

بررسی خصوصیات فیزیکوشیمیایی و ریزساختار ماست غنی شده با نانوامولسیون بر پایه روغن کنجد و بادام شیرین

معصومه حیدری قره‌چشمه¹، اکرم آریان‌فر^{1*}، الهام مهدیان¹، سارا ناجی طبسی²

1- گروه علوم و صنایع غذایی، واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران

* نویسنده مسئول (Arianfar.A@iauq.ac.ir)

2- گروه نانو فناوری مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

چکیده

در این پژوهش، خصوصیات کیفی ماست غنی‌شده بر پایه نانوامولسیون تهیه‌شده از روغن بادام شیرین و کنجد در غلظت ثابت 2 درصد، به‌همراه توئین 80 و اسپن 80 (با دو غلظت مختلف 0/25 و 0/5 درصد)، طی دو زمان همگن‌سازی (5 و 10 دقیقه) با امواج فراصوت موردبررسی قرار گرفت. تأثیر افزودن نانوامولسیون تهیه‌شده در شرایط مختلف فرایند شامل تغییر نوع روغن، زمان همگن‌سازی و غلظت امولسیفایر بر فاکتورهای pH، اسیدیته، ویسکوزیته ظاهری، رفتار جریان، خواص رئولوژیکی، خصوصیات بافت‌سنجی و ریزساختار ماست غنی‌شده طی 10 روز ذخیره‌سازی در 4 درجه سانتی‌گراد در مقایسه با نمونه کنترل مورد مطالعه قرار گرفت. طبق برآزش مدل‌های رئولوژیکی؛ مدل هرشل بالکلی بهترین مدل بود. شاخص رفتار جریان در تمام تیمارها در دمای 25 درجه سانتی‌گراد کمتر از 1 بود و تمامی آنها رفتار غیرنیوتنی از نوع ضعیف‌شونده با برش داشتند که با افزایش درجه برش، ویسکوزیته کاهش یافت. نتایج نشان داد که طی دوره نگهداری نمونه‌ها، با افزایش غلظت امولسیفایر از 0/25 به 0/5 درصد، pH کاهش و اسیدیته افزایش پیدا کرد. در غیاب حضور امولسیفایر، دارای میسل کازئین کوچک‌تر و فضاهای خالی بیشتر می‌باشد که این امر میزان آب‌اندازی را افزایش می‌دهد. در مقایسه بین دو نوع روغن کنجد و روغن بادام شیرین، نمونه‌های ماست غنی‌شده توسط نانوامولسیون تهیه‌شده بر پایه روغن کنجد با غلظت 2 درصد و غلظت امولسیفایر 0/25 درصد در زمان فراصوت 10 دقیقه، برای تولید ماست غنی‌شده پیشنهاد می‌شود.

تاریخ دریافت: 1400/12/18
تاریخ بازنگری: 1401/05/20
تاریخ پذیرش: 1401/05/28
تاریخ انتشار برخط: 1401/05/30

واژه‌های کلیدی

خصوصیات فیزیکوشیمیایی
روغن بادام شیرین
روغن کنجد
ماست غنی‌شده
نانوامولسیون



مقدمه

می‌باشد (Esmaeili et al., 2013; Keamey et al., 1996). بهترین منبع برای کلسیم فرآورده‌های لبنی از جمله ماست و بهترین منبع برای اسیدهای چرب ضروری مانند امگا-3، محصولاتی مانند مغز گردو و بادام شیرین، کنجد و محصولات دریایی می‌باشد (Edwards et al., 2017). فرآورده‌های تخمیری بر پایه شیر از جمله ماست، فرآورده بسیار رایجی بوده که انواع مختلفی از آنها وارد بازار مصرف شده‌اند. به دلیل طعم و تنوع مطلوب، ماست به‌عنوان

طبق آمار اعلام‌شده، امروزه بیماری‌های قلبی-عروقی علت بیماری و مرگ‌ومیر در سراسر جهان است. یکی از مهم‌ترین دلایل دچار شدن به بیماری‌های قلبی-عروقی مصرف غذاهای دارای اسید چرب اشباع و کلسترول بالا همچون ماست و محصولات لبنی پرچرب می‌باشد (Ardabilchi Marand et al., 2020) از آنجایی که رژیم غذایی با کمبود کلسیم و اسیدهای چرب ضروری مواجه

در نتیجه یک امولسیون از نظر ترمودینامیکی ناپایدار است (Zhong *et al.*, 2018). مکانیسم‌های فیزیکوشیمیایی متعددی از جمله خامه‌ای شدن، انعقاد، لخته شدن و تورم استوالد سبب بی‌ثباتی امولسیون می‌شوند. امولسیفایرها با توجه به در دسترس بودن، ایمنی و هزینه قابل قبول، به طور گسترده در صنایع غذایی استفاده می‌شوند (Solans *et al.*, 2005).

Baba و همکاران (2018)، به بررسی غنی‌سازی ماست با روغن‌های گردو و بذر کتان با استفاده از صمغ گوار پرداختند. طبق نتایج، روغن گردو برای غنی‌سازی ماست از روغن کتان مناسب‌تر بود، زیرا نسبت امگا-3 به امگا-6؛ پایداری اکسیداتیو و فعالیت آنتی‌اکسیدانی، پارامترهای حسی و چشایی بالاتر و مشخصات کیفی مطلوب‌تری را در مقایسه با نمونه‌های غنی‌شده با بذر کتان، نشان داد. ماست‌های غنی‌شده با گردو به مراتب سطح اسیدهای چرب چندغیراشباع ($PUFA^5$) و اسید چرب تک‌غیراشباع ($MUFA^6$) بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشتند. افزودن روغن و صمغ گوار به طور معنی‌داری بر ویژگی‌های کیفی ماست تأثیرگذار بودند (Baba *et al.*, 2018).

Ghorbanzade و همکاران (2017)، در زمینه نانوکپسوله کردن روغن ماهی در نانولیپوزوم‌ها و تقویت ماست به کمک ریزکپسوله‌های حاصله مورد بررسی قرار دادند. روغن ماهی دارای مزایای زیادی در رژیم غذایی است، اما به دلیل بوی قوی و فساد سریع، کاربرد آن در فرمولاسیون غذا محدود است و بنابراین باید به صورت نانوکپسول استفاده شود. خواص فیزیکوشیمیایی ماست تولیدشده شامل pH، اسیدیته، سینرسیس، ترکیب اسید چرب، عدد پراکسید و همچنین آزمون‌های حسی طی 3 هفته نگهداری در دمای 4 درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت. نانولیپوزوم کپسوله‌شده باعث کاهش قابل توجهی در میزان اسیدیته، سینرسیس و عدد پراکسید می‌شود. نتایج تجزیه و تحلیل کروماتوگرافی گازی نشان داد که پس از ذخیره‌سازی 21 روز، ماست غنی‌شده با نانوکپسول‌های روغن ماهی حاوی اسید دوکوزاهگزانوئیک (DHA^7) و اسید ایکوزاپنتانوئیک

غذایی سالم مورد توجه قرار گرفته است که از تخمیر شیر ناشی از تلقیح دو نوع باکتری (سترپتوکوکوس ترموفیلوس¹ و لاکتوباسیلوس بولگاریکوس²) تولید می‌شود که به دلیل میزان بالای کلسیم، ویتامین‌ها، مواد معدنی و همچنین تأثیر آن بر سلامتی و افزایش طول عمر، این فراورده مورد پسند عموم مردم قرار گرفته است (Mazaheri Tehrani *et al.*, 2007).

روغن بادام شیرین و کنجد سرشار از آنتی‌اکسیدان‌هایی مانند توکوفرول، فیبر، ویتامین‌ها و مواد معدنی بالاست. بر همین اساس مصرف این روغن‌ها به علت وجود ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و اسیدهای چرب ضروری امگا-3 و امگا-6 که جزء اسیدهای چرب ضروری برای بدن بشمار می‌روند، موجب کاهش ابتلا به سرطان و کاهش کلسترول کل و لیپوپروتئین با دانسیته پایین (LDL^3) می‌شوند. روغن بادام شیرین شامل 95 درصد اسید چرب غیراشباع (اسید اولئیک و اسید لینولئیک) و روغن کنجد حاوی اسید لینولئیک تا حدود 41 درصد و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی همچون توکوفرول و ترکیبات فنولی می‌باشند که می‌تواند میزان کلسترول و زمینه ابتلا به سرطان را کاهش دهد. با توجه به اینکه ماست و محصولات لبنی جزء مواد غذایی پرمصرف هستند، حدود 70 درصد چربی این محصولات را اسیدهای چرب اشباع تشکیل می‌دهد و از نظر اسیدهای چرب ضروری و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی غنی نمی‌باشند. بنابراین، می‌توان با افزودن نانوامولسیون روغنی بادام شیرین و کنجد میزان این ترکیبات را در محصولات لبنی افزایش داد (Jacobsen, 2010).

نانوامولسیون‌ها سامانه‌های غیرتعدالی هستند که به صورت خودبه‌خودی تشکیل نمی‌شوند و اعمال انرژی برای تولید آنها مورد نیاز است. اهداف عمده و نهایی در بهینه‌سازی ویژگی‌های نانوامولسیون‌ها اغلب رسیدن به حداقل اندازه قطره‌ها، حداقل بس‌پاشیدگی⁴ و حداکثر پایداری است (Tharwat *et al.*, 2004). پس از تشکیل امولسیون، قطره‌های فاز پراکنده و روغنی بر اثر برخورد با یکدیگر تمایل به ترکیب شدن با هم را دارند و می‌خواهند به صورت یک لایه متراکم روی سطح آب قرار گیرند،

¹ *Streptococcus thermophilus*

² *Lactobacillus bulgaricus*

³ Low density lipoprotein

⁴ Polydispersity

⁵ Polyunsaturated fatty acids

⁶ Monounsaturated fatty acids

⁷ Docosahexaenoic acid

است اما از نظر اسیدهای چرب ضروری فقیر می‌باشد در این پژوهش از خرفه که منبع غنی از اسید اولئیک، اسید لینولئیک، اسید آلفا-لینولئیک و همچنین سرشار از منیزیم، پتاسیم و ویتامین C می‌باشد، استفاده شده است. هدف از این تحقیق تولید پنیر غنی‌سازی شده با امگا-3، امگا-6 و امگا-9 بود. نتایج تحقیق آنها نشان داد با افزایش روغن خرفه، میزان امگا-3، امگا-6 و امگا-9 به‌طور معنی‌داری (در سطح 95 درصد) در نمونه‌های پنیر افزایش می‌یابد و نیز افزودن روغن خرفه تأثیر معنی‌داری بر خواص فیزیکوشیمیایی نمونه‌های پنیر نداشت و بهترین عملکرد پنیر در سطح 5/2 درصد افزودن روغن خرفه به‌دست‌آمد. از نظر خواص ارگانولپتیکی، نمونه پنیر در سطح 3/5 درصد امتیاز پایین‌تری نسبت به نمونه‌های دیگر کسب نمود (Izadi et al., 2011). شیر و محصولات لبنی جزء مواد غذایی هستند که همه روزه مصرف می‌شوند. حدود 70 درصد چربی این محصولات را اسیدهای چرب اشباع تشکیل می‌دهد، از این رو، اصلاح ترکیبات چربی محصولات لبنی مانند ماست ضروری به نظر می‌رسد. باتوجه‌به اینکه ماست و محصولات لبنی از نظر اسیدهای چرب ضروری و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی غنی نمی‌باشند (Jacobsen, 2010)، می‌توان با افزودن امولسیون روغنی بادام شیرین و کنجد میزان این ترکیبات را در محصولات لبنی افزایش داد.

از آنجایی که روغن بادام شیرین شامل درصد بالایی از اسید چرب غیراشباع (اسید اولئیک و اسید لینولئیک) و روغن کنجد حاوی اسید لینولئیک تا حدود 41 درصد و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی همچون توکوفرول و ترکیبات فنولی می‌باشند، می‌توانند میزان کلسترول خون، حمله‌های قلبی-عروقی و زمینه ابتلا به سرطان را کاهش دهد (Jacobsen, 2010). باتوجه‌به خصوصیات ذکر شده، در این تحقیق، جهت تهیه نانومولسیون به کمک امواج فراصوت، از دو نوع روغن کنجد و بادام شیرین به‌صورت جداگانه و در دو غلظت 2 و 4 درصد، همراه با اسپن و توئین 80 (به‌عنوان امولسیفایر)، طی دو زمان همگن‌سازی (فراصوت) 5 و 10 دقیقه استفاده و تأثیر افزودن نانومولسیون حاصله بر خصوصیات بافتی و رئولوژیکی ماست به‌منظور اصلاح ترکیب چربی فرآورده، غنی‌سازی آن از نظر اسیدهای چرب ضروری و درنهایت

اسید¹ (EPA) بالاتر از ماست حاوی روغن ماهی آزاد بود. به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان داد، که افزودن روغن ماهی نانوکپسول شده به ماست باعث نزدیک‌تر شدن خواص و ویژگی‌ها به نمونه کنترل از لحاظ ویژگی‌های حسی در مقایسه با ماست غنی‌شده با روغن ماهی آزاد شده است (Ghorbanzade et al., 2017).

در تحقیقی، Zhong و همکاران (2018)، بهبود خواص فیزیکوشیمیایی ماست غنی‌شده با روغن ماهی و اوریزانول² که یک فیتواسترول مشتق شده از روغن سبوس برنج توسط فناوری نانومولسیون است، را بررسی کردند. افزودن این نانومولسیون منجر به کاهش قابل‌توجهی در اسیدیته، سینرسیس و عدد پراکسید ماست شد. از نظر خصوصیات حسی، حضور و افزودن نانومولسیون حاوی روغن ماهی و گاما-اوریزانول به ماست باعث نزدیک‌تر شدن امتیازهای حسی نمونه تقویت‌شده به امتیازهای نمونه ماست ساده یا تقویت‌نشده گردید (Zhong et al., 2018).

Alfaro و همکاران (2015)، به بررسی ویژگی‌ها و خواص فیزیکی ماست منجمد تقویت‌شده با محلولی از ذرات نانومولسیون روغن سبوس برنج پرداختند. هدف از این مطالعه تهیه نانومولسیون روغنی شامل روغن سبوس برنج، و ارزیابی و بررسی خواص بافتی و رئولوژیکی ماست طی افزودن آن به ماست منجمد بود. قطره‌های چربی در محدوده اندازه 150 تا 300 نانومتر با مواد تشکیل‌دهنده ماست منجمد برای تولید ماست حاوی نانوذرات روغن سبوس برنج مخلوط شده است. طبق نتایج حاصله ویسکوزیته ظاهری مخلوط مشابه مخلوط نمونه ماست منجمد ساده بود و به ترتیب اعداد 0/19 و 1/7 پاسکال بر ثانیه برای آنها گزارش گردید. بررسی میکروسکوپی روی نمونه‌های ساختار فشرده و متراکم‌تر نسبت به نمونه ماست منجمد ساده را نشان داد. این مطالعه نشان داد که ماست منجمد قابلیت تقویت و غنی‌سازی توسط نانومولسیون روغن سبوس برنج را دارا می‌باشد (Alfaro et al., 2015).

Izadi و همکاران (2011)، به مطالعه فرمولاسیون و تولید فرآورده‌های لبنی (پنیر) غنی‌سازی شده با اسیدهای چرب ضروری روغن بذر خرفه پرداختند. باتوجه‌به اینکه پنیر از لحاظ ارزش غذایی و تغذیه‌ای بسیار حائز اهمیت

¹ Eicosapentaenoic acid

² Oryzanol

دور بر دقیقه به مدت 10 دقیقه انجام شد. به منظور شکسته شدن هرچه بیشتر قطره‌های روغن، پیش‌امولسیون تهیه شده به وسیله همگن‌ساز فراصوت (GmbH Hielscher Ultrasonic, UP2000S، ساخت آلمان) مجهز به پروب تیتانیوم با قطر 7 میلی‌متر، فرکانس 50 کیلوهرتز، همگن گردید. به این ترتیب نانوامولسیون نهایی حاصل شد (Homayoonfal et al., 2013). در تهیه نانوامولسیون با غلظت امولسیفایر 0/5 درصد، تمامی مراحل یکسان بوده، با این تفاوت که فاز آبی، از افزودن 2 سی‌سی، پلی‌سوربات به آب بدون یون، در دمای محیط تهیه گردید. همین روش، جهت آماده‌سازی نانوامولسیون بر پایه روغن بادام شیرین نیز به کار گرفته شد.

تهیه و آماده‌سازی ماست

پس از استاندارد کردن چربی شیر خام تا 1/5 درصد، شیر خشک بدون چربی 2 درصد و پودر کنسانتره پروتئین شیر 1/5 درصد جهت استاندارد سازی ماده خشک به شیر اضافه شد و سپس نانوامولسیون آماده شده در مرحله قبل به منظور غنی‌سازی ماست به ترکیبات اولیه اضافه گردید. برای هر فرمولاسیون از ظروف ماست 100 گرمی استفاده شد. مقدار مورد نیاز نانوامولسیون با توجه به توصیه میزان مجاز مصرف در هر روز جهت تأمین 2 گرم روغن کنجد و بادام شیرین در هر نوبت از مصرف ماست 100 گرمی (Baba et al., 2018)، محاسبه و قبل از فرایند پاستوریزاسیون به شیر بدون چربی اضافه گردید. این میزان باعث برآورده شدن توصیه آلفا-اسید لینولنیک (ALA^5) در مورد جمعیت بزرگسالان است. این مخلوط قبل از خنک شدن در دمای 42 درجه سانتی‌گراد، به مدت 15 ثانیه تحت فشار 150 تا 200 بار هم‌وزن و به مدت 30 دقیقه در دمای 72 درجه سانتی‌گراد پاستوریزه شد. سپس، 2 درصد کشت لیوفیلیزه استریپتوکوکوس ترموفیلوس و لاکتوباسیلوس بولگاریکوس به شیر اضافه شد. پس از آن، شیر در دمای 45 درجه سانتی‌گراد انکوبه شد تا به pH=4/6 رسید. تمام نمونه‌های ماست در ظروف شیشه‌ای به مدت 15 روز در دمای 4 درجه سانتی‌گراد ذخیره‌سازی شدند (Bashash Ali Abadi et al., 2016). تست‌های ارزیابی در فواصل زمانی 1، 5، 10 و 15 روز در سه تکرار انجام گرفت. براساس جدول (1)، ترکیب و کد

مطالعه ریزساختار ماست غنی‌شده توسط عکس‌برداری نیروی اتمی بررسی شد.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه

شیر پاستوریزه کم‌چرب (1/5 درصد چربی) از شرکت لبنی پگاه (گرگان، ساخت ایران)، مواد جامد بدون چربی (شیر خشک بدون چربی، کنسانتره پروتئین شیر 9=SNF درصد)، روغن بادام شیرین و روغن کنجد تهیه شده از بازار محلی، پلی‌سوربات (توئین 80) و سوربیتان مونوولئات (اسپن 80) تهیه شده از شرکت مرک (ساخت آلمان)، استراتر ماست شامل باکتری‌های استریپتوکوکوس ترموفیلوس¹ (PTCC 1762) و لاکتوباسیلوس بولگاریکوس² (PTCC 1643) بود و سایر مواد آزمایشگاهی مورد نیاز جهت انجام آزمون‌ها، از شرکت مرک (ساخت آلمان) خریداری گردید.

روش تهیه نانوامولسیون روغن بادام شیرین و روغن کنجد در آب

به منظور تهیه نانوامولسیون بر پایه دو روغن کنجد و بادام شیرین توسط امولسیفایر در دو غلظت 0/25 و 0/5 درصد، طی دو زمان فراصوت 5 و 10 دقیقه، فاز آبی و فاز روغنی هر کدام به صورت جداگانه تهیه شدند. نخست به منظور تهیه فاز آبی نانوامولسیون بر پایه روغن کنجد با غلظت امولسیفایر 0/25 درصد، 4 سی‌سی پلی‌سوربات یا توئین 80³ (امولسیفایر فاز آبی) به آب بدون یون در دمای محیط اضافه شد. محلول حاصل توسط همزن مغناطیسی (مدل RW 20 DZM-IKA WERK، ساخت آلمان) به مدت 10 دقیقه هم‌زده شد. فاز روغنی نیز با افزودن 1 سی‌سی مونوولئات سوربیتان یا اسپن 80⁴ (امولسیفایر فاز روغنی) به 2 سی‌سی از روغن کنجد آماده گردید. امولسیون اولیه (پیش‌امولسیون) با افزودن فاز روغنی به صورت قطره‌قطره به فاز آبی که توسط همزن مغناطیسی، با دور 500 دور در دقیقه به مدت 15 دقیقه در حال همگن‌شدن بود، تهیه شد. در مرحله بعد، همگن‌سازی توسط همزن با دور بالا و با سرعت 6500

¹ *Streptococci thermophilus*

² *Lactobacillus bulgaricus*

³ Tween 80

⁴ Span 80

⁵ α -Linolenic acid

حرارتی موردبررسی قرار گرفت. کلیه آزمون‌ها در دمای 25 درجه سانتی‌گراد و با شرایط یکسان انجام شد (Razavi & Mohammadi Moghaddam, 2011). به‌منظور دستیابی به مدل ریاضی مناسب برای بررسی رفتار جریان نمونه‌ها، داده‌های به‌دست‌آمده از رسم نمودار تنش برشی در برابر سرعت برشی، با مدل‌های قانون توان (رابطه 1) و هرشل بالکلی (رابطه 2) برازش داده شد. برازش مدل‌های رئولوژیکی توسط نرم‌افزار متلب نسخه R2010a انجام و برای ارزیابی تناسب برازش، ضریب تبیین (R^2) و میانگین مجذورات خطا ($RMSE^7$) محاسبه شدند.

رابطه (1)

$$\tau = k(\dot{\gamma})^n$$

رابطه (2)

$$\tau = \tau_{0H} + k(\dot{\gamma})^n$$

در رابطه‌های (1) و (2)، τ : تنش برشی (پاسکال)، τ_{0H} : تنش تسلیم هرشل بالکلی، $\dot{\gamma}$: سرعت برشی (بر ثانیه)، k : ضریب قوام (پاسکال بر ثانیه) و n : شاخص رفتار جریان (بدون واحد) می‌باشند.

اندازه‌گیری خصوصیات بافتی ماست

اندازه‌گیری ویژگی و خصوصیات بافتی (سختی، فنریت و چسبندگی) نمونه‌های ماست غنی‌شده توسط دو روغن‌کنجد و بادام شیرین، توسط روش اکستروژن برگشتی⁸، با استفاده از دستگاه آنالیز بافت⁹ (مدل TA.XT2، بروکفیلد، ساخت آمریکا) انجام شد. کلیه نمونه‌ها در دمای 20 درجه سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه نگهداری شدند. پروب مورد استفاده در این آزمون از نوع استوانه‌ای¹⁰، به قطر 24/5 میلی‌متر و طول 35 میلی‌متر بود (TA11/1000، ساخت آمریکا). سرعت نفوذ پروب به داخل نمونه در سرعت ثابت 1 میلی‌متر بر ثانیه و عمق نفوذ پروب 25 میلی‌متر انتخاب شد (Razavi & Mohammadi Moghaddam, 2011).

بررسی ریزساختارهای ماست غنی‌شده توسط عکس‌برداری نیروی اتمی

بررسی ریزساختار نمونه‌های ماست به کمک

نمونه‌ها به‌ترتیب نمونه کنترل، نمونه ماست شامل 2 درصد روغن‌کنجد (SO^1)، نمونه ماست شامل 2 درصد روغن‌کنجد و امولسیفایر با غلظت 0/25 درصد (SOE_1^2)، نمونه ماست شامل 2 درصد روغن‌کنجد و امولسیفایر با غلظت 0/5 درصد (SOE_2^3)، نمونه ماست شامل 2 درصد روغن بادام شیرین (AO^4)، نمونه ماست شامل 2 درصد روغن بادام شیرین و امولسیفایر با غلظت 0/25 درصد (AOE_1^5) و نمونه ماست شامل 2 درصد روغن بادام شیرین و امولسیفایر با غلظت 0/5 درصد (AOE_2^6) می‌باشد.

جدول 1- کدگذاری و ترکیبات موجود در تیمارهای ماست غنی‌شده بر پایه روغن بادام شیرین و کنجد در حضور امولسیفایر

کد نمونه	روغن‌کنجد (درصد)	روغن بادام (درصد)	امولسیفایر (درصد)
نمونه کنترل	0/00	0/00	0/00
SO	2/00	0/00	0/00
SOE ₁	2/00	0/00	0/25
SOE ₂	2/00	0/00	0/50
AO	0/00	2/00	0/00
AOE ₁	2/00	2/00	0/25
AOE ₂	0/00	2/00	0/50

خواص فیزیکی‌وشیمیایی

pH نمونه‌های ماست با کمک دستگاه pH متر (Shanghai Electronics Science Instrument Co. Ltd. ساخت چین) و مطابق استاندارد ملی ایران به شماره 2852 محاسبه شد (Iran National Standards Organization, 2022). همچنین میزان اسیدیته نمونه‌های غنی‌شده به‌عنوان اسید قابل تیتراسیون معادل اسید لاکتیک طبق روش شماره AOAC 942.15 تعیین شدند (AOAC, 1996; Chandan et al., 2017).

خواص رئولوژیکی پایا، آزمون برشی پایای مستقل از زمان رفتار جریان مستقل از زمان نمونه‌ها به‌صورت خطی، در دامنه درجه برش 14 تا 400 بر ثانیه، توسط ویسکومتر چرخشی (بوهلین، ساخت انگلستان)، مجهز به سیرکولاتور

¹ Sesame oil 2%

² Sesame oil 2% with 0.25% emulsifier

³ Sesame oil 2% with 0.5% emulsifier

⁴ Sweet almond oil 2%

⁵ Sweet almond oil 2% with 0.25% emulsifier

⁶ Sweet almond oil 2% with 0.5% emulsifier

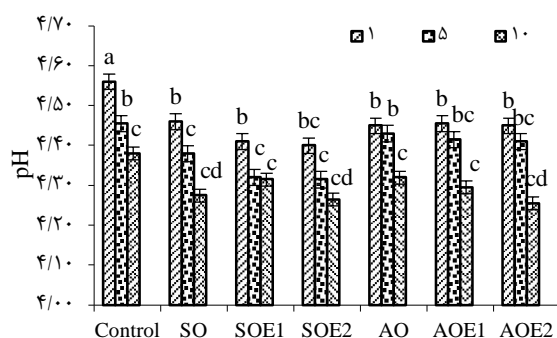
⁷ Root mean square error

⁸ Backward

⁹ Texture analyzer

¹⁰ Cylindrical

یک سورفکتانت غیریونی است که به طور گسترده به عنوان امولسیفایر در محصولات غذایی استفاده می‌شود و ممکن است به دلیل محتوای اسید اولئیک بالای توئین 80 باشد که مقدار pH کاهش یافته است (Chassaing *et al.*, 2015).



کد نمونه

شکل 1- ارزیابی مقادیر pH در نمونه‌های ماست غنی‌شده طی روزهای 1، 5 و 10 ذخیره‌سازی، Control: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن کنجد، SOE₁: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن کنجد و امولسیفایر با غلظت 0/25 درصد، SOE₂: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن کنجد و امولسیفایر با غلظت 0/5 درصد، AO: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن بادام شیرین، AOE₁: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن بادام شیرین و امولسیفایر با غلظت 0/25 درصد، AOE₂: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن بادام شیرین و امولسیفایر با غلظت 0/5 درصد. داده‌ها به صورت میانگین و انحراف معیار در سه تکرار بیان شده است. حروف متفاوت روی تیرک‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌داری آماری می‌باشد ($P < 0/05$).

نتایج بیانگر کاهش pH طی دوره ذخیره‌سازی در دمای 4 درجه سانتی‌گراد به علت افزایش اسیدیته بود. نمونه کنترل بیشترین و ماست حاوی روغن کنجد با غلظت 2 درصد به همراه امولسیفایر (SOE) کمترین مقدار pH را داشتند. در بین امولسیفایرها با دو غلظت مختلف 0/25 و 0/5 درصد، هنگام استفاده از غلظت بالاتر امولسیفایر، به علت تأثیر بیشتر روی فعالیت باکتری‌ها، کاهش بیشتری در pH نمونه‌های تقویت‌شده گزارش گردید. با گذشت زمان نگهداری، pH در نمونه‌های حاوی روغن/امولسیفایر با کاهش بیشتری در مقایسه با نمونه کنترل همراه بود. این را می‌توان به زنده ماندن بالاتر لاکتوباسیل‌ها نسبت داد، که لاکتوز را به اسید لاکتیک تبدیل می‌کنند همچنین در مقایسه بین نمونه‌های ماست غنی‌شده توسط روغن کنجد و روغن بادام شیرین، تیمارهای غنی‌شده با روغن کنجد به

عکس‌برداری توسط دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی (Atomic Force Microscope، مدل Full plus، ساخت ایران) انجام شد. برای انجام این آزمون به روش Cui و همکاران (2014)، برای تصویربرداری 5 میلی‌لیتر از هر نمونه به وسیله یک پیپت روی یک لام شیشه‌ای پخش شده و سپس با هوای تمیز خشک و توسط میکروسکوپ عکس‌برداری‌ها انجام پذیرفت. تمام آماده‌سازی‌ها و انجام عکس‌برداری‌ها در دمای 25 درجه سانتی‌گراد انجام گرفت (Cui *et al.*, 2014).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این مطالعه، تمام آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه 2013 مورد ارزیابی قرار گرفتند. اختلاف آماری با استفاده از واریانس (ANOVA) و آزمون طراحی کاملاً تصادفی برای سطح آماری $\alpha = 0/05$ جهت تجزیه و تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

pH و اسیدیته

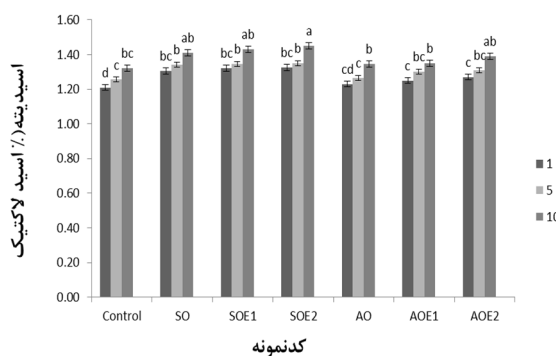
pH و اسیدیته از فاکتورهای اساسی مؤثر بر ماندگاری و قابلیت پذیرش محصولات لبنی به ویژه ماست هستند. تغییرات pH ماست غنی‌شده طی 10 روز ذخیره‌سازی در 4 درجه سانتی‌گراد ارزیابی شد. همان‌طور که در شکل (1) دیده می‌شود، pH در طول دوره ذخیره‌سازی در کلیه تیمارهای مورد بررسی کاهش یافته است. پس از 1 روز، نمونه کنترل بیشترین و ماست حاوی روغن کنجد کمترین مقدار pH را داشتند. در بین امولسیفایرها با دو غلظت مختلف (0/25 و 0/5 درصد)، با افزایش غلظت امولسیفایر، در هر دو روغن کاهش بیشتری در pH نمونه‌های غنی‌شده گزارش گردید. در مقایسه بین نمونه کنترل و نمونه‌های ماست حاوی روغن‌های بادام شیرین و کنجد، pH درجه کاهش بیشتری را در نمونه کنترل داشت. این پدیده را می‌توان به زنده ماندن بالاتر لاکتوباسیل‌ها نسبت داد، که لاکتوز را به اسید لاکتیک تبدیل می‌کنند (Perotti *et al.*, 2019). دلیل کاهش بیشتر pH با افزودن امولسیفایر در غلظت بالاتر مربوط به نوع ساختار امولسیفایر است. توئین 80 (پلی‌سوربات 80)

افزایشی داشت (شکل 2). این اتفاق در راستای تولید اسید لاکتیک و اکسیداسیون روغن‌های اشباع‌نشده موجود در ماست غنی‌شده رخ داده است (Baba et al., 2018). در مقایسه دو نوع روغن بادام شیرین و روغن کنجد طی 10 روز ذخیره‌سازی؛ نمونه‌های حاوی روغن کنجد، اسیدیته بالاتری را نشان داد. Bonczar و همکاران (2002) و Ghorbanzade و همکاران (2017)، گزارش نمودند افزایش سطح چربی باعث افزایش اسیدیته ماست می‌شود که نتایج آنها با نتایج تحقیق حاضر مطابقت داشت (Bonczar et al., 2002).

خواص رئولوژیکی، آزمون برشی پایای مستقل از زمان رفتار جریان مستقل از زمان نمونه‌ها در دامنه درجه برش 14 تا 400 بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور دستیابی به مدل ریاضی مناسب برای بررسی رفتار جریان نمونه‌ها، داده‌های به‌دست‌آمده از رسم نمودار تنش برشی در برابر سرعت برش، با مدل‌های رئولوژیکی قانون توان، هرشل بالکلی، کاسون و بینگهام، برازش داده شد. تمامی مدل‌ها مناسب ارزیابی شدند، اما در بین مدل‌ها، مدل هرشل بالکلی به دلیل دارا بودن R^2 برابر با 0/99 و RMSE کمتر از 0/46 به‌عنوان بهترین مدل معرفی گردید. شاخص رفتار جریان در تمام نمونه‌های مورد مطالعه در دمای 25 درجه سانتی‌گراد کمتر از 1 بود که نشان‌دهنده رفتار غیرنیوتنی (سودوپلاستیک) نمونه‌ها می‌باشد. همان‌طور که در جدول (2) مشاهده می‌شود، در مدل قانون توان و هرشل بالکلی، اندیس جریان کمتر از 1 بود که نشان‌دهنده رفتار رقیق‌شونده با برش نمونه‌ها می‌باشد. بررسی رفتار جریان نمونه‌ها نشان داد که تمامی آنها رفتار غیرنیوتنی از نوع شل‌شونده با برش همراه تنش تسلیم (سودوپلاستیک با تنش تسلیم) هرشل بالکلی دارند.

شاخص رفتار جریان، با افزودن روغن کنجد و بادام به ترتیب کاهش و افزایش یافت. با افزایش سطح امولسیفایر در نمونه‌های حاوی هر دو نوع روغن، مقدار این شاخص در روزهای 1، 5 و 10 کاهش یافت ($P < 0/05$). نمونه‌های حاوی روغن کنجد نسبت به نمونه‌های دارای روغن بادام اندیس جریان کمتری داشتند. با افزودن روغن کنجد ضریب قوام نمونه نسبت به نمونه کنترل، افزایش یافت اما افزودن روغن بادام به ماست منجر به کاهش این خصوصیت گردید ($P < 0/05$).

هر دو صورت ساده و نانوامولسیون، شدیدترین کاهش در مقدار pH را نشان دادند. ممکن است علت این امر، بالابودن محتوای اسید چرب غیراشباع (اسید لینولئیک) در روغن کنجد، اکسیداسیون روغن‌های اشباع‌نشده موجود در ماست غنی‌شده و تبدیل لاکتوز به اسید لاکتیک توسط باکتری‌های محیط‌کشت استراتر باشد. Ghorbanzade و همکاران (2017) گزارش کردند pH ماست غنی‌شده با روغن ماهی نانوکپسوله‌شده، در طول زمان احتمالاً به دلیل تبدیل لاکتوز به اسید لاکتیک توسط باکتری‌های محیط‌کشت استراتر کاهش یافته است. میزان اسیدیته در نمونه‌های ماست روند معکوس pH را دنبال می‌کند. نمونه شاهد کمترین میزان اسیدیته را داشت، در حالی که ترکیب روغن‌های بادام شیرین و کنجد به‌طور معنی‌داری ($P < 0/05$) باعث افزایش اسیدیته ماست غنی‌شده شدند (شکل 2).



شکل 2- ارزیابی مقادیر اسیدیته در نمونه‌های ماست غنی‌شده طی روزهای 1، 5 و 10 ذخیره‌سازی، Control: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن کنجد، SOE1: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن کنجد و امولسیفایر با غلظت 0/25 درصد، SOE2: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن کنجد و امولسیفایر با غلظت 0/5 درصد، AO: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن بادام شیرین، AOE1: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن بادام شیرین و امولسیفایر با غلظت 0/25 درصد، AOE2: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن بادام شیرین و امولسیفایر با غلظت 0/5 درصد. داده‌ها به صورت میانگین و انحراف معیار در سه تکرار بیان شده است. حروف متفاوت روی تیرک‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌داری آماری می‌باشد ($P < 0/05$).

نمونه‌هایی که حاوی روغن بادام شیرین و کنجد و سورفاکتانت در غلظت 0/5 درصد بودند، حاوی میزان اسیدیته بالاتری در مقایسه با سایر نمونه‌ها بودند، در این اندازه‌گیری اختلاف معنی‌داری از لحاظ اسیدیته بین دو روغن کنجد و بادام شیرین وجود نداشت ($P < 0/05$). اسیدیته در تمام نمونه‌ها طی 10 روز ذخیره‌سازی روند

جدول 2- پارامترهای رئولوژیکی مدل قانون توان و هرشل بالکلی، نمونه‌های ماست غنی‌شده توسط نانوامولسیون روغن‌کنجد و بادام شیرین

کد نمونه	زمان نگهداری (روز)	مدل قانون توان				مدل هرشل بالکلی				
		RMSE	R ²	n	K	τ ₀	RMSE	R ²	n	K
نمونه کنترل	1	0/30	0/99	0/29 ^b	3/92 ^d	3/64 ^h	0/99	0/39 ^e	1/88 ^c	0/24
	5	0/30	0/99	0/22 ^e	3/21 ^f	4/33 ^g	0/99	0/40 ^e	2/23 ^c	0/24
	10	0/31	0/99	0/21 ^e	2/89 ^f	5/00 ^f	0/99	0/41 ^e	3/00 ^a	0/19
SO	1	0/32	0/99	0/27 ^c	4/31 ^d	5/54 ^e	0/99	0/44 ^d	1/17 ^d	0/18
	5	0/31	0/98	0/20 ^e	4/00 ^d	6/00 ^d	0/99	0/48 ^c	2/00 ^c	0/24
	10	0/32	0/99	0/20 ^e	3/57 ^e	6/75 ^c	0/99	0/53 ^b	2/54 ^b	0/19
SOE ₁	1	1/04	0/99	0/29 ^b	6/43 ^a	12/49 ^a	0/99	0/62 ^a	0/64 ^e	0/46
	5	0/31	0/99	0/21 ^e	6 ^b	7/23 ^c	0/99	0/55 ^b	0/94 ^d	0/24
	10	0/32	0/99	0/20 ^e	5/22 ^c	7/12 ^c	0/99	0/60 ^a	0/99 ^d	0/19
SOE ₂	1	0/36	0/99	0/29 ^b	3/50 ^e	5/21 ^f	0/99	0/49 ^c	0/82 ^d	0/19
	5	0/31	0/99	0/21 ^e	3 ^f	6/75 ^c	0/99	0/52 ^b	1/17 ^d	0/24
	10	0/32	0/99	0/20 ^e	2/50 ^g	7/12 ^c	0/99	0/55 ^b	1/88 ^c	0/19
AO	1	0/29	0/98	0/33 ^a	3/52 ^e	3/26 ⁱ	0/99	0/42 ^d	1/87 ^c	0/22
	5	0/31	0/99	0/30 ^b	3 ^f	4/33 ^g	0/99	0/44 ^d	2/23 ^c	0/24
	10	0/32	0/99	0/10 ^f	2/22 ^h	5/00 ^f	0/99	0/48 ^c	2/54 ^b	0/19
AOE ₁	1	0/61	0/99	0/30 ^b	3/31 ^f	6/25 ^d	0/99	0/58 ^a	0/54 ^e	0/37
	5	0/31	0/99	0/20 ^e	3 ^f	7/12 ^c	0/99	0/61 ^a	1/12 ^d	0/24
	10	0/32	0/99	0/19 ^e	2/51 ^g	7/39 ^c	0/99	0/63 ^a	2/00 ^c	0/19
AOE ₂	1	0/51	0/99	0/32 ^a	4/14 ^d	7/13 ^c	0/99	0/54 ^b	0/69 ^e	0/18
	5	0/31	0/99	0/31 ^a	3/97 ^d	7/45 ^b	0/99	0/58 ^a	1/01 ^d	0/24
	10	0/32	0/98	2/45 ^d	3 ^f	8/00 ^b	0/99	0/61 ^a	1/35 ^d	0/19

SO: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن‌کنجد، SOE₁: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن‌کنجد و امولسیفایر با غلظت 0/25 درصد، SOE₂: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن‌کنجد و امولسیفایر با غلظت 0/5 درصد، AO: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن بادام شیرین، AOE₁: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن بادام شیرین و امولسیفایر با غلظت 0/25 درصد، AOE₂: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن بادام شیرین و امولسیفایر با غلظت 0/5 درصد. حروف متفاوت نشان‌دهنده اختلاف معنی‌داری آماری می‌باشد ($P < 0/05$).

شیرین با غلظت 2 درصد و امولسیفایر با غلظت 0/5 درصد (AOE₂) منجر به افزایش این خصوصیت رئولوژیکی گردید (جدول 2). Baba و همکاران (2018)، در بررسی خصوصیات رئولوژیکی و رفتار جریان ماست غنی‌شده با امولسیون روغن گردو و بذر کتان به نتایج مشابهی دست یافتند. بررسی رفتار جریان نمونه‌ها نشان داد که تمامی آنها با افزایش غلظت روغن و امولسیفایر، رفتار غیرنیوتنی از نوع شل‌شونده با برش (سودوپلاستیک) داشتند. با افزایش زمان نگهداری به مدت 10 روز، ضریب قوام تمام نمونه‌ها کاهش یافت، اما تفاوت معنی‌داری در اندیس جریان مشاهده نشد ($P > 0/05$). این تغییرات حاکی از افزایش امکان بازآرایی است که با وجود منافذ بزرگ در شبکه ژل و بررسی ریزساختار ماست غنی‌شده توسط

به‌دنبال کاربرد امولسیفایر، روند مشخصی در رابطه با دو نوع روغن مشاهده نشد ($P > 0/05$). به عبارتی افزودن 0/25 درصد امولسیفایر به نمونه حاوی روغن‌کنجد باعث افزایش ضریب قوام گردید به طوری که بیشترین مقدار ضریب قوام مربوط به نمونه ماست غنی‌شده با روغن‌کنجد و امولسیفایر با غلظت 0/25 درصد (SOE₁) بود، اما افزایش سطح امولسیفایر به 0/5 درصد در این نمونه، کاهش ضریب قوام SOE₂ را به دنبال داشت ($P < 0/05$). در حالی که به طور کامل نتایج متفاوتی در رابطه با نمونه‌های حاوی روغن بادام دیده شد، زیرا استفاده از 0/25 درصد امولسیفایر در نمونه ماست غنی‌شده توسط روغن بادام شیرین با غلظت 2 درصد (AOE₁) ضریب قوام را کاهش و کاربرد 0/5 درصد امولسیفایر در نمونه ماست غنی‌شده توسط روغن بادام

روغنی، ویسکوزیته روغن بر سرعت حرکت مولکول‌های امولسیفایر غیریونی، در حرکت از فاز آلی به فاز آبی، مؤثر بوده، به طوری که با کاهش ویسکوزیته روغن، مولکول‌های سورفاکتانت سریع‌تر حرکت کرده و ضمن تولید قطره‌های ریزتر و کوچک‌تر، ویسکوزیته ظاهری نمونه‌ها افزایش یافت (Pezeshky Najafabadi *et al.*, 2018). لذا در مقایسه بین دو نوع روغن به کاررفته در تهیه ماست غنی‌شده توسط نانوامولسیون با استفاده از امواج فراصوت، حضور روغن کنجد با توجه به خصوصیات ساختاری و ویسکوزیته آن، نوع و میزان اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع، قطبیت و کشش بین سطحی آن در مقایسه با روغن بادام شیرین، منجر به تشکیل نانوامولسیون با سایز ذرات ریزتر و در نتیجه ویسکوزیته ظاهری بالاتر شد. روغن کنجد یک روغن چندغیراشباعی و نیمه‌خشک‌شونده است و 80 درصد اسیدهای چرب آن غیراشباع می‌باشند. اسید اولئیک و لینولئیک اسیدهای چرب اصلی آن بوده و این روغن یکی از پایدارترین روغن‌های گیاهی در مقابل اکسیداسیون می‌باشد و به دلیل دارا بودن ترکیباتی نظیر سزامول و استرول‌های گیاهی دیگری که به طور طبیعی در سایر روغن‌ها وجود ندارد، دارای درصد نسبتاً بالایی از مواد غیرقابل‌صابونی است (Sheikh *et al.*, 2023). افزودن روغن کنجد و بادام به ترتیب باعث افزایش و کاهش تنش تسلیم نمونه‌های SO و AO نسبت به نمونه کنترل شد (جدول 1). استفاده از 0/25 درصد امولسیفایر در سیستم‌های حاوی هر دو نوع روغن (SOE₁، AOE₁)، باعث افزایش چشمگیر (حدود دو برابر) این پارامتر رئولوژیکی گردید. اما با افزایش مقدار امولسیفایر از 0/25 به 0/5 درصد (SOE₂، AOE₂)، اثرات متفاوتی در دو نوع سیستم دیده شد؛ بدین معنی که در نمونه حاوی روغن کنجد، این اثر روند کاهشی داشت ولی کاربرد 0/5 درصد امولسیفایر نسبت به 0/25 درصد، باعث افزایش تنش تسلیم در SOE₂ و AOE₂ شد (جدول 1).

اثر نوع روغن و غلظت امولسیفایر بر ویسکوزیته ظاهری نمونه‌های ماست غنی‌شده توسط نانوامولسیون روغن کنجد و بادام شیرین

ویسکوزیته ظاهری نمونه‌ها در درجه برش 50 بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفتند. بیشترین ویسکوزیته ظاهری (0/34 پاسکال بر ثانیه) در نمونه حاوی روغن کنجد و 0/25 درصد امولسیفایر (SOE₁) به دست آمد در حالی که

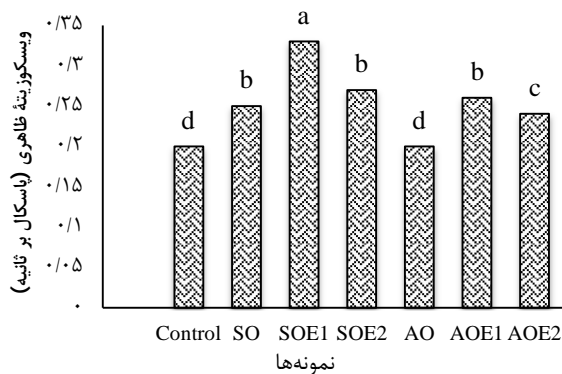
عکس‌برداری نیروی اتمی (AFM¹) قابل بررسی است. این مطالعه نشان می‌دهد که ژل‌های ماست ضعیف، به بازآرایی در شبکه کمک می‌کنند و شبکه حاصل دارای منافذ بزرگ‌تر (نفوذپذیری بالا) است (Lee & Lucey, 2003). کاهش ویسکوزیته و اتصال‌های زنجیره‌های جانبی پلیمرها در اثر فاکتورهایی مانند افزایش مدت زمان نگهداری و افزایش سرعت برشی منجر به یکسوسدن پلیمرهای زنجیره‌بلند در راستای جریان می‌شود. در این نوع رفتار رئولوژیکی مستقل از زمان، کاهش ویسکوزیته ظاهری مرتبط با افزایش درجه برش است. کاهش ویسکوزیته در طول دوره نگهداری به دلیل ایجاد تغییرات در اتصال‌های پروتئین-پروتئین و همچنین افزایش متغیر بودن ظرفیت اتصال به آب امولسیفایر به کارگرفته‌شده در تهیه نانوامولسیون اولیه با گذشت زمان است (Almasi *et al.*, 2022).

در مدل هرشل بالکلی، شاخص رفتار جریان در تمامی نمونه‌های حاوی روغن (فاقد یا دارای امولسیفایر) بیشتر از مقدار این پارامتر در نمونه شاهد ارزیابی گردید. با افزودن روغن و 0/25 درصد امولسیفایر به نمونه‌های ماست (SOE₁ و AOE₁)، مقدار n نسبت به نمونه کنترل افزایش یافت. اما با افزایش سطح امولسیفایر به 0/5 درصد در نمونه‌های حاوی هر دو نوع روغن (SOE₂ و AOE₂)، مقدار این شاخص کاهش یافت که البته باز هم بیشتر از نمونه کنترل و نمونه‌های حاوی روغن و فاقد امولسیفایر بود. مقدار این پارامتر در نمونه‌های ماست غنی‌شده با روغن کنجد (SO) و روغن بادام شیرین (AO) و فاقد امولسیفایر شباهت بیشتری به مقدار آن در نمونه کنترل داشت (جدول 2). با افزودن روغن کنجد به ماست، مقدار ضریب قوام نمونه SO کاهش یافت، در حالی که استفاده از روغن بادام تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر مقدار این پارامتر در نمونه AO نداشت. کاربرد 0/25 درصد امولسیفایر در سیستم‌های حاوی هر دو نوع روغن، کاهش ضریب قوام را در پی داشت. اما با افزایش سطح امولسیفایر از 0/25 به 0/5 درصد، ضریب قوام نمونه‌ها (SOE₂ و AOE₂) مقداری افزایش پیدا کرد، البته با وجود چنین روند افزایشی، هنوز این مقادیر از مقادیر مربوط به نمونه‌های فاقد امولسیفایر (SO و AO) کمتر بود (جدول 2).

با توجه به وابستگی خصوصیات نانوامولسیون و ماست غنی‌شده توسط آن به خصوصیات فیزیکی‌وشیمیایی فاز

¹ Atomic Force Microscopy

(2011). Lucey و Lee (2003)، در بررسی خصوصیات رئولوژیکی و ریزساختار ماست تحت شرایط انعقاد به نتایج مشابهی دست یافتند. اگر غلظت امولسیفایر در سیستم برای پوشاندن کامل لایه بین سطحی روغن-آب کم باشد، درهم آمیختن و تجمع قطره‌ها رخ می‌دهد و در نتیجه با افزایش جذب مولکول‌های سورفاکتانت به سطح روغن-آب و نیز کاهش بیشتر کشش سطحی، اندازه ذرات کاهش می‌یابد. با افزایش غلظت امولسیفایر ضمن پخش شدن بیشتر مولکول‌های امولسیفایر طی حرکت از فاز روغنی به فاز آبی، نانوامولسیون با ذرات ریزتر و کوچک‌تر تشکیل می‌گردد (Saberi et al., 2013). در پژوهشی که Niknia همکاران (2014) روی تولید نانوامولسیون‌های حاوی ویتامین E انجام دادند، رفتار نزدیک به رفتار نیوتنی در اکثر نمونه‌های حاوی امولسیفایر ریزمولکول مشاهده شد و رفتار سودوپلاستیک بیشتر در امولسیون‌های با اندازه قطره‌های بزرگ، لخته‌شده و غلیظ مشاهده شد. Masah (2013)، نیز در تحقیق خود روی تولید نانوامولسیون حاوی ویتامین E گزارش کردند در غلظت‌های بالاتر امولسیفایر، اندازه قطره‌ها کاهش می‌یابد.



شکل 3- مقایسه ویسکوزیته ظاهری نمونه‌های ماست غنی‌شده توسط نانوامولسیون روغن‌کنجد و بادام شیرین. نمونه Control: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن‌کنجد، SOE₁: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن‌کنجد و امولسیفایر با غلظت 0/25 درصد، SOE₂: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن‌کنجد و امولسیفایر با غلظت 0/5 درصد، AO: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن بادام شیرین، AOE₁: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن بادام شیرین و امولسیفایر با غلظت 1/25 درصد، AOE₂: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن بادام شیرین و امولسیفایر با غلظت 0/5 درصد. داده‌ها به صورت میانگین و انحراف معیار در سه تکرار بیان شده است. حروف متفاوت روی تیرک‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌داری آماری می‌باشد ($P < 0/05$).

مقادیر مربوط به سایر نمونه‌ها نزدیک به یکدیگر و در دامنه 0/25 تا 0/2 پاسکال بر ثانیه قرار داشت. از آنجاکه حضور امولسیفایر موجب تغییراتی در ساختار ژل ماست و کاهش کشش سطحی می‌شود، با افزایش غلظت امولسیفایر در هر دو روغن (0/5 درصد)، ویسکوزیته کاهش یافت که ممکن است به علت کاهش درگیری‌های بین‌مولکولی در فاز جامد است. ویسکوزیته ظاهری نمونه‌های نانوامولسیون وابسته به آهنگ برش می‌باشد. امولسیون‌ها در آهنگ برش‌های کم دارای ویسکوزیته ظاهری بالاتری هستند و با افزایش آهنگ برش، گرانیوی ظاهری آنها کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش آهنگ برش، نیروهای هیدرودینامیک طی هم‌زدن غالب و پیوندهای بین ذرات گسسته‌شده و در پی آن ویسکوزیته کاهش می‌یابد (Karimi et al., 2013). یکی دیگر از خصوصیات مهم نانوامولسیون‌ها که بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی (از جمله رفتار رئولوژیک و ویسکوزیته) و در پی آن بر پایداری این سیستم‌ها تأثیرگذار است، توزیع اندازه ذرات می‌باشد. آنالیز داده‌های حاصل از توزیع اندازه ذرات، اطلاعات مناسبی را در مورد تجمع قطره‌های امولسیون‌ها طی زمان، در اختیار قرار می‌دهد. براساس نتایج حاصل‌شده از میانگین قطر ذرات نانوامولسیون توسط دستگاه سنجش اندازه ذرات (Particle Size Analyzer, Cordouan, مدل Vasco3، ساخت فرانسه)، با افزایش غلظت امولسیفایر و زمان هم‌گن‌سازی توسط امواج فراصوت، میانگین قطر ذرات و مقادیر گزارش‌شده اسپن (پراکنندگی حول محور میانگین و شاخص پراکنش ذرات) به‌طور معنی‌داری کاهش و در پی آن پایداری امولسیون‌ها افزایش می‌یابد. مطابق شکل (3)، که نشان از حضور ذرات با اندازه‌های متفاوت و پلی‌دیسپرس بودن این نمونه‌ها دارد، در مقایسه بین ویسکوزیته ظاهری نمونه‌های ماست غنی‌شده توسط نانوامولسیون تهیه‌شده بر پایه روغن بادام شیرین و کنجد، نانوامولسیون‌های حاوی امولسیفایر اسپن و توئین 80 (AOE و SOE)، در مقایسه با عدم حضور آنها (AO و SO)، از ذرات ریزتر و کوچک‌تری تشکیل شده و پایداری بالاتری دارند، داده‌های رئولوژیکی نیز تأییدکننده این موضوع می‌باشند (Karimi et al., 2013).

طبق نتایج، با افزایش غلظت امولسیفایر در هر دو روغن، ویسکوزیته کاهش یافت چراکه حضور امولسیفایر با غلظت بالا موجب تغییراتی در ساختار ماست و کاهش کشش سطحی و کاهش ویسکوزیته می‌شود (Izadi et al.,

جدول 3- نتایج آنالیز آزمون‌های بافت‌سنجی در نمونه‌های ماست غنی‌شده توسط روغن کنجد و بادام شیرین

کد نمونه	سختی (گرم)	چسبندگی (میلی‌ژول)	فربیت (میلی‌متر)
Control	73/12±0/57 ^a	1/11±0/02 ^a	3/54±0/14 ^b
SO	57/34±0/63 ^b	0/91±0/05 ^b	1/29±0/27 ^d
SOE ₁	59/32±0/11 ^b	0/83±0/03 ^b	1/13±0/11 ^d
SOE ₂	45/34±0/29 ^c	0/54±0/02 ^c	2/94±0/35 ^c
AO	38/24±0/37 ^d	0/59±0/05 ^c	4/47±0/13 ^a
AOE ₁	43/38±0/14 ^c	0/42±0/04 ^d	4/53±0/17 ^a
AOE ₂	26/37±0/23 ^c	0/24±0/03 ^d	2/13±0/18 ^c

* حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند (آزمون دانکن، $P < 0/05$). داده‌ها به‌صورت میانگین و انحراف معیار در سه تکرار بیان شده است. حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند (آزمون دانکن، $P < 0/05$). Control: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن کنجد، SOE₁: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن کنجد و امولسیفایر با غلظت 0/25 درصد، SOE₂: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن کنجد و امولسیفایر با غلظت 0/5 درصد، AO: نمونه ماست شامل 2 روغن بادام شیرین، AOE₁: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن بادام شیرین و امولسیفایر با غلظت 0/25 درصد، AOE₂: نمونه ماست شامل 2 درصد روغن بادام شیرین و امولسیفایر با غلظت 0/5 درصد.

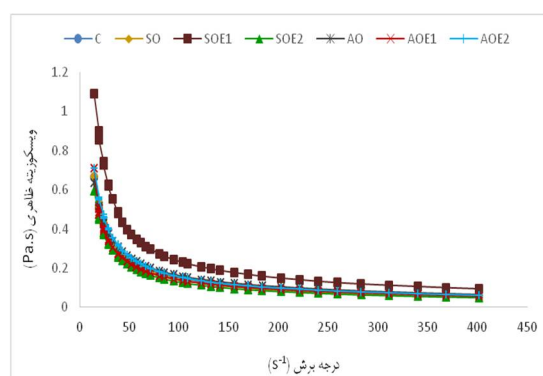
خصوصیات رئولوژیکی را به‌دنبال داشت. درحالی‌که کاربرد همین مقدار امولسیفایر در نمونه حاوی روغن بادام (AOE₁)، باعث ایجاد خصوصیات مشابه با نمونه شاهد گردید، بدین ترتیب نمودارهای مربوط به هر دو نمونه (C و AOE₁) کم‌وبیش بر یکدیگر منطبق هستند.

خصوصیات بافت‌سنجی

روند تغییرات ویژگی‌های بافتی ماست غنی‌شده توسط روغن کنجد و بادام شیرین، با توجه به نوع روغن به‌کاررفته جهت غنی‌سازی ماست، بررسی شدند. سختی میزان مقاومت ساختار شبکه ژل تشکیل شده را در برابر تغییر شکل نشان می‌دهد (Naji-Tabasi *et al.*, 2020) و طبق نتایج Karazhyan و Salari (2011)، مقدار سختی ماست بستگی به مقدار پروتئین و مقدار ماده جامد دارد و هرچه مقدار پروتئین و مقدار ماده جامد در ماست بیشتر باشد مقدار سختی بافت نیز بیشتر می‌شود.

شاخص سفتی، بیانگر بیشینه نیرو در حالت فشردگی می‌باشد که به‌عنوان یکی از ویژگی‌های مهم بافتی ماست مطرح می‌باشد (Aziznia *et al.*, 2008). جدول (3)، روند تغییرات ویژگی‌های بافتی ماست غنی‌شده توسط روغن کنجد و بادام شیرین، نظیر سختی ژل و نیروی گسستگی را با توجه به نوع روغن به‌کاررفته جهت غنی‌سازی ماست، نشان می‌دهد. نمونه‌های ماست غنی‌شده توسط روغن کنجد در حضور امولسیفایر و غیاب آن، pH پایین‌تری نسبت به نمونه‌های ماست غنی‌شده توسط روغن بادام شیرین داشتند و لذا تیمارهای SO، SOE₁ و SOE₂ به‌دلیل میزان pH پایین‌تر، از سختی

با افزایش درجه برش، مقدار ویسکوزیته ظاهری در تمامی نمونه‌های مورد بررسی کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده رفتار شل‌شوندگی با برش است. طبق نتایج، ماست جزء سیالات غیرنیوتنی سودوپلاستیک است که با افزایش درجه برشی، ویسکوزیته کاهش می‌یابد. به‌دلیل توزیع نامنظم مولکولی و یا وجود مولکول‌های بزرگ در درجه برش‌های پایین و سپس همسوسدن آنها با جریان و نیز کوچک‌شدن برخی مولکول‌ها در اثر ازبین‌رفتن باندهای شبکه مولکولی و در نتیجه کاهش مقاومت درونی ناشی از افزایش درجه برش، چنین رفتاری مشاهده شده است (Cutler *et al.*, 1983).



شکل 4- ویسکوزیته ظاهری ماست غنی‌شده توسط نانوامولسیون روغن کنجد و بادام شیرین در درجه برش 14-400 بر ثانیه

براساس شکل (4) و مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، استفاده از 0/25 درصد امولسیفایر در ماست حاوی روغن کنجد (SOE₁)، تقویت سیستم و در نتیجه افزایش

Özkaya و همکاران (2007)، با افزایش مقدار چربی ماست، سختی بافت افزایش یافت. نتایج Mazaheri و Tehranی و همکاران (2007)، در مورد نمونه‌های ماست غنی‌شده توسط روغن کنجد و بادام شیرین بیان کردند با افزایش مقدار چربی ماست، ماده جامد کل آن افزایش و در نتیجه سختی بافت آن نیز افزایش خواهد یافت که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

خاصیت فبری، طبق تعریف، سرعت بازگشت ماده غذایی تغییر شکل یافته به حالت اولیه خود، پس از حذف نیرو می‌باشد (Park, 2007). مطابق نتایج جدول (3)، با افزایش روغن کنجد میزان فنریت کاهش و با افزودن روغن بادام میزان فنریت افزایش یافته است. با افزایش درصد امولسیفایر نیز میزان فنریت در نمونه‌های غنی‌شده با روغن کنجد به طور معنی‌داری کاهش یافته است ($P < 0/05$) اما در نمونه‌های غنی‌شده با روغن بادام روند مشخصی مشاهده نشد.

نیروی چسبندگی، کار لازم جهت غلبه بر نیروی جاذبه سطحی بین ذرات می‌باشد. ارتباط این شاخص با شاخص سفتی به این صورت است که هرچه ساختار ژلی و شبکه پروتئینی ماست از سفتی بیشتری برخوردار باشد، نیروی چسبندگی افزایش می‌یابد (Behnia et al., 2014). بر اساس جدول (3)، با افزایش روغن کنجد و بادام، میزان چسبندگی نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. با افزایش درصد امولسیفایر نیز میزان چسبندگی در نمونه‌های غنی‌شده با روغن کنجد و بادام شیرین به طور معنی‌داری کاهش یافته است ($P < 0/05$).

بررسی ریزساختار ماست غنی‌شده توسط عکس برداری

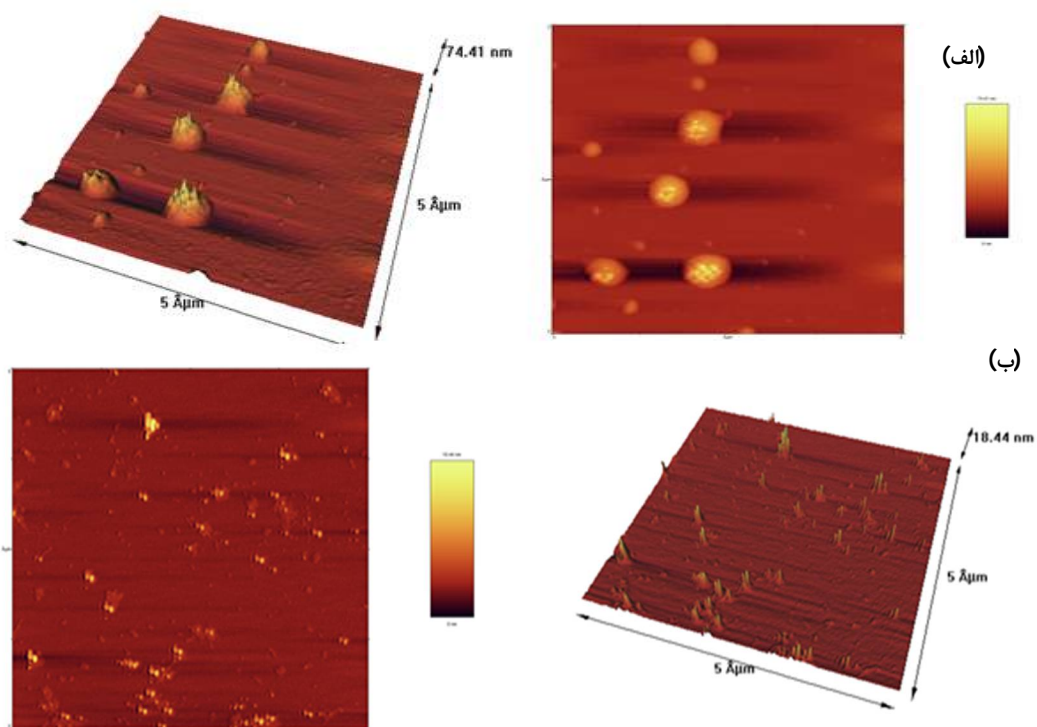
نیروی اتمی AFM

تصاویر AFM حاصل از ماست غنی‌شده توسط روغن کنجد و روغن بادام شیرین در حضور و غیاب امولسیفایر جهت بررسی ریزساختار نمونه‌های ماست توسط دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی (Atomic Force Microscope، مدل Full plus 0.0101/A، ساخت ایران) انجام شد و نتایج در شکل (5) نشان داده شده است. بر اساس تصاویر میکروسکوپی به دست آمده از سطح نمونه‌های مورد بررسی، بدین گونه مشاهده شد که، ماست غنی‌شده توسط روغن کنجد با pH کمتر دارای برجستگی‌های بلندتر و ماست غنی‌شده توسط روغن بادام شیرین با pH بیشتر دارای برجستگی‌های کوتاه‌تر است.

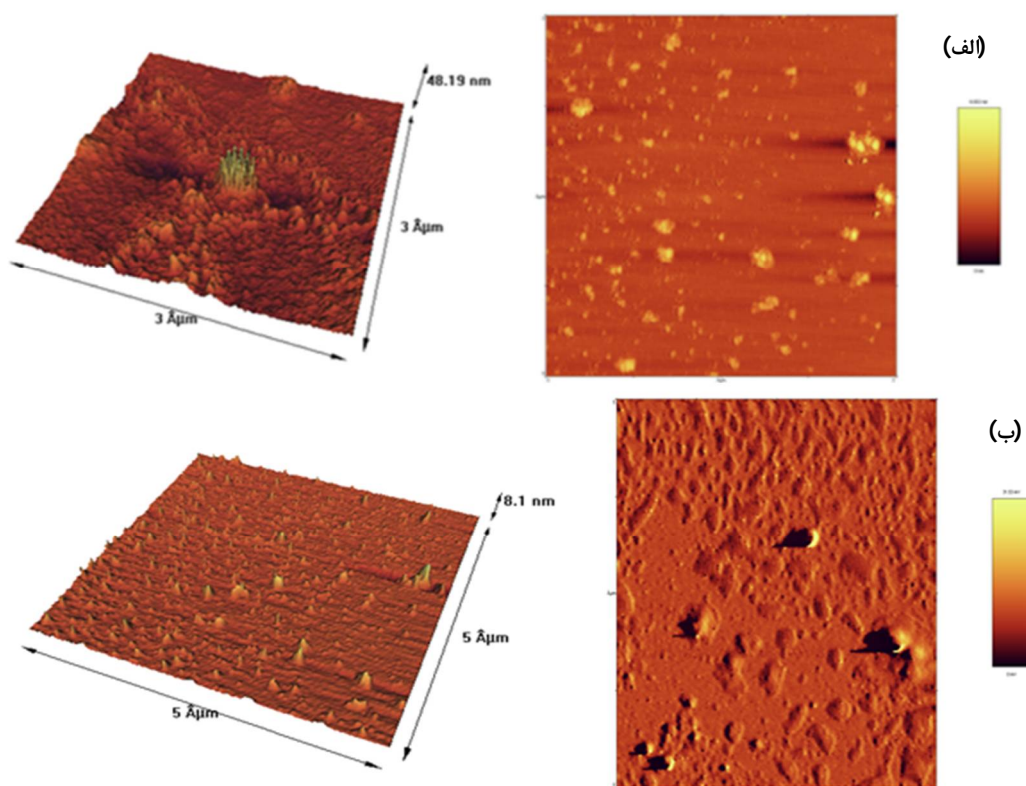
بالاتری برخوردار هستند. مقدار چربی در ماست حاوی روغن کنجد بیشتر از نمونه ماست غنی‌شده توسط روغن بادام شیرین می‌باشد و به مراتب این ماست دارای بافتی سخت‌تر است.

مطابق نتایج Nguyen و همکاران (2015)، سختی بافت ماست بستگی به pH آن دارد و بیشتر نمونه‌های ماست، سختی بالاتری را در pH پایین از خود نشان می‌دهد که این مورد در تطابق با نتایج پژوهش حاضر بود. استحکام و ظرفیت نگهداری آب از ویژگی‌های اصلی بافت ماست است و این دو ویژگی ارتباط نزدیکی با ریزساختار ژل ماست دارد. استحکام بافت در نمونه‌های غنی‌شده در مقایسه با نمونه شاهد بیشتر بود، زیرا در نمونه‌های غنی‌شده توسط امولسیفایر/روغن با افزایش ماده خشک و کاهش کشش سطحی توسط امولسیفایر، اثر مثبتی روی بافت دارند (Nguyen et al., 2015). افزایش ماده خشک بدون چربی در ماست کم‌چرب موجب می‌شود که باندهای کارئینی محکمی تشکیل شود. در نمونه‌های غنی‌شده، امولسیفایر و روغن با میسل‌ها واکنش می‌دهند و می‌توانند در تشکیل شبکه ژلی شرکت کنند. همچنین با افزایش درصد چربی میزان سینرسیس نمونه‌ها کاهش یافته و خصوصیات بافتی بهبود می‌یابد. بهبود خاصیت بافتی با افزایش میزان چربی می‌تواند به علت افزایش ماده جامد کل و در نتیجه سفتی محصول باشد زیرا افزایش ماده خشک، موجب پایدار شدن شبکه ژل و افزایش ظرفیت اتصال آب می‌گردد. طبق نتایج اثر امولسیفایر، آب و روغن روی بافت، مثبت است که در میان آنها اثر امولسیفایر بیشتر می‌باشد (Amiri et al., 2010).

در پژوهش Nguyen و همکاران (2015) بیان شده بود مقدار سختی ماست بستگی به مقدار پروتئین و مقدار ماده جامد دارد و هرچه مقدار پروتئین و مقدار ماده جامد در ماست بیشتر باشد مقدار سختی بافت نیز بیشتر می‌شود. طبق نتایج به دست آمده از آنالیز بافت‌سنجی روی ماست غنی‌شده توسط روغن بادام شیرین و کنجد به کمک روش اکستروژن برگشتی، نمونه‌های ماست غنی‌شده توسط روغن کنجد از سختی بالاتری در مقایسه با نمونه‌های ماست غنی‌شده توسط روغن بادام شیرین برخوردار بود. مقدار چربی در ماست حاوی روغن کنجد بیشتر از نمونه ماست غنی‌شده توسط روغن بادام شیرین می‌باشد و به مراتب این ماست غنی‌شده توسط روغن کنجد دارای بافتی سخت‌تر است. بر اساس تحقیق Durlu-



شکل 5- تصاویر AFM نمونه ماست غنی‌شده توسط روغن‌کنجد در غلظت 2 درصد، (الف) در غیاب امولسیفایر SO و (ب) در حضور امولسیفایر SO



شکل 6- تصاویر AFM مربوط به نمونه ماست غنی‌شده توسط روغن بادام شیرین در غلظت 2 درصد، (الف) در غیاب امولسیفایر AO و (ب) در حضور امولسیفایر AOE

نتایج Mazaheri Tehrani و همکاران (2007)، با نتایج تحقیق حاضر درمورد نمونه‌های ماست غنی‌شده توسط

همکاران و Durlu-Özkaya (2007)، براساس مطالعه چربی ماست، سختی بافت افزایش یافت.

ماتریکس پروتئین‌ها در نمونه ماست غنی‌شده توسط روغن بادام شیرین و روغن کنجد بدون حضور امولسیفایر (AO و SO) دارای میسل کازئین کوچک‌تر و فضاهای خالی بیشتر می‌باشد که این امر میزان آب‌اندازی را افزایش می‌دهد و بافت محصول را شکننده‌تر می‌کند. ولی در مورد نمونه ماست‌های تقویت‌شده توسط نانوامولسیون تهیه‌شده از روغن بادام و روغن کنجد با حضور امولسیفایرها در غلظت مشخص (SOE و AOE)، میسل‌های کازئین بزرگ‌تر و فضای خالی کمتری در تصاویر ثبت‌شده از عکس‌برداری AFM مشهود است.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، غنی‌سازی و تقویت ماست از طریق افزودن نانوامولسیون روغن بادام شیرین و کنجد در حضور سوربیتان مونوالئات و پلی‌سوربات به‌عنوان امولسیفایر، انجام شد و خصوصیات فیزیکوشیمیایی و ریزساختار ماست غنی‌شده مورد بررسی قرار گرفت. بررسی رفتار جریان نمونه‌ها نشان داد که تمامی آنها رفتار غیرنیوتنی از نوع شل‌شونده با برش (سودوپلاستیک) دارند و با افزایش درجه برش، ویسکوزیته کاهش یافت. در تمامی دامنه فرکانس اعمال‌شده، مدول الاستیک بزرگ‌تر از مدول ویسکوز بود و رفتار ژل ضعیف در تمامی نمونه‌ها تأیید گردید. با افزایش غلظت امولسیفایر، pH کاهش و اسیدیته افزایش یافت. براساس تصاویر به‌دست‌آمده از عکس‌برداری نیروی اتمی AFM، نمونه ماست غنی‌شده در غیاب حضور امولسیفایر، دارای میسل کازئین کوچک‌تر و فضاهای خالی بیشتر بود که این امر باعث افزایش میزان آب‌اندازی در مقایسه با نمونه‌های ماست غنی‌شده در حضور امولسیفایر است و همچنین بافت محصول را شکننده‌تر می‌کند. طبق نتایج در بین نمونه‌های غنی‌شده توسط نانوامولسیون، ماست غنی‌شده با روغن کنجد در مقایسه با روغن بادام شیرین از کیفیت ظاهر مطلوب‌تری نیز برخوردار بود. طبق نتایج به‌دست‌آمده و در مقایسه بین دو نوع روغن؛ روغن کنجد با غلظت امولسیفایر 0/25 درصد، گزینه مناسب‌تری به‌منظور تقویت و غنی‌سازی ماست، پیشنهاد می‌شود.

روغن‌کنجد و بادام شیرین، مطابقت دارد و نشان دادند که با افزایش مقدار چربی ماست، ماده جامد کل آن افزایش و در نتیجه سختی بافت آن نیز افزایش خواهد یافت.

براساس نتایج تحقیق حاضر، ماست غنی‌شده با حضور روغن بادام شیرین دارای زبری کمتری از ماست غنی‌شده توسط روغن کنجد می‌باشد. مطابق تصاویر به‌دست‌آمده از میکروسکوپ نیروی اتمی، Cui و همکاران (2014)، نتیجه گرفتند کاهش pH از 6/5 به 5/5 باعث می‌شود پروتئین‌های ماست دارای برجستگی‌های بلندتر باشند و همچنین تصاویر نشان دادند که هرچه pH بالاتر باشد نمونه دارای سطح نرم‌تری می‌باشد. مطابق تصاویر به‌دست‌آمده از میکروسکوپ نیروی اتمی در مطالعه Burgain و همکارا (2013)، میسل‌های کازئین شیر در pH=6/8 دارای یک سطح نرم‌تر و صاف‌تر نسبت به نمونه‌ها در pH پایین‌تر می‌باشد، زیرا پیوندهای آب‌گریز بر نیروی الکترواستاتیک غلبه می‌کنند. طبق مطالعه Guggisberg و همکاران (2009)، تصاویر میکروسکوپی حاصل از شیر کامل با 3/5 درصد چربی، بافت منسجم‌تر با درشتی دانه‌های کمتر و همچنین حفره‌های کوچک‌تری را نشان داده است که این ویژگی‌ها باعث بهبود در ثبات بافت نمونه شیر می‌شود. طبق تحقیق‌های Ramírez-Sucre و Vélez-Ruiz (2013)، ماست پرچرب دارای تعداد زیادی از دانه‌های کروی کازئین با تخلخل کمتر نسبت به ماست کم‌چرب می‌باشد. تصاویر AFM نمونه ماست غنی‌شده توسط روغن بادام شیرین در حضور و غیاب امولسیفایر در شکل (6) نشان داده است. همان‌گونه که بیان شد، ماست غنی‌شده توسط روغن کنجد، با درصد چربی بالاتر دارای انسجام و ثبات بافت بیشتر و فضای خالی کمتر نسبت به ماست حاوی روغن بادام شیرین است، که این امر باعث استحکام بافت ماست می‌گردد و بالعکس ماست غنی‌شده توسط روغن بادام شیرین با حفره‌های بیشتر و بزرگ‌تر دارای سختی بافت کمتر می‌باشد.

تحقیق انجام‌گرفته توسط Domagala (2009)، مطابق با نتایج تحقیق حاضر می‌باشد. تصویر گرفته‌شده از ریزساختار ماست، ماتریکس پروتئین، گویچه چربی و فضاهای پرشده با آب‌پنیر را نشان می‌دهد، این عکس‌ها به‌طور کامل بیان‌کننده تفاوت در نوع ماست‌ها می‌باشند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از آزمایشگاه مرکزی و جامع دانشگاه فردوسی مشهد که انجام این پژوهش را میسر نمودند تشکر و قدردانی می‌کنند.

مطالعه، بازبینی و اصلاح مقاله، نظارت بر مطالعه، تأیید نسخه نهایی، سارا ناجی طبسی: بازبینی و اصلاح مقاله، نظارت بر مطالعه، تأیید نسخه نهایی؛ الهام مهدیان: نظارت بر مطالعه.

مشارکت نویسندگان

معصومه حیدری قره‌چشمه: جمع‌آوری داده، تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌ها، نوشتن پیش‌نویس مقاله، آنالیز داده‌ها؛ اکرم آریان‌فر: ارائه ایده پژوهشی و طراحی

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، هیچ‌گونه تعارض منافی وجود ندارد.

منابع

- Alfaro, L., Hayes, D., Boeneke, C., Xu, Z., Bankston, D., Bechtel, P. J., & Sathivel, S. (2015). Physical properties of a frozen yogurt fortified with a nano-emulsion containing purple rice bran oil. *LWT - Food Science and Technology*, 62(2), 1184-1191. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.055>
- Almasi, N., Mohammadzadeh Milani, J., & Najafian, L. (2022). Effect of Basil Seed Hydrocolloid on Physicochemical and Sensory properties of low-fat Yogurt. *Journal of food science and technology(Iran)*, 18(121), 1-11. <https://doi.org/10.52547/fsct.18.121.1> (in Persian)
- Amiri, S., Alami, M., & Rezaei, R. (2010). Influence of Fleawort Seed Hydrocolloid on Physicochemical and Sensory Characteristics of Low fat Yoghurt. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 6(3), 201-209. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v6i3.9103> (in Persian)
- AOAC. (1996). AOAC official method 942.15: Acidity (titratable) of fruit products. *Official Methods of Analysis of AOAC International*.
- Ardabilchi Marand, M., Amjadi, S., Ardabilchi Marand, M., Roufegarinejad, L., & Jafari, S. M. (2020). Fortification of yogurt with flaxseed powder and evaluation of its fatty acid profile, physicochemical, antioxidant, and sensory properties. *Powder Technology*, 359, 76-84.
- Aziznia, S., Khosrowshahi, A., Madadlou, A., & Rahimi, J. (2008). Whey Protein Concentrate and Gum Tragacanth as Fat Replacers in Nonfat Yogurt: Chemical, Physical, and Microstructural Properties. *Journal of dairy science*, 91(7), 2545-2552. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0875>
- Baba, W. N., Jan, K., Punoo, H. A., Wani, T. A., Dar, M. M., & Masoodi, F. A. (2018). Techno-functional properties of yoghurts fortified with walnut and flaxseed oil emulsions in guar gum. *LWT*, 92, 242-249. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.007>
- Bashash Ali Abadi, F., Fadaei Noghani, V., & Fahim Danesh, M. (2016). Investigation of some physicochemical and sensory properties of beneficial yogurt enriched with Portulaca oleracea. *Journal of Innovation in Food Science and Technology*, 7(4), 105-116.
- Behnia, A., Karazhiyan, H., Niazmand, R., & Mohammadi Nafchi, A. R. (2014). Effect of Cress seed gum on rheological and textural properties of low-fat yoghurt. *Research and Innovation in Food Science and Technology*, 3(3), 255-266. <https://doi.org/10.22101/jrifst.2014.10.23.335> (in Persian)
- Bonczar, G., Wszolek, M., & Siuta, A. (2002). The effects of certain factors on the properties of yoghurt made from ewe's milk. *Food chemistry*, 79(1), 85-91. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00182-6](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00182-6)
- Burgain, J., Gaiani, C., Francius, G., Revol-Junelles, A. M., Cailliez-Grimal, C., Lebeer, S., . . . Scher, J. (2013). In vitro interactions between probiotic bacteria and milk proteins probed by atomic force microscopy. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 104, 153-162. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.11.032>

- Chandan, R. C., Gandhi, A., & Shah, N. P. (2017). Chapter 1 - Yogurt: Historical Background, Health Benefits, and Global Trade. In N. P. Shah (Ed.), *Yogurt in Health and Disease Prevention* (pp. 3-29). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805134-4.00001-8>
- Chassaing, B., Koren, O., Goodrich, J. K., Poole, A. C., Srinivasan, S., Ley, R. E., & Gewirtz, A. T. (2015). Dietary emulsifiers impact the mouse gut microbiota promoting colitis and metabolic syndrome. *Nature*, *519*(7541), 92-96. <https://doi.org/10.1038/nature14232>
- Cui, B., Tan, C., Lu, Y., Liu, X., & Li, G. (2014). The interaction between casein and hydroxypropyl distarch phosphate (HPDSP) in yoghurt system. *Food Hydrocolloids*, *37*, 111-115. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.10.032>
- Cutler, A. N., Morris, E. R., & Taylor, L. J. (1983). Oral perception of viscosity in fluid foods and model systems. *Journal of Texture Studies*, *14*(4), 377-395. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1983.tb00357.x>
- Domagała, J. (2009). Instrumental texture, syneresis and microstructure of yoghurts prepared from goat, cow and sheep milk. *International Journal of Food Properties*, *12*(3), 605-615. <https://doi.org/10.1080/10942910801992934>
- Durlu-Özkaya, F., Aslim, B., & Ozkaya, M. T. (2007). Effect of exopolysaccharides (EPSs) produced by *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* strains to bacteriophage and nisin sensitivity of the bacteria. *LWT-Food Science and Technology*, *40*(3), 564-568. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.09.009>
- Edwards, S., Hobbs, J., & Mulliniks, J. (2017). High milk production decreases cow-calf productivity within a highly available feed resource environment. *Translational Animal Science*, *1*(1), 54-59.
- Esmaili, S., Davoodi, H., Mortazavian, A., & Eivani, M. (2013). The inductive effects of indigenous and exogenesis milk and milk products ingredients on cancers. *Iranian journal of nutrition sciences & food technology*, *7*(5). (in Persian)
- Ghorbanzade, T., Jafari, S. M., Akhavan, S., & Hadavi, R. (2017). Nano-encapsulation of fish oil in nanoliposomes and its application in fortification of yogurt. *Food chemistry*, *216*, 146-152. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.022>
- Guggisberg, D., Cuthbert-Steven, J., Piccinali, P., Bütikofer, U., & Eberhard, P. (2009). Rheological, microstructural and sensory characterization of low-fat and whole milk set yoghurt as influenced by inulin addition. *International Dairy Journal*, *19*(2), 107-115.
- Homayoonfal, M., Khodaiyan, F., Mousavi, M., & Hosseini Panjaki, M. (2013). Preparation and characterization evaluations of walnut oil-based emulsions using response surface methodology. *Iranian journal of nutrition sciences & food technology*, *8*(2), 191-199. (in Persian)
- Iran National Standards Organization. (2022). Milk and milk products-Determination of titrable acidity and pH-Test method. (INSO No. 2852, 2nd Revision). (in Persian)
- Izadi, Z., Garoosi, G. A., Nasirpour, A., Ahmadi, J., & Bahrami, B. (2011). Optimization of Producing Enriched Yogurt With Phytosterols in Order To Reducing Cholesterol Content. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, *7*(2), 156-164. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v7i2.10064> (in Persian)
- Jacobsen, C. (2010). Enrichment of foods with omega-3 fatty acids: a multidisciplinary challenge. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1190*(1), 141-150. <https://doi.org/j.1749-6632.2009.05263.x>
- Karazhyan, H., & Salari, R. (2011). Comparison of physiochemical, rheological and sensory properties of yoghurt made from fresh cow's milk and powdered milk. *Innovation in Food Science and Technology (Journal of Food Science and Technology)*, *3*(2-8), 11-19. (in Persian)
- Karimi, N., Mohammadifar, M., & Nayebzade, K. (2013). Effect of two types of Iranian gum tragacanth on stability and rheological properties of oil-in-water emulsion. *Iranian journal of nutrition sciences & food technology*, *8*(3), 87-98.
- Keamey, J., Giovannucci, E., Rimm, E. B., Ascherio, A., Stampfer, M. J., Colditz, G. A., . . . Willett, W. C. (1996). Calcium, vitamin D, and dairy foods and the occurrence of colon cancer in men. *American journal of epidemiology*, *143*(9), 907-917.

- Lee, W.-J., & Lucey, J. A. (2003). Rheological properties, whey separation, and microstructure in set-style yogurt: effects of heating temperature and incubation temperature. *Journal of Texture Studies*, 34(5-6), 515-536. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2003.tb01079.x>
- Masah, M., Ghanbarzadeh, B., Hamishe Kar, H., Soti Khiabani, M. (2013, October). *The Effect of alpha-tocopherol-containing oil phase in the production of nano-emulsion using low-energy method* 21st National Congress of Food Science and Technology, Shiraz, Iran. <https://civilica.com/doc/235618/>
- Mazaheri Tehrani, M., Mahdian, E., & Karazhian, R. (2007). Effect of milk fat content on the growth and activity of starter cultures and quality of yoghurt. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 13(6), 164-173. (in Persian)
- Naji-Tabasi, S., Mahdian, E., Arianfar, A., & Naji-Tabasi, S. (2020). Investigation of Oleogel Properties Prepared by Pickering Emulsion-Templated Stabilized with Solid Particles of Basil Seed Gum and Isolated Soy Protein as a Fat Substitute in Cream. *Research and Innovation in Food Science and Technology*, 9(3), 269-282. <https://doi.org/10.22101/jrifst.2020.229269.1168> (in Persian)
- Nguyen, H. T., Ong, L., Kentish, S. E., & Gras, S. L. (2015). Homogenisation improves the microstructure, syneresis and rheological properties of buffalo yoghurt. *International Dairy Journal*, 46, 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2014.08.003>
- Niknia, N., Ghanbarzadeh, B., Hamishekar, H., Rezayi Mokarram, R., & Mortazaviyan, A. M. (2014). Production and evaluation of Vitamin E based nanoemulsion by spontaneous method. *Iranian journal of nutrition sciences & food technology*, 8(4), 51-65. (in Persian)
- Park, Y. W. (2007). Rheological characteristics of goat and sheep milk. *Small Ruminant Research*, 68(1), 73-87. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2006.09.015>
- Perotti, M. C., Bergamini, C. V., Vénica, C. I., Vélez, M. A., Wolf, I. V., & Hynes, E. (2019). 6 - Production of Functional Milk-Based Beverages. In A. M. Grumezescu & A. M. Holban (Eds.), *Milk-Based Beverages* (pp. 173-238). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815504-2.00006-2>
- Pezeshky Najafabadi, A., Hashemi, F. s., Marandi, A., Gharedaghi, K., & Jalali, S. H. (2018). Factors Affecting the Production and Stability of Optimal Formulation of Nanoemulsion Containing Vitamin A and D by Spontaneous Production. *Research and Innovation in Food Science and Technology*, 7(3), 255-268. <https://doi.org/10.22101/jrifst.2018.10.20.732> (in Persian)
- Ramírez-Sucre, M. O., & Vélez-Ruiz, J. F. (2013). Physicochemical, rheological and stability characterization of a caramel flavored yogurt. *LWT - Food Science and Technology*, 51(1), 233-241. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.09.014>
- Razavi, S. M. A., & Mohammadi Moghaddam, T. (2011). Influence of different substitution levels of lallemantia royleana seed gum on textural characteristics of selected hydrocolloids. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, 10(9), 2826-2837.
- Saberi, A. H., Fang, Y., & McClements, D. J. (2013). Fabrication of vitamin E-enriched nanoemulsions: Factors affecting particle size using spontaneous emulsification. *Journal of colloid and interface science*, 391, 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.08.069>
- Sheikh, F., Hasani, M., Kiani, H., JavadAsadollahzadeh, M., & Seyfi, J. (2023). Investigation of textural, rheological and sensory properties of white cheese analog containing sesame seeds oleosome. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(1), 63-74. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01582-0>
- Solans, C., Izquierdo, P., Nolla, J., Azemar, N., & Garcia-Celma, M. J. (2005). Nano-emulsions. *Current opinion in colloid & interface science*, 10(3-4), 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2005.06.004>
- Tharwat, T., Izquierdo, P., Esquena, J., & Solans, C. (2004). Formation and stability of nano-emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 9, 108-109. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2003.10.023>
- Zhong, J., Yang, R., Cao, X., Liu, X., & Qin, X. (2018). Improved physicochemical properties of yogurt fortified with fish oil/ γ -oryzanol by nanoemulsion technology. *Molecules*, 23(1), 56.

Investigation of Physicochemical Properties and Microstructure of Enriched Yogurt with Nanoemulsion Based on Sesame and Sweet Almond Oil

Masoumeh Heydari Gharehcheshmeh¹, Akram Arianfar^{1*}, Elham Mahdian¹, Sara Naji-Tabasi²

1- Department of Food Science and Technology, Quchan Branch, Islamic Azad University, Quchan, Iran

* Corresponding author (Arianfar.A@iauq.ac.ir)

2- Department of Food Nanotechnology, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran

Abstract

In this study the qualitative properties of fortified yogurt produced with a sweet almond and sesame oil nanoemulsion (0.25-0.5% Span 80 and Tween 80) as well as homogenization time (5 and 10 min) by ultrasonic waves were investigated. In order to homogenize the emulsion particles, ultrasonic waves were used and the effect of homogenization time, oil concentration and emulsifier concentration on the pH, acidity, rheological properties, apparent viscosity and textural properties of the fortified yogurt were studied for 10 days of storage at 4 °C. Fitting rheological models, the Herschel Bulkly model was the best model to study the fluid behavior of our samples. The flow behavior index in all treatments at 25 °C was less than 1. All of the samples had non-Newtonian (pseudoplastic) behavior, which was confirmed that by increasing the shear rate, the viscosity reduced and weak gel behavior in all samples was confirmed. The results showed pH reduced by incorporating sweet almond and sesame oil nanoemulsion, while the acidity increased. The yogurt sample amplified in the absence of emulsifier had smaller casein micelles and more voids, which increased the product's leaching. It makes it more fragile. Also, by increasing pH, due to the dominance of hydrophobic bonds over the electrostatic force of the sample, it had shorter protrusions and a smoother and softer surface, so yogurt fortified with sesame oil with a concentration of 2% had more roughness than yogurt fortified with sweet almond oil. Overall, sesame oil with 0.25% of the emulsifier and 10 min of ultrasound is suggested for the production of fortified yogurt.

Keywords: Enriched yogurt, Nanoemulsion, Physicochemical properties, Sesame oil, Sweet almond oil

