش رطوبت و ایجاد بافت نرم‌تر شد، بلکه پروفایل تغذیه‌ای مافین را نیز با کاهش میزان چربی ارتقا داد. با توجه به این‌که این خواص مطلوب بافتی و تغذیه‌ای بدون هیچ‌گونه تأثیر منفی بر پذیرش حسی (طعم، بافت، رنگ و پذیرش کلی) مافین‌ها حاصل شد. می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از این امولژل‌ها، یک استراتژی عملی و موفق برای تولید مافین‌های شکلاتی سالم‌تر با کیفیت بالاتر است.

### تقدیر و تشکر

بدین وسیله، قدردانی خود را از آزمایشگاه بیوفیزیک و مهندسی مواد غذایی اعلام می‌دارم. همچنین از دوستان عزیزم آقایان دیده‌ور، روشن‌دوست، رادخواه، فرهنگ و خانم‌ها آذری، باقری، خداپرست، نوینی و علمی، بی‌نهایت سپاس‌گزارم.

در سطح مافین (که موجب رنگ روشن می‌شود)، نسبت داد (توتوسائوس و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین در مقایسه‌ی دو نمونه‌ی BWE-M و BWGE-M، می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌ی BWGE-M به دلیل خاصیت امولسیفایری گلیسرول مونواستئارات، خواص حسی بهتری را ارائه داد و بنابراین امتیاز بالاتری را در همه‌ی پارامترها گرفت. بنابراین جایگزینی ۲۵ درصدی مارگارین با امولژل‌های بر پایه‌ی موم زنبور عسل (با و بدون گلیسرول مونواستئارات) در فرمولاسیون مافین شکلاتی موفقیت‌آمیز بوده و ضمن حفظ یا ارتقای کیفیت، در همه‌ی پارامترها امتیاز بالاتری از نمونه‌ی شاهد کسب کردند.



**Figure 6. Sensory attributes of the chocolate muffins**

BWGE-M: Muffin with 25% emulgel based on beeswax and glycerol monostearate; BWE-M: Muffin with 25% emulgel based on beeswax; RWGE-M: Muffin with 25% emulgel based on

### References

- Ahsan, M., Moin, A., Ashraf, H., Khan, A., & Giuffrè, A. M. (2024). Formulation and characterization of reduced fat muffins using a plant-based fat replacer. *Journal of Food Science and Technology*, 1–11.
- American Oil Chemists' Society. (2017). *Peroxide value, acetic acid-chloroform method* (Official Method Cd 8-53). In *Official methods and recommended practices of the AOCS* (7th ed.). AOCS Press.
- Azmoon, E., Saberi, F., Kouhsari, F., Akbari, M., Kieliszek, M., & Vakilinezam, A. (2021). The effects of hydrocolloids-protein mixture as a fat replacer on physicochemical characteristics of sugar-free muffin cake: Modeling and optimization. *Foods*, 10(7), 1549.
- Banu, I., Patraşcu, L., Vasilean, I., Dumitraşcu, L., & Aprodu, I. (2023). Influence of the protein-based emulsions on the rheological, thermo-mechanical and baking performance of muffin formulations. *Applied Sciences*, 13(5), 3316.

- Buldo, P., Benfeldt, C., Carey, J. P., Folkenberg, D. M., Jensen, H. B., Sieuwerts, S., Vlachvei, K., & Ipsen, R. (2016). Interactions of milk proteins with low and high acyl gellan: Effect on microstructure and textural properties of acidified milk. *Food Hydrocolloids*, 60, 225–231.
- Chen, X.-W., Fu, S.-Y., Hou, J.-J., Guo, J., Wang, J.-M., & Yang, X.-Q. (2016). Zein based oil-in-glycerol emulgels enriched with  $\beta$ -carotene as margarine alternatives. *Food Chemistry*, 211, 836–844.
- Codex Alimentarius Commission. (2021). *Standard for named vegetable oils* (CXS 210-1999). FAO/WHO.
- Contreras-Ramírez, J. I., Gallegos-Infante, J. A., Rosas-Flores, W., González-Laredo, R. F., Toro-Vázquez, J. F., & Pérez-Martínez, J. D. (2021). Relationship of rheological and thermal properties in organogel emulsions (W/O): Influence of temperature, time, and surfactant concentration on thermomechanical behavior. *Journal of Molecular Liquids*, 337, 116403.
- Czapalay, E., & Marangoni, A. (2024). Functional properties of oleogels and emulsion gels as adipose tissue mimetics. *Trends in Food Science & Technology*, 104753.
- Del Mercado, P. P.-V., Mojica, L., González-Ávila, M., Espinosa-Andrews, H., Alcázar-Valle, M., & Morales-Hernández, N. (2025). Pea protein–gum Arabic gel addition as ingredient to increase protein, fiber and decrease lipid content in muffins without impair the texture and intestinal microbiota. *Food Chemistry*, 463, 141305.
- Dhal, S., Sahu, D., Behera, H., Kim, D., Jarzebski, M., & Pal, K. (2024). Effects of replacing butter with SPAN80-tailored soywax/rice bran oil oleogel in food product: a study on whole wheat cookies. *ACS Food Science & Technology*, 4(4), 842–859.
- 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.
- Du, L., Guo, Y., & Meng, Z. (2025). Organogels, O/W and W/O emulsion gels structured by monoglycerides: the study on the gelation behavior and crystal network. *European Food Research and Technology*, 251(2), 165–177.
- Gao, Y., & Wu, S. (2020). Development and evaluation of a novel oleogel system based on starch–water–wax–oil. *Food & function*, 11(9), 7727–7735.
- Giacomozzi, A. S., Carrín, 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.
- Gu, X., Cui, L., & Meng, Z. (2023a). Differences of wax-based emulsion gel in 3D printing performance: Crystal distribution and droplet stability. *Food Chemistry*, 428, 136760.
- Gu, X., Du, L., & Meng, Z. (2023b). Comparative study of natural wax-based W/O emulsion gels: Microstructure and macroscopic properties. *Food Research International*, 165, 112509.
- Guo, Q., Wijarnprecha, K., Sonwai, S., & Rousseau, D. (2019). Oleogelation of emulsified oil delays in vitro intestinal lipid digestion. *Food Research International*, 119, 805–812.
- Gutiérrez-Luna, K., Astiasarán, I., & Ansorena, D. (2022). Gels as fat replacers in bakery products: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(14), 3768–3781.
- Gutiérrez-Luna, K., Ansorena, D., & Astiasarán, I. (2020). Flax and hempseed oil functional ingredient stabilized by inulin and chia mucilage as a butter replacer in muffin formulations. *Journal of Food Science*, 85(10), 3072–3080.
- Jeong, H., Huh, C.-K., Ha, H.-K., Kim, J., & Oh, I. (2023). Development of an emulsion gel containing peanut sprout oil as a fat replacer in muffins: Physicochemical, tomographic, and texture properties. *Gels*, 9(10), 783.
- Jeong, S., Lee, S., & Oh, I. (2021). Development of antioxidant-fortified oleogel and its application as a solid fat replacer to muffin. *Foods*, 10(12), 3059.
- 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.
- Mao, L., Lu, Y., Cui, M., Miao, S., & Gao, Y. (2020). Design of gel structures in water and oil phases for improved delivery of bioactive food ingredients. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(10), 1651–1666.

- Martínez-Cervera, S., Salvador, A., & Sanz, T. (2015). Cellulose ether emulsions as fat replacers in muffins: Rheological, thermal and textural properties. *LWT-Food Science and Technology*, 63(2), 1083–1090.
- Martins, A. J., Guimarães, A., Fuciños, P., Sousa, P., Venâncio, A., Pastrana, L. M., & Cerqueira, M. A. (2023). Food-grade bigels: Evaluation of hydrogel: Oleogel ratio and gelator concentration on their physicochemical properties. *Food Hydrocolloids*, 143, 108893.
- Martins, A. J., Vicente, A. A., Cunha, R. L., & Cerqueira, M. A. (2018). Edible oleogels: An opportunity for fat replacement in foods. *Food & function*, 9(2), 758–773.
- Masotta, N. E., Martinefski, M. R., Lucangioli, S., Rojas, A. M., & Tripodi, V. P. (2019). High-dose coenzyme Q10-loaded oleogels for oral therapeutic supplementation. *International Journal of Pharmaceutics*, 556, 9–20.
- Ng, F. S. K., Chiang, J. H., Ng, G. C. F., Lee, C. S. H., & Henry, C. J. (2021). Influence of inulin–konjac suspension as a fat replacer in baked muffins and its impact on textural and oxidative stability upon storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(10), e15769.
- Orhan, N. O., & Eroglu, Z. (2022). Structural characterization and oxidative stability of black cumin oil oleogels prepared with natural waxes. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(12), e17211.
- Othman, N. A., Abdul Manaf, M., Harith, S., & Wan Ishak, W. R. (2018). Influence of avocado puree as a fat replacer on nutritional, fatty acid, and organoleptic properties of low-fat muffins. *Journal of the American College of Nutrition*, 37(7), 583–588.
- Pandolsook, S., & Kupongsak, S. (2017). Influence of bleached rice bran wax on the physicochemical properties of organogels and water-in-oil emulsions. *Journal of Food Engineering*, 214, 182–192.
- Pandolsook, S., & Kupongsak, S. (2019). Storage stability of bleached rice bran wax organogels and water-in-oil emulsions. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13, 431–443.
- Penagos, I. A., Murillo Moreno, J. S., Dewettinck, K., & Van Bockstaele, F. (2023). Carnauba wax and beeswax as structuring agents for water-in-oleogel emulsions without added emulsifiers. *Foods*, 12(9), 1850.
- Pinto, T., Martins, A., Pastrana, L., Pereira, M., & Cerqueira, M. Oleogel-based systems for the delivery of bioactive compounds in foods. *Gels*. 2021; 7 (3): 86. In.
- Silva, T. J., Barrera-Arellano, D., & Ribeiro, A. P. B. (2021). Oleogel-based emulsions: Concepts, structuring agents, and applications in food. *Journal of Food Science*, 86(7), 2785–2801.
- Su, C.-y., Li, D., Wang, L.-j., & Wang, Y. (2024). Development of corn starch-sodium alginate emulsion gels as animal fat substitute: Effect of oil concentration. *Food Hydrocolloids*, 157, 110439.
- Su, S., Qin, S., Xia, H., Li, P., Li, H., Li, C., Guo, S., & Zeng, C. (2024). The Impact of Oil Type on the Performance of  $\beta$ -Amyrin-Based Oleogels: Formation, Physicochemical Properties, and Potential Correlation Analysis. *Foods*, 13(6), 876.
- Toro-Vazquez, J. F., Mauricio-Pérez, R., González-Chávez, M. M., Sánchez-Becerril, M., de Jesús Ornelas-Paz, J., & Pérez-Martínez, J. D. (2013). Physical properties of organogels and water in oil emulsions structured by mixtures of candelilla wax and monoglycerides. *Food Research International*, 54(2), 1360–1368.
- Totosaus, A., Santos-Atenco, E., Meza-Márquez, O. G., Rodríguez-Huezo, M. E., & Güemes-Vera, N. (2024). Emulsion filled gel with oleogels as oil fraction to enhance nutritional properties of baked products (muffins). *Food Science and Technology International*, 30(5), 428–438.
- Wagner, K., & Davidovich-Pinhas, M. (2024). Dual functionality of diacylglycerols in water-in-oil emulsion gel systems. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 236, 113810.
- Wang, G., Li, J., Yan, X., Meng, Y., Zhang, Y., Chang, X., Cai, J., Liu, S., & Ding, W. (2024). Stability and Bioaccessibility of Quercetin-Enriched Pickering Emulsion Gels Stabilized by Cellulose Nanocrystals Extracted from Rice Bran. *Polymers*, 16(7), 868.
- Wang, L., Wen, Y., Su, C., Gao, Y., Li, Q., Du, S., & Yu, X. (2022). Effect of water content on the physical properties and structure of walnut oleogels. *RSC advances*, 12(15), 8987–8995.
- Wang, Q., Bobadilla, S., Espert, M., Sanz, T., & Salvador, A. (2024). Shortening replacement by hydroxypropyl methylcellulose-based oleogels obtained by different indirect approaches. Texture and sensory properties of baked puff pastry. *Food Hydrocolloids*, 153, 109936.

- Wei, W., Cui, L., & Meng, Z. (2025). The potential of protein-polysaccharide-based O/W and W/O emulsion gels strengthened by solid fat crystallization as realistic fat analogs. *Food Chemistry*, 464, 141889.
- Wijarnprecha, K., de Vries, A., Santiwattana, P., Sonwai, S., & Rousseau, D. (2019a). Microstructure and rheology of oleogel-stabilized water-in-oil emulsions containing crystal-stabilized droplets as active fillers. *LWT-Food Science and Technology*, 115, 108058.
- Wijarnprecha, K., de Vries, A., Santiwattana, P., Sonwai, S., & Rousseau, D. (2019b). Rheology and structure of oleogelled water-in-oil emulsions containing dispersed aqueous droplets as inactive fillers. *LWT-Food Science and Technology*, 115, 108067.
- Wijarnprecha, K., de Vries, A., Sonwai, S., & Rousseau, D. (2021). Water-in-oleogel emulsions—From structure design to functionality. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 566445.
- Zhang, H., Jiang, Q., Li, J., Sun, Y., Zhang, R., Zhang, L., & Zhang, H. (2024). Oil-droplet anchors accelerate the gelation of regenerated silk fibroin-based emulsion gels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 278, 134579.
- Zhang, R., Liu, J., Yan, Z., Jiang, H., Wu, J., Zhang, T., Wang, E., & Liu, X. (2023). Tailoring a novel ovalbumin emulsion gel for stability improvement and functional properties enhancement: Effect of oil phase structure changes by beeswax. *Food Chemistry*, 426, 136575.
- Zhang, R., Zhang, Y., Yu, J., Gao, Y., & Mao, L. (2022). Rheology and tribology of ethylcellulose-based oleogels and W/O emulsions as fat substitutes: Role of glycerol monostearate. *Foods*, 11(15), 2364.
- Zhu, T., Wang, S., Yan, D., Zhang, L., Guo, X., & Chen, F. (2025). Preparation, interaction, and digestion of peanut oil body-based emulsion gels with xanthan gum and gallic acid. *Food Hydrocolloids*, 163, 111063.