

خصوصیات رئولوژیک ژل نانوامولسیون روغن آفتابگردان تهیه شده به وسیله همگن ساز فراصوت

محمد نجاتیان^۱، سلیمان عباسی^{۱*}

۱-آزمایشگاه کلوئیدهای غذایی و رئولوژی، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

نانوامولسیون‌ها به دلیل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و خصوصیات عملکردی منحصر به فرد نظیر پایداری طولانی مدت و زیست دسترس‌پذیری بالا، کاربرد گسترده‌ای در صنایع غذایی دارند. با این وجود، بر اساس اطلاعات موجود، تاکنون تقریباً همه نانوامولسیون‌های تولید شده مایع هستند که این ویژگی، کاربرد آن‌ها را در بسیاری از مواد نرم مثل ژل‌ها، خامه‌ها، سس‌ها و خمیرها محدود می‌کند. بنابراین، در این مطالعه امکان تهیه ژل‌های نانوامولسیونی از مخلوط ۴۰٪ (وزنی/وزنی) روغن آفتابگردان و سورفاکتانت سدیم دودسیل سولفات (SDS، ۲/۸٪ وزنی/وزنی) با استفاده از زمان‌های مختلف همگن کردن (۳ تا ۳۰ دقیقه) با فراصوت بررسی شد. ویژگی‌های رئولوژیک نانوامولسیون‌های تهیه شده، با استفاده از رئومتر تعیین و کسر حجمی مؤثر (Φ_{eff}) امولسیون‌ها با معادلات تجربی، محاسبه گردید. نتایج نشان داد که حداقل ۶ دقیقه فرآیند فراصوت جهت تولید نانوامولسیون ۴۰٪ روغن در آب مورد نیاز است (میانگین اندازه قطرات ۱۸۰ nm) بطوریکه با افزایش زمان همگن‌سازی اندازه قطرات کاهش یافتند (حداقل تا ۱۱۶ nm). همچنین مشاهده شد که در اندازه قطرات ۱۴۰ nm (پس از ۱۵ دقیقه همگن‌سازی) که معادل Φ_{eff} ۰/۴۸۰ است، نانوامولسیون‌های مایع به ژل و اسکوالاستیک تبدیل شدند. با افزایش بیشتر زمان همگن‌سازی، مدول ذخیره ژل تهیه شده به یک مقدار تقریباً ثابت رسید. نتایج این مطالعه نشان داد که با کاهش اندازه قطرات می‌توان اثر بافت دهندگی معادل با مقدار روغن بیشتر در فرمولاسیون‌های غذایی معینی ایجاد کرد. این موضوع پتانسیل بالایی در تولید غذاهای کم چرب دارد

واژه های کلیدی: نانوامولسیون، روغن تری گلیسریدی، فراصوت، نانوژل، کسر حجمی مؤثر

۱- مقدمه

نانوامولسیون، به گروه ویژه‌ای از امولسیون‌ها اطلاق می‌شود که شعاع متوسط قطرات آن زیر ۱۰۰ nm باشد (۹). قطرات در نانوامولسیون‌ها به حدی کوچک هستند که امواج نور را فقط به صورت ضعیفی پخش می‌کنند بنابراین، می‌توان از آن‌ها در فرآورده‌های شفاف، مثلاً نوشابه‌های غنی شده و آب‌ها، بدون تأثیر روی شفافیت استفاده نمود. در ضمن، اندازه بسیار کوچک قطرات نانوامولسیون‌ها منجر به پایداری کینتیکی بالاتر آن‌ها در برابر تجمع، کوالسنس و جدایش ثقلی می‌شود که همین ویژگی‌ها آن‌ها را جهت استفاده در فرآورده‌های تجاری با ماندگاری طولانی مدت مناسب و جذاب می‌سازد (۶). علاوه بر این، کوچک بودن اندازه قطرات - نانوامولسیون‌ها منجر به ایجاد نسبت سطح به حجم بالاتر در مقایسه با امولسیون‌های معمولی می‌گردد که همین ویژگی نیز سبب افزایش زیست‌دسترسی پذیری اجزاء درون‌پوشانی شده می‌شود (۱۲). اخیراً نشان داده شده است که نانوامولسیون‌ها، نسبت به امولسیون‌های معمولی (با اندازه میکرونی)، قادر هستند تا در حضور جزء حجمی خیلی کمتری از فاز پراکنده، به ژل ویسکوالاستیک تبدیل شوند (۷). اصولاً در سامانه‌های حاوی کره‌های سخت 'تک' پراکنه، فشردگی تصادفی بیشینه در Φ_{MRJ} برابر ۰/۶۴ اتفاق می‌افتد درحالی‌که در امولسیون‌های چندپراکنه، فشردگی قطره و تغییر شکل می‌تواند در Φ بزرگتر رخ دهد زیرا قطرات کوچک‌تر می‌توانند در لابلای قطرات فشرده بزرگتر جای گیرند ($\Phi_{MRJ}polydisperse \geq 0.72$).

در چنین سامانه‌هایی، انرژی مورد نیاز برای فشردن و تغییر شکل دادن قطرات نامنظم فشرده شده در برابر کشش سطح مشترک، منجر به الاستیسیته ساختاری می‌شود و پایداری این گونه ژل‌های امولسیونی الاستیک ناشی از وجود لایه امولسیفایری در سطح مشترک روغن-آب و فیلم نازک آب بین قطرات فشرده شده می‌باشد. با توجه به این که نانوذرات

اغلب در برابر پدیده کوالسنس پایدارتر هستند، لذا انتظار می‌رود ژل‌های ساخته شده از نانوامولسیون‌ها نیز نسبت به امولسیون‌های معمولی پایدارتر باشند. علاوه بر این، نانوامولسیون‌ها با اندازه ذرات بسیار کوچک، الاستیسیته قوی-تری را در مقایسه با امولسیون‌های معمولی ایجاد می‌کنند زیرا ضریب ذخیره الاستیک ژل‌ها با فشار لاپلاس $P_L = 2\gamma/r$ ، که γ کشش سطح مشترک و r شعاع قطره است) قطرات تغییر شکل نیافته نسبت مستقیم و با شعاع آن‌ها نسبت معکوس دارد (۳، ۴). علیرغم وجود چنین قابلیت‌هایی در نانوامولسیون‌ها، در حال حاضر، پژوهش‌های بسیار محدودی در رابطه با کاربرد نانوامولسیون‌ها برای ایجاد اثرات بافتی جدید در محصولات خوراکی وجود دارد. همچنین، تاکنون تقریباً همه نانوامولسیون‌های تجاری تولید شده مایع هستند که همین امر کاربرد آن‌ها را در بسیاری از مواد نرم‌آمل ژل‌ها، خامه‌ها، سس‌ها و خمیرها محدود می‌کند. در حالی که به نظر می‌رسد یک نانوامولسیون غلیظ الاستیک (نانوژل) با پایداری بهبود یافته و ساختار جدید، می‌تواند کاربردهای زیادی را در مواد غذایی، دارویی و آرایشی داشته باشد. به طور کلی، دوروش اصلی برای تهیه نانوامولسیون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ روش‌های پرانرژی و کم انرژی. در روش پرانرژی، انرژی مکانیکی شدیدی از طریق اعمال نیروهای برشی بزرگ به وسیله همگن ساز فشاری، میکروفلویدایزر یا فراصوت به سیال وارد می‌شود. مزیت مهم این روش، توانایی امولسیون کردن روغن‌های ویسکوز (مثل تری‌گلیسریدها) می‌باشد که آن را به عنوان رایجترین روش در صنایع غذایی مطرح کرده است (۱). در حال حاضر، فراصوت به دلیل هزینه تولید پایین، آسانی کار کردن با آن، کارایی انرژی بالاتر و نیازمندی به تجهیزات جانبی کمتر، بسیار مورد توجه قرار دارد. بر اساس مطالب ذکر شده و نادر بودن مطالعه در ارتباط با نانوامولسیون‌های غلیظ با درجه غذایی، هدف این تحقیق، در

۲-۴- بررسی رفتار رئولوژی نانوامولسیون‌ها

رفتار جریان نمونه‌ها با استفاده از یک ویسکومتر قابل برنامه-ریزی بروکفیلد (LV DV-III Ultra Brookfield Engineering Labs., Inc., USA) مجهز به ژئومتری استوانه هم مرکز (Concentric cylinder) در دمای 25°C بررسی شد. همچنین، ویسکوالاستیسیته نانوامولسیون‌ها با استفاده از یک رئومتر نوسانی دینامیک با دامنه کوتاه (Physica MCR 301, Anton Paar, GmbH, Graz, Austria) و ژئومتری صفحه موازی (Parallel plate) با قطر 40 mm اندازه‌گیری گردید. جهت تعیین ناحیه خطی ویسکوالاستیک (LVR)، تست روبش کرنش در دامنه 100-0/1٪ و فرکانس ثابت 1 Hz انجام شد. سپس آزمون روبش فرکانس در دامنه وسیعی از فرکانس (20-0/01 Hz) و کرنش ثابت (کمتر از LVR) جهت ارزیابی ویژگی‌های رئولوژیک نمونه‌ها انجام شد.

۲-۵- تجزیه و تحلیل داده‌ها

تهیه نمونه‌ها و تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از آزمایش‌ها با دو تکرار، انجام گرفت. برای تعیین معنی‌داری تأثیر متغیرها بر هر یک از صفات مورد آزمون، از آنالیز واریانس، ANOVA، استفاده شد (SPSS Inc., Chicago, IL, version 21). در صورت وجود معنی‌داری، مقایسه میانگین-ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن (Duncan's Multiple Range) در سطح اطمینان 5٪ ($p < 0/05$) انجام گرفت.

۳- نتایج و بحث

میانگین قطر قطرات همه نانوامولسیون‌ها به صورت تابعی از مدت زمان فراصوت، در شکل ۱ نشان داده شده است. به وضوح دیده می‌شود که با افزایش مدت زمان فراصوت (از ۳ دقیقه تا ۳۰ دقیقه)، اندازه قطرات کاهش یافت (از حدود ۲۰۲ نانومتر به ۱۱۶ نانومتر). البته در زمان‌های بالای فراصوت، اندازه ذرات به مقدار نسبتاً ثابتی رسید. به عبارت دیگر روند

درجه اول بررسی امکان تهیه ژل‌های نانوامولسیون از روغن آفتابگردان با استفاده از تکنیک فراصوت و سپس بررسی ویژگی‌های رئولوژیک ژل‌ها می‌باشد (۵، ۱۰).

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

روغن آفتابگردان تصفیه شده از فروشگاه‌های محلی خریداری و تا هنگام انجام آزمایشات در دمای اتاق و دور از نور نگهداری شد. سورفاکتانت سدیم دودسیل سولفات (SDS) با درجه خلوص ۹۹٪ از مرک خریداری گردید (Merck Chemical Co., Darmstadt, Germany).

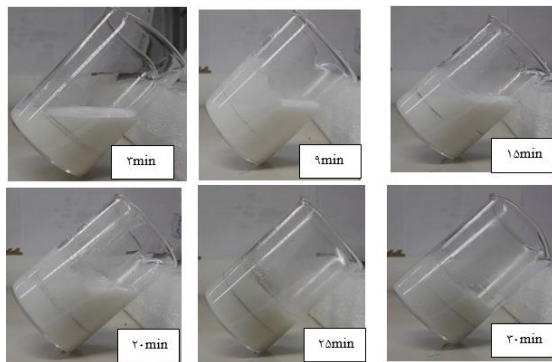
۲-۲- روش تهیه نانوامولسیون‌ها

نانوامولسیون روغن در آب در دو مرحله تهیه شد. ابتدا امولسیون‌های اولیه با مخلوط کردن فاز روغنی (۴۰٪ وزنی/وزنی) با فاز آبی (۶۰٪ وزنی/وزنی) حاوی مقدار معین از SDS (با نسبت روغن به سورفاکتانت یا OSR ۷/۱۰) با استفاده از یک همزن مغناطیسی (۱۰۰۰ rpm) به مدت ۵ دقیقه تهیه شدند سپس این امولسیون‌ها سریعاً با استفاده از یک همزنایزر فراصوت (Sonicator 4000, 20 kHz, high gain cylindrical titanium sonotrode of 19.1 diameter, Misonix, Inc, New York mm in) و تحت شرایط دمایی کنترل شده ($30 \pm 5^{\circ}\text{C}$) تحت فرآیند قرار گرفتند. فراصوت در دامنه نوسان حداکثر (۱۰۰٪)، به صورت پالسی (۳۰ ثانیه روشن، ۳۰ ثانیه خاموش) و به مدت ۳، ۶، ۹، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ دقیقه روی نمونه‌ها انجام گرفت.

۲-۳- اندازه‌گیری اندازه قطرات نانوامولسیون‌ها

قطر متوسط قطرات (Z-average) نانوامولسیون‌ها با استفاده از دستگاه تشخیص دهنده پراش نوری دینامیک (DLS) تعیین شد (Zetasizer Nano-ZS, Malvern instruments, UK). برای این منظور، امولسیون‌ها با استفاده از آب مقطر درست قبل از اندازه‌گیری رقیق (حدود ۲۰ برابر) شدند.

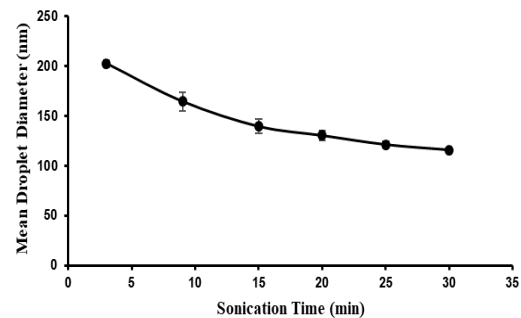
گیری قطرات امولسیون در امتداد میدان برشی، در نرخ برش- های بالا، باشد (۲). با این وجود، درجه شل شوندگی بسته به مدت زمان همگن سازی و در نتیجه اندازه قطرات نانوامولسیونها متفاوت بود. همانطور که در شکل ۳ دیده می- شود، درجه شل شوندگی نانوامولسیونهای با اندازه ذرات ۱۶۴ نانومتر (مدت زمان همگن کردن ۹ دقیقه) بیشتر از نانوامولسیونهای با اندازه ذرات حدود ۲۰۲ نانومتر (مدت همگن کردن ۳ دقیقه) می باشد که بیانگر نظم بالاتر ساختار آن است.



شکل ۲- نمای ظاهری نانوامولسیونهای تهیه شده در زمان- های متفاوت همگن کردن با فراصوت

علاوه بر این، با افزایش مدت زمان همگن کردن و در نتیجه کاهش اندازه قطرات، ویسکوزیته نمونهها افزایش یافت، طوریکه با افزایش زمان همگن کردن از ۳ دقیقه به ۹ دقیقه، ویسکوزیته ظاهری حدود ۶ برابر شد، هر چند همانطور که قبلاً گفته شد، این نمونه به راحتی جاری می شد. شکل ۴ وابستگی به کرنش مدولهای ذخیره (G') و افت (G'') را برای نانوامولسیونها و نانوزلهای تهیه شده با زمانهای مختلف همگن کردن از طریق فراصوت را نشان می دهد. هر چند برای همه نانوامولسیونها تا قبل از نقطه تلاقی دو مدول، G' بالاتر از G'' بود اما تنها از زمان همگن کردن ۱۵ دقیقه، مدولها مستقل از کرنش بودند که بیانگر وجود یک LVR برای این نمونههاست.

کاهش اندازه قطرات موازی با افزایش زمان همگن کردن، از مدل شبیه به قانون توان تبعیت کرد. چنین روند کاهش در اندازه متوسط قطرات موازی با افزایش مدت زمان همگن کردن، در مطالعات دیگر نیز مشاهده شده است (۳، ۸). مدت زمان همگن کردن بیشتر معادل با انرژی اعمال شده بیشتر روی قطرات روغن و در نتیجه تخریب بیشتر آنهاست البته تا جایی که این انرژی بتواند بر فشار لاپلاسی موجود در قطرات غلبه کند. جهت فهم ملموس تر رفتار جریانی نانوامولسیونها، نمای ظاهری آنها در شکل ۲ نشان داده شده است. نمونهها به مدت ۳۰ ثانیه تحت زاویه مشخص و یکسان کج نگه داشته شدند تا مشخص شود که آیا جریان می یابند یا نه؟ همانطور که در شکل ۲ به وضوح دیده می شود، نانوامولسیونهای همگن شده به مدت ۳ و ۹ دقیقه، سریعاً جاری شدند. جاری شدن نمونهها بعد از ۱۵ و ۲۰ دقیقه همگن کردن، کاهش یافت و نهایتاً نانوامولسیونهای تهیه شده بعد از ۲۵ و ۳۰ دقیقه همگن سازی، اصلاً جاری نشده و به عبارت دیگر ژل تشکیل دادند.



شکل ۱- تاثیر مدت زمان همگن کردن با فراصوت روی قطر متوسط قطرات نانوامولسیون

شکل ۳، ویسکوزیته نانوامولسیونهایی که سریعاً جاری شدند (همگن شده به مدت ۳، ۶ و ۹ دقیقه) را به عنوان تابعی از نرخ برش نشان می دهد. برای هر سه نانوامولسیون، ویسکوزیته موازی با نرخ برش، کاهش یافت. این رفتار شل شونده با برش یا سودوپلاستیک در بین امولسیونها متداول است و می تواند به دلیل از بین رفتن برهم کنشهای بین قطره ای و/یا جهت

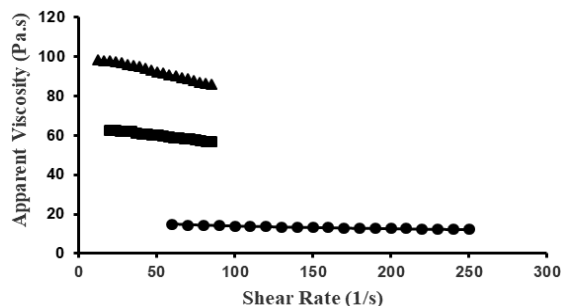
موازی با افزایش فرکانس (به دلیل غالب شده جریان ویسکوز فاز شبه مایع در فرکانس‌های بالاتر) ناشی می‌شود (۳، ۲). تصور می‌شود که اندازه قطرات کوچکتر نانومولسیون‌ها همراه با افزایش اثر لایه باردار دور قطرات ناشی از حضور SDS در سطح آن‌ها، کسر حجمی مؤثر (Φ_{eff}) را به حدی افزایش می‌دهد که زمینه برای تشکیل ژل مساعد می‌گردد. جهت بررسی کمی‌تر، مقدار Φ_{eff} و طول اسکرینینگ دبابی (K)^۱ برای همه نمونه‌ها محاسبه شد:

$$\Phi_{eff} = \Phi \left(1 + \frac{\delta}{r}\right)^3$$

که در آن r شعاع قطرات امولسیون بر حسب نانومتر و δ ضخامت لایه پوسته بین سطحی (nm) است که برای سیستم‌های مشابه مطالعه حاضر حدود ۲/۴ برابر k^{-1} می‌باشد (۴). k^{-1} به غلظت SDS در سیستم ($C = 0.0971 \text{ mol/L}$)، غلظت تک لایه مولکول‌های SDS جذب شده روی سطح قطرات ($C_{monolayer}$)، غلظت بحرانی تشکیل میسل SDS در فاز پیوسته ($CMC = 0.0083 \text{ mol/L}$) و میزان مولکول‌های سورفاکتانت تفکیک شده در یک میسل SDS (Q) که معمولاً حدود ۲۵٪ است) مطابق با معادله زیر مرتبط می‌باشد:

$$k^{-1} = \frac{0.304}{\sqrt{f \times C_{monolayer} + CMC + Q \times (C - C_{monolayer} - CMC)}}$$

جائیکه f فاکتور تفکیک یون مخالف (در اینجا Na^+) می‌باشد و بر اساس مطالعه Nespolo و همکاران برابر با ۰/۱ است (۱۱). همچنین $C_{monolayer} = 6\Phi \Gamma_s/d$ که در آن Γ_s بار سطحی سورفاکتانت بوده (برای SDS مساوی با $1.90 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^2$) و d قطر متوسط قطرات می‌باشد. محاسبات نشان دادند که مقدار Φ_{eff} برای نانومولسیون‌های با قطر متوسط قطرات حدود ۲۰۳، ۱۶۴، ۱۴۰، ۱۳۰، ۱۲۱ و ۱۱۶ نانومتر به ترتیب برابر با ۰/۴۵۵، ۰/۴۶۹، ۰/۴۸۰، ۰/۴۹۱، ۰/۴۹۸ و ۰/۵۰۴ می‌باشد. در واقع با افزایش زمان همگن کردن از ۳ دقیقه تا ۳۰ دقیقه، کسر حجمی مؤثر از ۰/۴۵۹ به ۰/۵۰۴ و قدرت ساختاری ژل (G' در LVR) از حدود ۵۸۲



شکل ۳- تغییرات ویسکوزیته نانومولسیون‌های تهیه شده با ۳ (●)، ۶ (■) و ۹ (▲) دقیقه همگن کردن فراصوتی در نرخ‌های برشی متفاوت

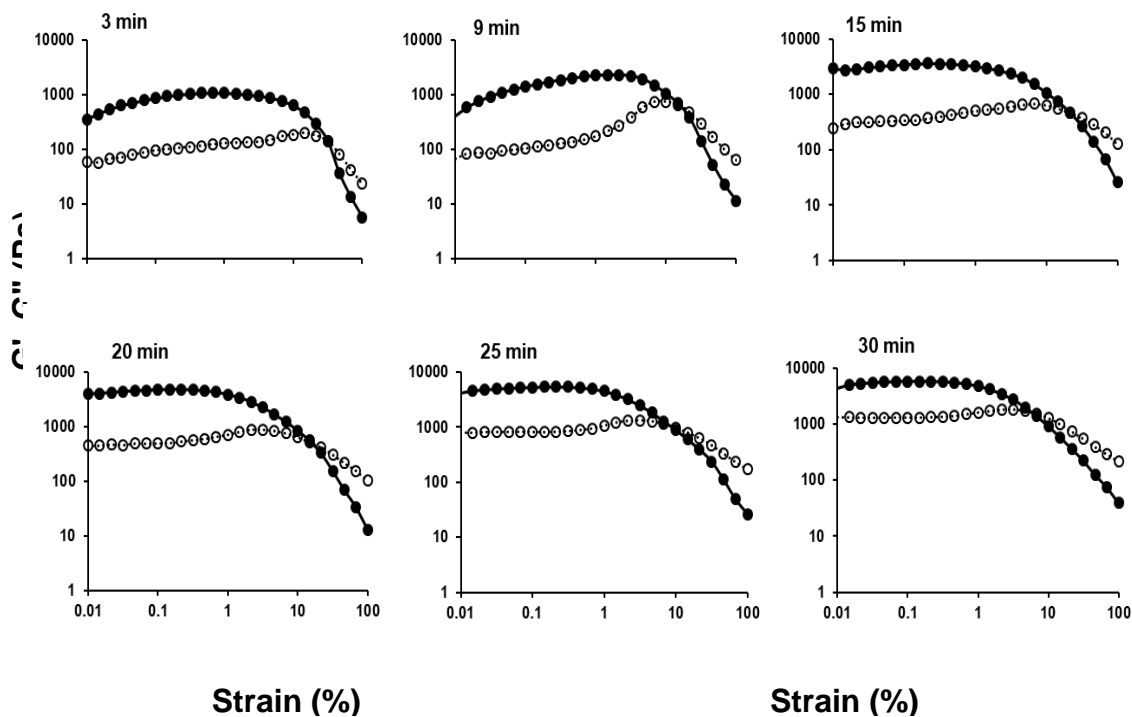
وجود LVR و مقادیر به طور قابل توجه بالاتر G' بر G'' در این ناحیه برای نانومولسیون‌های تهیه شده به وسیله بیش از ۱۵ دقیقه همگن کردن، بیانگر غالب شدن ماهیت الاستیک در این نمونه‌ها است. به عبارت دیگر، یک تغییر در ماهیت ساختاری نانومولسیون‌ها در این زمان همگن کردن ایجاد شده است که در توافق با آغاز روند کاهش جریان یافتن این نمونه و نزدیک شدن به ساختار ژل در مشاهدات ظاهری می‌باشد (شکل ۲). همچنین با افزایش مدت زمان همگن کردن، قدرت ساختاری ژل‌ها (G') به طور قابل توجهی افزایش یافت. پاسخ مکانیکی وابستگی به فرکانس نانومولسیون‌ها و نانوزل‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. مشابه نتایج روبش کرنش، برای همه نمونه‌ها، G' در تمام دامنه فرکانس ۲۰-۰/۰۴ Hz به طور قابل توجهی بالاتر از G'' بود. هر چند به جز نمونه‌ای که ۳ دقیقه همگن شده بود، مقدار G' و وابستگی به فرکانس در بقیه نمونه‌ها تفاوت چندانی نداشتند. با این وجود، وابستگی کم به فرکانس در نمونه‌های نانو ژل (نمونه‌های تهیه شده با ۱۵، تا ۳۰ دقیقه همگن کردن) تأییدی بر وجود ماهیت ویسکوالاستیک ژل‌هاست. G'' نمونه‌ها یک تقعر باریک را در دامنه فرکانس بررسی شده نشان داد. چنین تقعری در وابستگی G'' به فرکانس امولسیون‌ها توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است. این تقعر از کم شدن اولیه در مقدار G'' (به دلیل نوآرایی خیلی آهسته در شبکه قطرات) و سپس افزایش بعدی

پاسکال به ۵۵۷۸ پاسکال افزایش یافت. البته تغییر ناگهانی در
قدرت ژل

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که ژل‌های نانوامولسیون می-توانند با کاهش اندازه قطرات امولسیون و در کسر حجمی روغن کمتر نسبت به امولسیون‌های با اندازه قطرات بزرگتر به دست آیند. به عنوان مثال نانوامولسیون ۴۰٪ روغن در آب با اندازه قطرات ۱۱۶ نانومتر تقریباً کسر حجمی معادل با ۵۰٪ روغن را ایجاد کرد. این موضوع قابلیت زیادی در تولید فرآورده‌های غذایی کم چرب و همچنین گسترش فواید کاربرد فن آوری نانو در سیستم‌های غذایی نرم مثل ژله‌ها، خمیرها، دسر ها و ... دارد. هر چند کاربرد عملی آن نیازمند تحقیقات بیشتر با استفاده از تکنیک‌ها و سورفاکتانت‌های متنوع دارد.

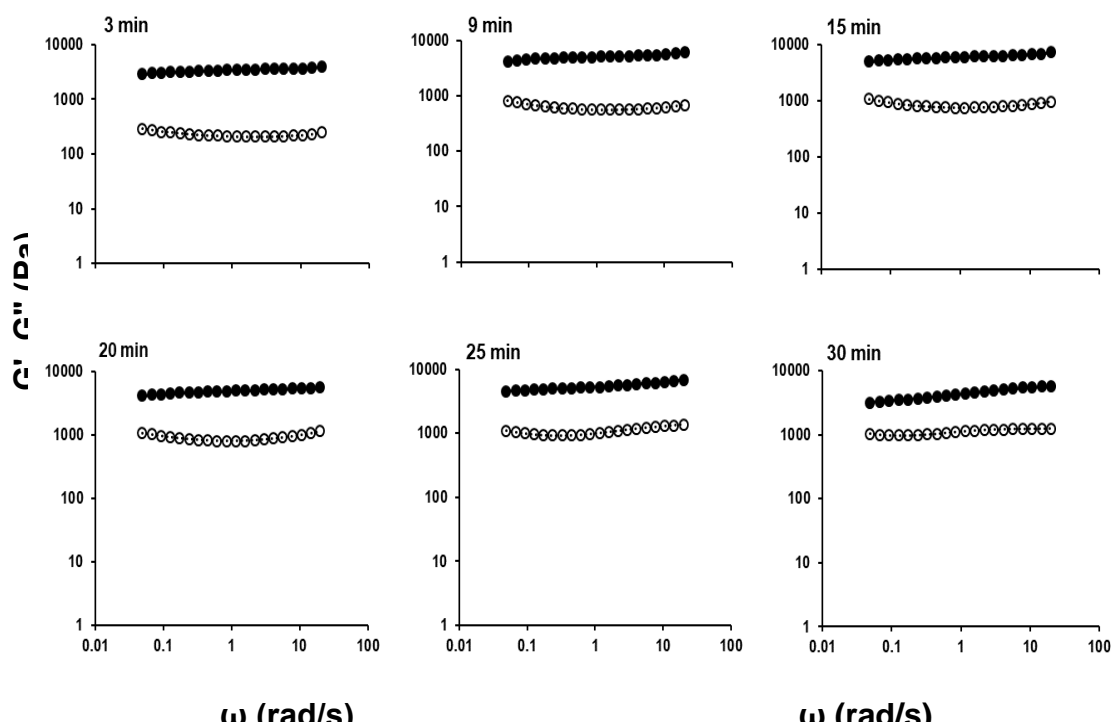
(۳۲۸۵ پاسکال) در کسر حجمی حدود ۰/۴۸۰ که معادل با اندازه ذره ۱۴۰ نانومتر است اتفاق افتاد که در توافق با نتایج رویش کرنش و مشاهدات ظاهری است. از این یافته ها می-توان نتیجه گیری کرد که اندازه ذره حدود ۱۴۰ نانومتر، یک نقطه عطف در تبدیل نانوامولسیون مایع به ژل ویسکوالاستیک است بطوری که در آن Φ امولسیون به مقدار مناسب جهت نشان دادن خصوصیات ساختاری معادل با مقدار بالاتر روغن می‌رسد.

۴- نتیجه گیری



شکل ۴- تغییرات G' (●) و G'' (○) نانوامولسیون‌های تهیه شده در زمان‌های متفاوت (۳-۳۰ دقیقه)

همگن کردن با فراصوت به عنوان تابعی از کرنش



شکل ۵- تغییرات G' (●) و G'' (○) نانوامولسیون‌های تهیه شده در زمان‌های متفاوت (۳-۳۰)

دقیقه) همگن کردن با فراصوت به عنوان تابعی از فرکانس

۵- منابع

lipase digestibility. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(1): 415-27. 7- Mason, T. G., Wilking, J. N., Meleson, K., Chang, C. B. and Graves, S. M. 2006. Nanoemulsions: formation, structure, and physical properties. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 18(41): R635.

8- McClements, D. J. 2011. Edible nanoemulsions: fabrication, properties, and functional performance. *Soft Matter*, 7(6): 2297-316.

9- McClements, D. J. and Rao, J. 2011. Food-grade nanoemulsions: formulation, fabrication, properties, performance, biological fate, and potential toxicity. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51(4): 285-330.

10- Mehmood, T., Ahmad, A., Ahmed, A. and Ahmed, Z. 2017. Optimization of olive oil based O/W nanoemulsions prepared through ultrasonic homogenization: A response surface methodology approach. *Food Chemistry*, 229(Supplement C): 790-6.

11- Nespolo, S. A., Bevan, M. A., Chan, D. Y. C., Grieser, F. and Stevens, G. W. 2001.

1- Anandharamakrishnan, C. 2014. Techniques for Formation of Nanoemulsions. *Techniques for Nanoencapsulation of Food Ingredients*. New York, NY: Springer New York, pp. 7-16.

2- Datta, S. S., Gerrard, D. D., Rhodes, T.S., Mason, T. G. and Weitz, D. A. 2011. Rheology of attractive emulsions. *Physical Review E*, 84(4): 1-7.

3- Erramreddy, V. V. and Ghosh, S. 2014. Influence of emulsifier concentration on nanoemulsion gelation. *Langmuir*, 30(37): 11062-74.

4- Erramreddy, V. V. and Ghosh, S. 2015. Influence of droplet size on repulsive and attractive nanoemulsion gelation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 484(Supplement C): 144-52.

5- Hashtjin, A. M. and Abbasi, S. 2015. Nano-emulsification of orange peel essential oil using sonication and native gums. *Food Hydrocolloids*, 44(Supplement C): 40-8.

6- Lee, S. J., Choi, S. J., Li, Y., Decker, E. A. and McClements, D. J. 2011. Protein-stabilized nanoemulsions and emulsions: comparison of physicochemical stability, lipid oxidation, and

Hydrodynamic and electrokinetic properties of decane droplets in aqueous sodium dodecyl sulfate solutions. *Langmuir*, 17(23):7210-8.

12- Peng, Y., Meng, Q., Zhou, J., Chen, B., Xi, J., Long, P. and et al. 2018. Nanoemulsion delivery system of tea polyphenols enhanced the bioavailability of catechins in rats. *Food Chemistry*, 242(Supplement C): 527-32.