

خواص رئولوژیکی پایا و دینامیک امولسیون‌های حاوی صمغ دانه بارهنگ استخراج شده با پیش تیمار فراصوت

رسول نیکنام^۱، علی ایاسه^{۲*}، بابک قنبرزاده^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- استادیار، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- استاد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت: ۹۶/۰۹/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۶/۰۴)

چکیده

خصوصیات رئولوژیکی امولسیون‌های حاوی صمغ دانه بارهنگ استخراج شده با پیش تیمار فراصوت با مقادیر متفاوت (۰/۳، ۰/۵ و ۱/۱ وزنی - حجمی) در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. خصوصیات رئولوژیکی پایا در سه گروه اصلی شامل داده‌های سرعت برشی - تنش برشی، ویسکوزیته ظاهری - سرعت برشی و تنش برشی - زمان بررسی شدند. در میان مدل‌های مورد استفاده جهت برازش داده‌های تنش برشی - سرعت برشی، مدل هرشل بالکلی، داده‌های ویسکوزیته ظاهری - سرعت برشی، مدل کارائی و برای داده‌های تنش برشی - زمان، مدل تئو - بوگر با توجه به مقادیر R^2 و RMSE انتخاب گردید. نتایج آزمون‌های رئولوژی دینامیک شامل آزمون کرنش و فرکانس متغیر مشخص کرد که تمامی امولسیون‌ها رفتار جامدگون (الاستیک) از خود نشان دادند. علاوه بر این، از رابطه کوکس - مرز برای بررسی ارتباط بین ویسکوزیته کمپلکس (η^*) به عنوان تابعی از فرکانس زاویه‌ای و ویسکوزیته ظاهری (η_a) به عنوان تابعی از سرعت برشی استفاده گردید. نتایج حاصل نشان داد که در همه امولسیون‌ها، مقادیر ویسکوزیته کمپلکس بیشتر از ویسکوزیته ظاهری بود و در نتیجه این نمونه‌ها از این قانون پیروی نکردند.

کلید واژگان: صمغ دانه بارهنگ، استخراج با پیش تیمار فراصوت، امولسیون، خواص رئولوژیکی پایا، خواص رئولوژیکی دینامیک

* مسئول مکاتبات: ayaseh@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

امولسیون یک سیستم دو فازی متشکل از دو مایع غیر قابل امتزاج است که یکی از آن‌ها به صورت فاز پراکنده در فاز دیگر واقع شده است. امولسیون‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: امولسیون‌های روغن در آب (O/W) و امولسیون‌های آب در روغن (W/O). امولسیون‌ها به طور طبیعی از لحاظ ترمودینامیکی ناپایدار هستند و افزودن امولسیفایرها و پایدارکننده‌ها سبب پایداری امولسیون‌ها در طول نگهداری می‌شود [۱]. امولسیفایرها ترکیبات فعال سطحی هستند که قادر به تجمع در لایه بین‌سطحی روغن - آب بوده و از انبوهش یا هم‌آمیختن قطرات ممانعت می‌کنند. در مقابل، پایدارکننده‌ها، بیومولکول‌های با وزن مولکولی بالا هستند که پایداری امولسیون را با افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته یا ایجاد ساختار ژل مانند بهبود می‌بخشند که سبب کاهش و یا توقف حرکت قطرات می‌گردد [۲]. هیدروکلوئیدها، بیوپلیمرهای پلی‌ساکاریدی یا پروتئینی هیدروفیلیک یا آمفی فیلیک با خصوصیات عملگرایی هم‌چون قوام دهندگی، ژل کنندگی و پایدار کنندگی هستند که به طور وسیع در محصولات غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳]. پلی‌ساکاریدها بیشتر عوامل پایدار کننده هستند در حالی که بعضی از آن‌ها می‌توانند به عنوان عامل فعال سطحی عمل کرده و دارای خواص امولسیفایری و کف کنندگی باشند [۴]. فعالیت سطحی پلی‌ساکاریدها می‌تواند به دلیل وجود گروه هیدروفوبیک مانند متیل یا استیل در ساختار پلی‌ساکارید باشد (مانند صمغ تراگاکانت، پکتین، نشاسته‌های تغییر یافته و سلولزهای تغییر یافته) یا می‌تواند به دلیل وجود جزء پروتئینی در ساختار پلی‌ساکارید باشد (مانند صمغ عربی) [۵]. به دلیل افزایش تقاضا برای استفاده از هیدروکلوئیدها در سال‌های اخیر، معرفی منابع هیدروکلوئیدی جدید با خصوصیات کاربردی مناسب به یکی از دغدغه‌های اصلی محققان شیمی مواد غذایی تبدیل شده است [۶]. دانه بارهنگ با نام علمی *Plantago major L.* زیرگروه خانواده *Plantaginaceae* می‌باشد که به صورت وسیع در جهان و به ویژه ایران کشت می‌شود. به طور سنتی، از این دانه به عنوان بهبود دهنده زخم، تقویت کننده سیستم ایمنی و آنتی‌اکسیدان استفاده می‌شود [۷].

خواص قوام دهندگی و ژل کنندگی هیدروکلوئیدها سبب استفاده گسترده آن‌ها در بررسی خصوصیات رئولوژیکی امولسیون‌های روغن در آب شده است و این مورد در پایداری امولسیون‌های حاصل مؤثر است [۸]. از خواص رئولوژیکی پایا جهت بررسی خصوصیات رئولوژیکی مستقل از زمان و وابسته به زمان امولسیون‌ها استفاده می‌گردد. اغلب امولسیون‌ها رفتار غیر نیوتنی را از خود نشان می‌دهند [۹]. بررسی خصوصیات رئولوژیکی امولسیون‌ها در کنترل کیفیت این مواد در طول فرآیند، انتقال و نگهداری حائز اهمیت است. از طرف دیگر، آزمون‌های رئولوژیکی به تولید کننده این امکان را می‌دهد که محصول با قوام کافی و بافت مناسب تولید کند [۱۰]. رئولوژی فاز پیوسته، ماهیت قطرات و ماهیت برهم‌کنش‌های قطره - قطره به عنوان عواملی هستند که رئولوژی امولسیون‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۱۱]. مدل‌های مختلفی هم‌چون قانون توان، مدل بینگهام، مدل هرشل بالکلی، مدل کاسون، مدل کارانی و مدل هینز برای توصیف رفتار روان شوندگی با برش امولسیون‌های غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۲]. هم‌چنین، مدل‌های ولتمن، فیگونی-شومارکر و تئو-بوگر برای بررسی رفتار تیکسوتروپیک امولسیون‌ها استفاده می‌شوند. بررسی خواص رئولوژیکی دینامیک امولسیون‌های حاوی صمغ دانه بارهنگ برای تعیین پارامترهایی هم‌چون مدول الاستیک (G') و مدول ویسکوز (G'') می‌باشد. این دو پارامتر تشکیل دهنده پارامتر دیگری به نام مدول کمپلکس (G^*) می‌باشند. هم‌چنین، برای ارزیابی رفتار شبه مایع و شبه جامد امولسیون‌ها از تانژانت افت ($\tan\delta$) استفاده می‌گردد [۱۳ و ۱۴ و ۱۵]. در این تحقیق، جهت افزایش پایداری و تغییر خصوصیات رئولوژیکی امولسیون‌های دارای روغن آفتابگردان، از صمغ دانه بارهنگ استفاده گردید. انتخاب روغن آفتابگردان به دلیل خصوصیات ظاهری مناسب و غنی بودن از اسیدهای چرب امگا ۶ و آنتی‌اکسیدان انجام گرفت [۱۶]. هدف اصلی این مقاله، بررسی تأثیر صمغ دانه بارهنگ بر خصوصیات رئولوژیکی امولسیون‌های روغن در آب حاوی روغن آفتابگردان (۱۵٪ حجمی - حجمی) می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آماده سازی نمونه

دانه‌های بارهنگ استفاده شده در این تحقیق از بازار محلی تبریز خریداری شده و پس از بسته بندی در ظروف پلاستیکی، تا زمان استفاده در جای خشک و خنک نگهداری شدند. همه مواد شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق دارای درجه آنالیتیکال بودند.

۲-۲- استخراج صمغ دانه بارهنگ با پیش تیمار

فراصوت

ابتدا برای تمیز کردن دانه‌های بارهنگ، این دانه‌ها به صورت کامل در آب مقطر غوطه ور شدند و به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد مخلوط گشتند. سپس دانه‌های تمیز شده، به نسبت ۱ به ۱۰ با آب مقطر مخلوط شدند تا فرآیند سونیکاسیون صورت گیرد. برای اعمال پیش تیمار فراصوت، از دستگاه فراصوت پروب (فاپن، ایران) استفاده شد و ۳ متغیر توان فراصوت (۲۰۰ تا ۴۰۰ وات)، دمای فراصوت (۲۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد) و زمان فراصوت (۱۵ تا ۳۰ دقیقه) به عنوان متغیرهای این فرآیند در نظر گرفته شدند که براساس بهینه‌سازی صورت گرفته با روش سطح پاسخ^۱ و طرح Box - Behnken، توان ۴۰۰ وات، دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد و زمان ۳۰ دقیقه حالت‌های بهینه این مرحله بودند. سپس، محلول آب و دانه فیلتر شده و دانه‌ها با آب مقطر حرارت داده شده (حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد) مخلوط شدند. ۳ متغیر نسبت دانه به آب مقطر (۱:۱۰ تا ۱:۲۰)، دمای استخراج (۵۵ تا ۷۵ درجه سانتی‌گراد) و زمان استخراج (۲۰ تا ۴۰ دقیقه) به عنوان متغیرهای مؤثر در مرحله استخراج در نظر گرفته شدند که براساس بهینه‌سازی صورت گرفته، نسبت دانه به آب مقطر ۱ به ۲۰، دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد و زمان ۴۰ دقیقه حالت‌های بهینه این مرحله بودند. پس از مخلوط شدن کامل دانه‌ها و آب مقطر در دما و زمان مشخص، از یک اکستراکتور مجهز به صفحه چرخنده (پارس خزر، ایران) جهت جدا سازی موسیلاژ از دانه‌ها استفاده شد. سپس، عمل فیلتراسیون صورت گرفت. در مرحله بعد، از اتانول ۹۶٪ به نسبت ۱ به ۳

برای رسوب‌دهی صمغ استفاده گشت. صمغ رسوب داده شده با پارچه کتان فیلتر شده و بعد ۲ بار با اتانول ۷۰٪ و ۲ بار با اتانول ۹۶٪ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه در هر بار شستشو داده شد. این فرآیند شست و شو جهت حذف کامل باقی مانده‌های احتمالی دانه‌ها و بهبود هرچه بیشتر رنگ صمغ تولیدی صورت گرفت. بعد از شستشو، صمغ استحصال شده به مدت ۱۶ ساعت در آون (فن آزما گستر، ایران) با دمای ۴۵ درجه سانتی-گراد قرار داده شد. سپس، صمغ خشک شده، آسیاب شده و پس از بسته بندی در جای خشک و خنک قرار داده شد [۱۷].

۲-۳- تولید امولسیون

برای تهیه فاز آبی محلول‌های امولسیون حاوی صمغ دانه بارهنگ، ۳ غلظت ۰/۳، ۰/۵ و ۱٪ وزنی - حجمی صمغ دانه بارهنگ در ۱۰۰ سی‌سی آب مقطر تهیه شد (در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت). سپس، محلول‌های حاصل به مدت ۲۴ ساعت در یخچال قرار داده شدند تا عمل هیدراسیون به صورت کامل انجام گیرد. برای تهیه فاز روغنی، روغن آفتابگردان (۱۵٪ حجمی - حجمی) به صورت آرام و تدریجی به فاز آبی افزوده شد تا یک امولسیون درشت تشکیل شود. امولسیون اولیه تشکیل شده در ۲۰۰۰۰ دور در دقیقه با هم‌ژنایزر اولتراتوراکس (JKA - WERKEE، آلمان) برای ۶ دقیقه در سیکل‌های هم‌ژنایزاسیون (۱ دقیقه) - استراحت (۲ دقیقه) هم‌ژن شد [۱۸].

۲-۴- اندازه گیری خواص رئولوژیکی

اندازه گیری خواص رئولوژیکی امولسیون‌های حاوی صمغ دانه بارهنگ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد توسط دستگاه رئومتر Anton Paar Physica MCR 301 ساخت کشور اتریش با قطر ۵۰ میلی‌متر، اندازه گپ ۰/۲۰۶ میلی‌متر و زاویه ۴ درجه مجهز به سیستم کنترل دمایی و با پروب استوانه‌ای هم مرکز انجام شد [۱۹].

۲-۵- خواص رئولوژیکی پایا^۲

۲-۵-۱- رابطه تنش برشی^۳ - سرعت برشی^۴

2. Steady shear flow
3. Shear stress
4. Shear rate

1. Response surface methodology (RSM)

در این معادله، σ ، تنش برشی (Pa)، γ ، سرعت برشی (s^{-1})، k_C ضریب قوام کاسون ($Pa \cdot s^n$) و σ_0 نشان دهنده تنش تسلیم (Pa) می‌باشد [۲۴].

مدل میزرائی - بیرک¹²
(۵)

$$\sigma^{0.5} = k_M (\gamma)^{n_M} + \sigma_0^{0.5}$$

در این معادله، σ ، تنش برشی (Pa)، γ ، سرعت برشی (s^{-1})، k_M ضریب قوام میزرائی - بیرک ($Pa \cdot s^n$) و σ_0 نشان دهنده تنش تسلیم (Pa) می‌باشد [۲۵].

مدل هینز¹³

$$\sigma^{\frac{2}{3}} = k_H (\gamma)^{\frac{2}{3}} + \sigma_0^{\frac{2}{3}} \quad (۶)$$

در این معادله، σ ، تنش برشی (Pa)، γ ، سرعت برشی (s^{-1})، k_H ضریب قوام هینز ($Pa \cdot s^n$) و σ_0 نشان دهنده تنش تسلیم (Pa) می‌باشد [۲۶].

۲-۵-۲- رابطه ویسکوزیته ظاهری¹⁴ - سرعت برشی

برازش داده‌های ویسکوزیته ظاهری - سرعت برشی با مدل زیر صورت گرفت [۲۷]:
مدل کارائی¹⁵

$$\eta_a = \eta_\infty + \frac{(\eta_0 - \eta_\infty)}{[1 + (\gamma / \gamma_c)^2]^m} \quad (۷)$$

در این معادله، η_a ویسکوزیته ظاهری (Pa.s)، η_0 ویسکوزیته نیوتنی اولیه (Pa.s)، η_∞ ویسکوزیته بی‌نهایت (Pa.s)، γ_c نشان دهنده سرعت برشی بحرانی (s^{-1})، γ ، سرعت برشی و m نشان دهنده درجه روان شوندگی با برش می‌باشد [۲۸].

۲-۵-۳- رابطه تنش برشی - زمان

برای بررسی خواص رئولوژیکی وابسته به زمان، سرعت برشی، ثابت (s^{-1}) (۵۰) در نظر گرفته شد و تنش برشی به عنوان تابعی از زمان در نظر گرفته شد و داده‌های تنش برشی - زمان با مدل‌های زیر برازش شدند [۲۹]:

مدل ولتمن¹⁶

تعیین خواص رئولوژیکی پایا امولسیون‌های حاوی صمغ دانه بارهنگ در سرعت‌های برشی $1 - 100 s^{-1}$ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد صورت گرفت. برای این منظور، پارامترهای تنش برشی به صورت مستقیم و پیوسته در سرعت‌های برشی ۱ تا ۱۰۰ s^{-1} در منحنی نزولی و ۱ تا ۱۰۰ s^{-1} در منحنی صعودی و ۷۱ نقطه اندازه‌گیری شدند که ۳۳ نقطه مربوط به منحنی صعودی، ۳۳ نقطه مربوط به منحنی نزولی و ۵ نقطه مربوط به قسمت استراحت در سرعت برشی $100 s^{-1}$ است. داده‌های تنش برشی - سرعت برشی با مدل‌های زیر برازش شدند [۲۰]:
قانون توان⁵

$$\sigma = k (\gamma)^{n_p} \quad (۱)$$

در این معادله، σ ، تنش برشی (Pa)، γ ، سرعت برشی (s^{-1})، k ضریب قوام⁶ ($Pa \cdot s^n$) و n نشان دهنده شاخص رفتار جریان⁷ (بدون بعد) می‌باشد [۲۱].

مدل بینگهام⁸

$$\sigma = k_B \gamma + \sigma_{0B} \quad (۲)$$

در این معادله، σ ، تنش برشی (Pa)، γ ، سرعت برشی (s^{-1})، k_B ضریب قوام بینگهام ($Pa \cdot s^n$) و σ_0 نشان دهنده تنش تسلیم (Pa)⁹ می‌باشد [۲۲].

مدل هرشل بالکلی¹⁰

$$\sigma = k_H (\gamma)^{n_H} + \sigma_{0H} \quad (۳)$$

در این معادله، σ ، تنش برشی (Pa)، γ ، سرعت برشی (s^{-1})، k_H ضریب قوام هرشل بالکلی ($Pa \cdot s^n$) و σ_0 نشان دهنده تنش تسلیم (Pa) می‌باشد [۲۳].

مدل کاسون¹¹

(۴)

$$\sigma^{0.5} = k_C (\gamma)^{0.5} + \sigma_0^{0.5}$$

5. Power law
6. Consistency coefficient
7. Flow behavior index
8. Bingham model
9. Yield stress
10. Herschel - Bulkley model
11. Casson model

12. Mizrahi - Berk model
13. Heinz model
14. Apparent viscosity
15. Carraeu model
16. Weltman model

قرار گرفتند. جهت بررسی نتایج از نرم افزار Rheoplus (32/ version V3.40) استفاده شد [۳۴].

۲-۷- آنالیز آماری

داده‌های رئولوژیکی توسط Rheoplus، نرم افزار ویژه دستگاه رئومتر تجزیه و تحلیل گردید. برای تعیین پارامترهای مدل، کارآیی مدل و مقایسه بین مدل‌های رئولوژیکی مختلف، ضریب تبیین (R^2) و مربع خطای استاندارد که توسط میانگین ریشه مربع خطا²³ (RMSE) نشان داده می‌شود، از نرم افزار Matlab (R2014a) استفاده شد.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- خواص رئولوژیکی پایا

۳-۱-۱- داده‌های سرعت برشی - تنش برشی

عامل اصلی پایداری هیدروکلوئیدها در سیستم‌های امولسیون‌ها از طریق اصلاح ویسکوزیته فاز آبی است. علاوه بر این، پایداری ماده غذایی طی نگهداری طولانی مدت و احساسی که بافت مواد غذایی در دهان ایجاد می‌کند، تحت تأثیر رفتار رئولوژیکی محصول است و از نظر پذیرش مصرف کننده اهمیت دارد [۱۸]. همان طور که در نمودار شماره ۱ هم مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار صمغ از ۰/۳ تا ۰/۱٪ وزنی - حجمی، ویسکوزیته امولسیون‌ها افزایش پیدا می‌کند. هم چنین، با افزایش سرعت برشی، ویسکوزیته ظاهری کاهش پیدا می‌کند که نشان دهنده رفتار روان شونده‌گی با برش در امولسیون‌های حاوی صمغ دانه بارهنگ با مقادیر مختلف (۰/۳، ۰/۵ و ۰/۱٪ وزنی - حجمی) می‌باشد. رفتار روان شونده‌گی با برش یکی از خصوصیات مهم در فرمولاسیون امولسیون‌های روغن در آب است، زیرا کاهش ویسکوزیته ظاهری در فرآیندهایی با تنش برشی بالا مانند پمپ کردن و پر کردن منجر به سهولت فرآیند می‌گردد و در هنگام مصرف با افزایش ویسکوزیته ظاهری محصول احساس دهانی مطلوبی ایجاد می‌کند. هم چنین، این رفتار منجر به بهبود پراکنندگی ذرات روغن در فاز مایع شده و از به هم چسبیدن ذرات روغن و دو فاز شدن آن‌ها طی نگهداری جلوگیری می‌کند [۳۵]. برآزش داده‌های سرعت برشی - تنش برشی با مدل‌های قانون توان،

$$\sigma = A + B \ln(t) \quad (8)$$

در این معادله، σ ، تنش برشی (Pa)، t ، زمان (s)، A ، ضریب تنش برشی اولیه و B نشان دهنده ضریب شکست ساختاری تیکسوتروپیک با زمان است [۳۰].
مدل فیگونی - شوماکر¹⁷

$$\sigma = \sigma_e + (\sigma_i - \sigma_e) \exp(-kt) \quad (9)$$

در این معادله، σ ، تنش برشی (Pa)، σ_i ، تنش اولیه (Pa)، σ_e ، تنش تعادلی در رفتار ویسکوالاستیک جامد بعد از گذشت زمان t (Pa)، k ، ثابت سینتیک تخریب ساختاری و t ، نشان دهنده زمان (s) است [۳۱].

مدل تیو - بوگر¹⁸

$$\sigma = \sigma_e + \frac{\sigma_i - \sigma_e}{1 + kt} \quad (10)$$

در این معادله، σ ، تنش برشی (Pa)، σ_i ، تنش اولیه (Pa)، σ_e ، تنش تعادلی در رفتار ویسکوالاستیک جامد بعد از گذشت زمان t (Pa)، k ، ثابت سینتیک تخریب ساختاری و t ، نشان دهنده زمان (s) است [۳۲].

۲-۶- خواص رئولوژیکی دینامیک¹⁹

برای تعیین خصوصیات ویسکوالاستیک امولسیون‌ها، محاسبات خواص رئولوژیکی دینامیک صورت گرفت که این بخش خود به ۲ بخش مجزا به صورت زیر تقسیم می‌شود:

۲-۶-۱- آزمون روبش کرنش²⁰

آزمون کرنش متغیر در فرکانس ثابت ۱ هرتز و در دامنه سرعت برشی ۰/۱ تا ۱۰٪ برای تمامی نمونه‌ها به منظور تعیین ناحیه ویسکوالاستیک خطی²¹ انجام گرفت. جهت بررسی نتایج از نرم افزار Rheoplus (32/ version V3.40) استفاده شد [۳۳].

۲-۶-۲- آزمون روبش فرکانس²²

آزمون فرکانس متغیر در دامنه فرکانس زاویه‌ای ۰/۱ تا ۱۰۰ هرتز و سرعت برشی ثابت ۰/۱٪ انجام شد. مدول‌های ذخیره (G')، افت (G'') و تانژانت افت ($\tan\delta$) در این قسمت مورد بررسی

17. Figuni - Shoemaker model

18. Tiu - Boger model

19. Dynamic rheology

20. Strain sweep

21. Linear viscoelastic region (LVR)

22. Frequency sweep

هرشل بالکلی، بینگهام، هینز، کاسون و میزرائی - بیرک صورت گرفت که در جدول ۱ مشاهده می‌گردد.

Table 1 The parameters of shear rate – shear stress based rheological models for the emulsions containing PMS gum

Models	0.3%	0.5%	1%
Power law model			
k_p (Pa.s ^{n_p})	0.06344	0.0648	0.5013
n_p	0.8102	0.8077	0.6619
R^2	0.9999	1	0.9996
RMSE	0.006752	0.0046	0.05716
Bingham model			
σ_0 (Pa)	0.1859	0.1941	0.9508
k_B (Pa.sn)	0.02543	0.0256	0.09618
R^2	0.994	0.9947	0.9761
RMSE	0.06037	0.0573	0.4615
Herschel – Bulkley model			
σ_0 (Pa)	0.0112	0.0557	0.1929
k_H (Pa.sn)	0.06574	0.0766	0.5646
n_H	0.8032	0.7111	0.6395
R^2	0.9999	1	0.9999
RMSE	0.006279	0.0045	0.04173
Casson model			
σ_0 (Pa)	0.6692	0.6697	0.931
k_C (Pa.sn)	0.0006988	0.000715	0.01089
R^2	0.992	0.9935	0.97
RMSE	0.1999	0.1843	1.085
Mizrahi – Berk model			
σ_0 (Pa)	0.03723	0.06927	0.907
k_M (Pa.sn)	0.004512	0.003927	0.3115
n_M	0.595	0.360	0.276
R^2	0.9999	0.9999	0.9985
RMSE	0.01196	0.01326	0.2778
Heinz model			
σ_0 (Pa)	0.6961	0.7137	0.9532
k_H (Pa.sn)	0.08334	0.08348	0.1962
R^2	0.9954	0.9953	0.9784
RMSE	0.03428	0.03479	0.1765

با وزن مولکولی در ارتباط باشد، چون مقادیر وزن مولکولی نقش بسیار مهمی در ویسکوزیته محلول‌های صمغ و امولسیون‌های حاوی آن‌ها دارد [۳۷]. برازش داده‌های تنش برشی - سرعت برشی امولسیون‌ها با مدل بینگهام پارامتر جدیدی به نام تنش تسلیم را معرفی کرد. تنش تسلیم نقش بسیار مهمی را در ثبات و در کنار هم ماندن اجزای مختلف ماده غذایی ایفا می‌کند [۳۸]. سیستم‌های کلوییدی دارای شبکه سه بعدی ساختار ژل مانند پلی‌ساکارید اغلب باعث ایجاد تنش تسلیم می‌شود که در مقادیر کمتر از آن مانند یک جامد الاستیک و بیشتر از آن مانند یک مایع ویسکوز عمل می‌کند [۳۹]. تنش تسلیم باعث پایداری

همه مدل‌های مورد بررسی دارای میزان R^2 بالا (۱ - ۰/۹۷) و RMSE پایین (۶/۰۸۵ - ۰/۰۴۶) بود. براساس قانون توان، همه امولسیون‌های مورد بررسی رفتار روان شوندگی با برش را از خود نشان دادند که این امر را می‌توان از مقادیر شاخص جریان - (n_p) استنباط کرد که در همه نمونه‌ها این مقدار کمتر از ۱ بود [۳۶]. لازم به توضیح است که با افزایش مقدار صمغ از ۰/۳٪ به ۱٪ وزنی - حجمی، مقادیر شاخص جریان از ۰/۸۱۰ به ۰/۶۶۱ کاهش یافت. با افزایش مقدار صمغ از ۰/۳٪ به ۱٪ وزنی - حجمی، مقادیر ضریب قوام (k) حاصل از قانون توان از ۰/۰۶۳ به ۰/۰۵۱ Pa.sⁿ رسید. مقادیر ضریب قوام بالاتر می‌تواند

روی رفتار جریان‌های امولسیون‌ها مؤثر بود. افزایش مقدار صمغ زانتان سبب افزایش ضریب قوام در قانون توان و کاهش شاخص جریان شد [۴۱]. نتایج برازش داده‌های تنش برشی - سرعت برشی نشان داد که مدل هرشل بالکلی به دلیل داشتن مقادیر R^2 بالا (۱ - ۰/۹۹) و مقادیر RMSE پایین (۰/۰۴۱۷۳) - ۰/۰۶۲۷۹ مناسب‌ترین مدل جهت برازش این داده‌ها می‌باشد که در جدول ۱ آورده شده است.

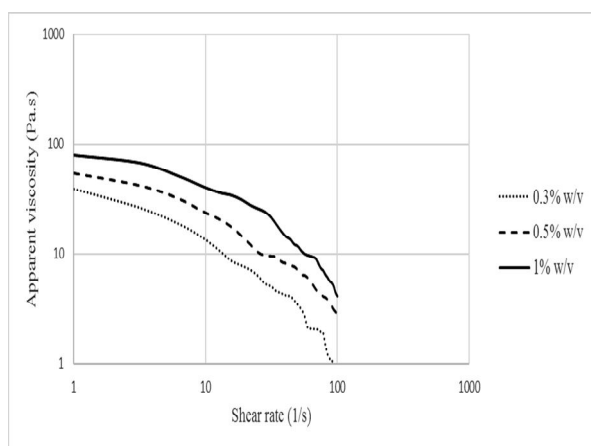


Fig 1 Apparent viscosity of emulsions containing PMS gum as a function of shear rate (1 – 100 s⁻¹)

۳-۱-۲- داده‌های ویسکوزیته ظاهری - سرعت برشی

همانطور که در بخش قبل بیان شد، امولسیون‌های حاوی صمغ دانه بارهنگ رفتار روان شوندگی با برش را از خود نشان دادند که چنین امولسیون‌های غذایی دارای هیدروکلوئید با رفتار روان شوندگی با برش در گستره سرعت برشی، ۳ نوع رفتار قابل پیش‌بینی است [۱۸]: (۱) در سرعت‌های برشی پایین، رفتار نیوتنی نمایان می‌گردد (ناحیه نیوتنی پایینی) و ویسکوزیته در این ناحیه را ویسکوزیته برشی صفر (η_0) می‌نامند (۲) در سرعت‌های برشی متوسط با افزایش سرعت برشی، ویسکوزیته کاهش پیدا می‌کند (رفتار روان شوندگی با برش) (۳) در سرعت‌های برشی بالا دوباره رفتار نیوتنی ظاهر می‌شود و ویسکوزیته در این ناحیه، ویسکوزیته بی‌نهایت (η_{∞}) نامیده می‌شود. برای برازش داده‌های ویسکوزیته ظاهری - سرعت برشی از مدل کارائی استفاده گردید (جدول ۲).

امولسیون‌های غذایی تحت تنش پایین می‌شود (به طور مثال، طی نگهداری و حمل‌ونقل که تنش اعمال شده معمولاً کمتر از تنش تسلیم است). در سیستم‌های امولسیون‌های دارای تنش تسلیم پدیده خامه‌ای شدن مہار می‌شود، زیرا تنش اعمال شده از طرف قطره برای حرکت از طریق فاز پیوسته کمتر از تنش تسلیم است. با افزایش مقدار صمغ از ۰/۳٪ به ۱٪ وزنی - حجمی، مقادیر تنش تسلیم بینگهام (σ_{0B}) و ضریب قوام بینگهام (k_B) از ۰/۱۸۵ به ۰/۹۵۰ Pa و ۰/۲۵ به ۰/۹۶ Pa.sⁿ افزایش پیدا کرد. با عبور جریان از تنش تسلیم، مدل بینگهام رفتار نیوتنی را از خود نشان می‌دهد. به همین دلیل، نمی‌تواند در تعیین رفتار جریان امولسیون‌های حاوی صمغ دانه بارهنگ نقش قابل توجهی داشته باشد. در مقدار صمغ ۱٪ وزنی - حجمی، مدل‌های کاسون و هیز با R^2 ۰/۹۷ و RMSE ۱/۰۸۵ و ۰/۱۷۶ توانایی کمتری در برازش داده‌ها نسبت به مدل‌های هرشل بالکلی و میزرائی - بیرک نشان دادند. مدل‌های هرشل بالکلی و میزرائی - بیرک بالایی در تعیین رفتار جریان امولسیون‌های حاصل از صمغ دانه بارهنگ با غلظت بالا (۱٪) نشان دادند (با R^2 ۰/۹۹۹ و RMSE ۰/۰۴۱۷ و ۰/۲۷۷۸). همانطور که در مدل‌های دارای تنش تسلیم مشاهده می‌گردد، امولسیون‌های حاوی ۱٪ وزنی - حجمی صمغ دانه بارهنگ، بالاترین تنش تسلیم را از خود نشان دادند که نمایانگر پایداری بالای این نمونه‌ها در مقابل خامه‌ای شدن می‌باشد. در طرف دیگر، امولسیون‌های حاوی ۰/۳ و ۰/۵٪ وزنی - حجمی از صمغ دانه بارهنگ، تنش تسلیم پایین‌تری را نشان دادند که به ساختار ژل ضعیف‌تر و یا اندازه قطرات بزرگتر آن‌ها ارتباط دارد [۳۹]. نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داد که برای برازش داده‌های تنش برشی - سرعت برشی امولسیون‌های حاوی صمغ دانه ریخان، مدل هرشل بالکلی به دلیل R^2 ۰/۹۹ و RMSE کمتر از ۰/۴۲، مناسب‌ترین مدل بود [۱۸]. سماواتی و همکاران (۲۰۱۲) داده‌های تنش برشی - سرعت برشی امولسیون‌های حاوی صمغ تراگاکانت را مورد بررسی قرار دادند و قانون توان را به عنوان مناسب‌ترین مدل جهت برازش انتخاب کردند [۴۰]. نتایج تحقیق Krstonosic و همکاران (۲۰۱۵) روی امولسیون‌های حاوی صمغ زانتان نشان داد که همه امولسیون‌ها رفتار روان شوندگی با برش داشتند و وجود صمغ زانتان (حتی در غلظت‌های کم) در نمونه‌ها به طور معنی‌داری

Table 2 Shear rate – apparent viscosity rheological parameters of the emulsions containing PMS gum

Models	0.3%	0.5%	1%
Carraeu model			
η_0 (Pa.s)	336.8	583.2	608.2
γ_c (s-1)	0.323	0.00075	0.00064
m	0.1499	0.1333	0.1085
R ²	0.9811	0.9973	0.9986
RMSE	0.156	0.8623	0.441

تیکسوتروپی به عنوان ویژگی مهم سیالات غیر نیوتنی به حساب می‌آید که به صورت کاهش در ویسکوزیته با افزایش زمان تعریف می‌گردد و تغییر شکل ایجاد شده در نتیجه این رفتار با حذف تنش دوباره به حالت قبلی برمی‌گردد [۴۳]. نمودار ۲ خصوصیات رئولوژیکی وابسته به زمان امولسیون‌های حاوی صمغ دانه بارهنگ را نشان می‌دهد. ویسکوزیته امولسیون‌ها با مقدار صمغ متفاوت (۰/۳، ۰/۵ و ۱٪ وزنی - حجمی) با گذشت زمان کاهش پیدا می‌کند، اما این کاهش کم است و نشان می‌دهد که امولسیون‌ها به طور کامل رفتار تیکسوتروپیک را از خود نشان نمی‌دهند. لازم به ذکر است که رفتار تیکسوتروپی امولسیون‌ها با شکسته شدن توده‌های قطرات یا از بین رفتن شبکه به هم پیوسته هیدروکلوئید به دلیل تنش وارد شده در ارتباط است که سبب کاهش ویسکوزیته می‌گردد [۴۴] برای محاسبه خواص رئولوژیکی وابسته به زمان باید دقت کافی صورت گیرد که علت آن ایجاد تغییرات غیر قابل پیش‌بینی در ساختار محلول هنگام انجام آزمون با ویسکومتر و انتقال آن می‌باشد. پس ماند (هیستریسیس) بین منحنی رفت و منحنی برگشت در نمودار تنش برشی - سرعت برشی مشاهده می‌شود که نشان دهنده رفتار وابسته به زمان است. جهت اندازه‌گیری مساحت لوپ هیستریسیس از نرم افزار Rheoplus ویژه دستگاه رئومتر استفاده شد. مساحت لوپ هیستریسیس به عنوان یک شاخص برای مقایسه کیفی به کار برده می‌شود زیرا میزان انرژی مورد نیاز برای تخریب جزئی ساختار ماده غذایی، متناسب با مساحت لوپ هیستریسیس است. مساحت لوپ هیستریسیس برای امولسیون‌های حاوی صمغ دانه بارهنگ با مقدار صمغ ۰/۳، ۰/۵ و ۱٪ وزنی - حجمی به ترتیب ۱/۸۴، ۴/۴۲ و ۱۵/۶۳ Pa/s به دست آمد.

از آنجایی که مقادیر ویسکوزیته بی نهایت دسپرسیون‌های غذایی به صورت معمول پایین است، لذا محاسبه آن‌ها دشوار است. برای همین، جهت جلوگیری از خطاهای احتمالی در محاسبات پارامترهای رئولوژیکی در این مدل، مقادیر ویسکوزیته بی نهایت در نظر گرفته نمی‌شود و قابل اغماض خواهد بود [۹]. با افزایش مقدار صمغ از ۰/۳٪ به ۱٪، مقادیر ویسکوزیته اولیه (ویسکوزیته صفر) امولسیون‌ها از ۳۳۶/۸ به ۶۰۸/۲ Pa رسید. به طور معمول، سرعت برشی بحرانی (γ_c) در مدل کارائی تعیین کننده پایان بخش نیوتنی و شروع رفتار روان شوندگی با برش می‌باشد. این پارامتر با افزایش مقدار صمغ از ۰/۳٪ به ۱٪ از ۰/۳۲۳ به ۰/۰۰۶۴ s⁻¹ رسید. پارامتر m عدد بدون بعدی است که نشان دهنده درجه روان شوندگی با برش می‌باشد و مقادیر آن با افزایش مقدار صمغ، از ۰/۱۴۹ به ۰/۱۰۸ رسید. نتایج برازش داده‌های ویسکوزیته ظاهری - سرعت برشی نشان داد که مدل کارائی دارای مقادیر R² بالا (۰/۹۹ - ۰/۹۸) و RMSE پایین (۰/۸۶۲ - ۰/۱۵۶) می‌باشد که در جدول ۲ نشان داده شده است. دلایل اصلی رفتار روان شوندگی با برش امولسیون‌ها می‌تواند مربوط به شکسته شدن توده‌های قطرات موجود در امولسیون و از بین رفتن برهمکنش‌های فیزیکی در طول اعمال تنش باشد که سبب کاهش میزان ویسکوزیته می‌گردد [۴۲]. سماواتی و همکاران (۲۰۱۲) برای برازش داده‌های سرعت برشی - ویسکوزیته ظاهری امولسیون‌های حاوی صمغ تراکاکانت از میان مدل‌های کراس و الیس، مدل کراس را به دلیل R² بالا و RMSE پایین انتخاب کردند. همچنین آن‌ها علت رفتار روان شوندگی با برش را در این امولسیون‌ها، شکسته شدن توده‌های قطرات و رفتار غیرنیوتنی فاز پیوسته تعیین کردند [۴۰].

۳-۱-۳- داده‌های تنش برشی - زمان

ترتیب از $1/419$ Pa به $1/577$ Pa و از $1/45$ به $1/622$ Pa افزایش یافت. مقادیر ثابت سیستیک تخریب ساختاری (k) در این مدل با افزایش مقدار صمغ از $0/072$ به $0/053$ کاهش یافت. همانند دو مدل بررسی شده، مدل تئو - بوگر نیز برای بررسی خواص رئولوژیکی وابسته به زمان استفاده گردید. مقادیر تنش اولیه (σ_i) و تنش تعادلی در رفتار ویسکوالاستیک بعد از گذشت زمان (σ_e) با افزایش مقدار صمغ از $0/3\%$ به 1% وزنی - حجمی به ترتیب از $0/972$ به $1/385$ Pa و از $1/453$ به $1/581$ Pa افزایش یافت. هم چنین، مقادیر ثابت سیستیک تخریب ساختاری (k) در این مدل با افزایش مقدار صمغ از $0/992$ به $0/317$ کاهش یافت. نتایج برآزش داده‌های تنش برشی - زمان نشان داد که مدل تئو - بوگر به دلیل داشتن مقادیر R^2 بالاتر ($0/93 - 0/98$) و RMSE پایین‌تر ($0/0012 - 0/0019$) بهترین مدل می‌باشد که در جدول ۳ آورده شده است.

همانطور که پیش‌بینی می‌شد با افزایش مقدار صمغ، پس‌ماند (هیستریسیس) افزایش یافت. برای بررسی خواص تیکسوتروپی و رئوپکتیکی امولسیون‌های حاوی صمغ دانه بارهنگ، سه مدل ولتمن، تئو - بوگر و فیگونی - شومارکر مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۳). به طور معمول، در امولسیون‌های با رفتار تیکسوتروپیک، مقادیر ضریب شکست ساختاری با زمان (B) در مدل ولتمن، منفی و در امولسیون‌های با رفتار رئوپکتیک، مثبت است. مقادیر این پارامتر در امولسیون‌های با مقدار صمغ $0/3\%$ ، $0/5\%$ و 1% وزنی - حجمی، $0/0059$ ، $0/0623$ و $0/0129$ به دست آمد. مدل دیگری که برای بررسی رفتار تیکسوتروپیک و نزول تنش وابسته به زمان مورد استفاده قرار گرفت، مدل فیگونی - شومارکر می‌باشد. مقادیر تنش اولیه (σ_i) و تنش تعادلی در رفتار ویسکوالاستیک بعد از گذشت زمان (σ_e) با افزایش مقدار صمغ از $0/3\%$ به 1% وزنی - حجمی به

Table 3 Shear stress – time rheological parameters of emulsions containing PMS gum

Models	0.3%	0.5%	1%
Weltman model			
A (Pa)	1.424	1.524	6.515
-B (Pa)	0.005901	0.006238	0.01299
R ²	0.8601	0.8782	0.8859
RMSE	0.002768	0.003588	0.005662
Figuni – Shoemaker model			
σ_i (Pa)	1.419	1.526	6.577
σ_e (Pa)	1.450	1.543	6.622
k (s ⁻¹)	0.07297	0.01803	0.005333
R ²	0.9109	0.8602	0.8117
RMSE	0.001736	0.002533	0.008211
Tiu – Bugar model			
σ_i (Pa)	0.9728	1.417	6.385
σ_e (Pa)	1.453	1.551	6.581
k (s ⁻¹)	0.9929	0.3287	0.3171
R ²	0.9872	0.9608	0.9399
RMSE	0.001953	0.001592	0.001206

رئولوژیکی وابسته به زمان به دلیل R^2 بالاتر و RMSE پایین‌تر مناسب می‌باشد [۴۵].

Singla و همکاران (۲۰۱۳) تحقیقی بر روی امولسیون‌های حاوی صمغ زانتان انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که مدل فیگونی - شومارکر از میان مدل‌های بررسی شده در خواص

آزمون روبش فرکانس، تعیین محدوده خطی ضروری محسوب می‌شود. از محدوده ویسکوالاستیک خطی جهت تعیین ژل‌های قوی از ضعیف استفاده می‌گردد. بیشتر بودن ناحیه ویسکوالاستیک خطی در امولسیون‌ها نشان دهنده پایداری بیشتر امولسیون در آزمون روبش کرنش می‌باشد [۴۶]. همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است، با انجام آزمون کرنش متغیر امکان تعیین دو ناحیه یعنی ناحیه ویسکوالاستیک خطی و ویسکوالاستیک غیر خطی فراهم می‌شود که در ناحیه ویسکوالاستیک غیر خطی، با افزایش درصد کرنش، مقادیر G' و G'' کاهش پیدا می‌کند [۴۷]. محدوده ناحیه ویسکوالاستیک خطی و پایان آن توسط کرنش بحرانی (γ_L) تعیین می‌گردد و تا زمان رسیدن به این محدوده، تغییر قابل توجهی در ساختار امولسیون پدید نمی‌آید. پارامترهای حاصل از آزمون روبش کرنش شامل مدول الاستیک (G')، مدول ویسکوز (G'')، تانژانت افت، کرنش بحرانی و کرنشی که از آن به بعد جریان ایجاد می‌شود، در جدول ۴ آورده شده است. مقادیر کرنش بحرانی امولسیون‌های حاوی مقادیر متفاوت صمغ دانه بارهنگ ۱ - ۰/۱٪ می‌باشد. مقادیر مدول ذخیره (G') امولسیون‌ها بالاتر از مدول ویسکوز (G'') در محدوده کرنش مورد بررسی می‌باشد (γ_f). بالاتر بودن مقادیر مدول الاستیک نسبت به مدول ویسکوز نشان دهنده رفتار جامدگون امولسیون‌های حاوی صمغ دانه بارهنگ است. به عبارتی نشان می‌دهد که محلول‌های با مدول الاستیک بالاتر، برهم‌کنش‌های بیشتر و پایداری بیشتری در محدوده ویسکوالاستیک خطی نشان می‌دهند و محدوده ویسکوالاستیک خطی گسترده‌تری دارند.

Table 4 Strain sweep parameters of emulsions containing PMS gum (strain% = 0.1 – 10%, angular frequency: 1 rad/s, 25°C)

Concentration	G' (Pa) (Storage modulus)	G'' (Pa) (Loss modulus)	Tan δ (Yield strain)	γ_L (Pa) (flow point strain)	γ_f (Pa)
0.3%	8.27 ± 0.68	6.98 ± 0.38	0.84 ± 0.17	0.317 ± 0.41	0.464 ± 0.85
0.5%	19.55 ± 0.41	15.51 ± 0.44	0.79 ± 0.52	0.464 ± 0.78	0.682 ± 0.41
1%	28.48 ± 0.03	20.72 ± 0.12	0.72 ± 0.79	1.12 ± 0.04	1.46 ± 0.79

امولسیون می‌باشد. زمانی که تانژانت افت کمتر از ۱ باشد، رفتار الاستیک غالب است، در حالی که مقادیر تانژانت افت بالاتر از ۱

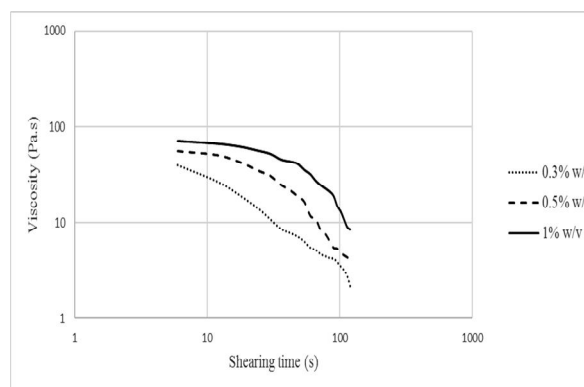


Fig 2 Viscosity of emulsions containing PMS gum as a function of shearing time (Shear rate 50 s⁻¹)

۳-۲- خواص رئولوژیکی دینامیک

۳-۲-۱- آزمون کرنش متغیر

انجام آزمون‌های ویسکوالاستیک زمانی ارزشمند و قابل تفسیر خواهند بود که در محدوده ویسکوالاستیک خطی انجام شوند. بنابراین تعیین مقدار کرنش یا تنش که پایین‌تر از آن رفتار ماده خطی است، بسیار مهم خواهد بود. برای تعیین محدوده ویسکوالاستیک خطی امولسیون‌های حاوی صمغ دانه بارهنگ با مقادیر متفاوت صمغ (۰/۳، ۰/۵ و ۱٪ وزنی - حجمی) در مقادیر فرکانس معین و پایین، منحنی‌های G' و G'' بر حسب افزایش دامنه کرنش (۱۰ - ۰/۱٪) رسم شد. توجه به این نکته مهم است که فرکانس زاویه‌ای در این آزمون، ثابت (1 rad/s) و دما، ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. مقدار کرنشی که در آن G' و G'' روند نزولی پیدا می‌کند، به عنوان حد نهایی محدوده خطی در نظر گرفته می‌شود. قبل از انجام سایر آزمون‌های نوسانی مانند

نسبت مدول ویسکوز به مدول الاستیک، تانژانت افت (tan δ) نامیده می‌شود که روشی برای ارزیابی رفتار ویسکوالاستیک

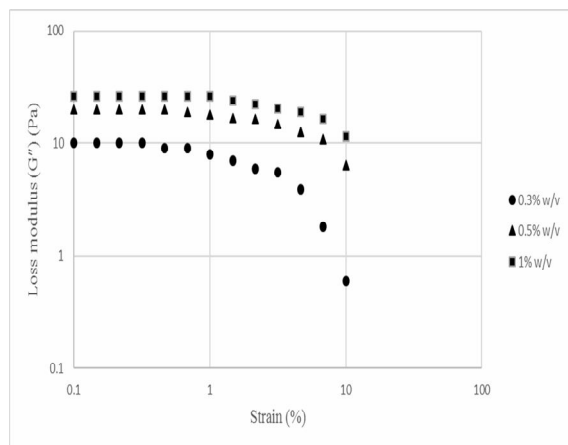


Fig 4 Strain sweep profile of emulsions containing PMS gum for loss modulus (G'') changes with different concentrations (Angular frequency: 1 rad/s, 25°C)

۳-۲-۲- آزمون فرکانس متغیر

آزمون روبش فرکانس، رایج ترین آزمون نوسانی است. در این آزمون، دامنه نوسان تنش یا کرنش ورودی ثابت نگه داشته می-شود، در حالی که فرکانس افزایش داده می-شود. آزمون روبش فرکانس برای بررسی اثر افزودنی‌های مختلف (برای مثال، هیدروکلوئیدها) و اثر فرآیندهای مختلف (برای مثال، هم‌زدن و گرمایش) بر تغییر رفتار ویسکوالاستیک مواد به کار می‌رود. نتایج آزمون فرکانس متغیر امولسیون‌های حاوی مقادیر مختلف صمغ دانه بارهنگ (۰/۳، ۰/۵ و ۱٪ وزنی - حجمی) در مقدار کرنش ثابت (۰/۰۱٪) و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نمودارهای ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است. پارامترهای حاصل از آزمون فرکانس متغیر در جدول ۵ آورده شده است.

نشان دهنده رفتار ویسکوز می‌باشد. مقادیر تانژانت افت بین ۰/۱ و ۱ به این معنی است که امولسیون‌ها ژل واقعی نیستند و ساختاری بین یک بیوپلیمر با غلظت بالا و ژل واقعی دارند [۴۸]. همان طور که در جدول ۴ نیز مشاهده می‌گردد، مقادیر تانژانت افت امولسیون‌ها با مقادیر صمغ ۰/۳، ۰/۵ و ۱٪ وزنی - حجمی به ترتیب ۰/۸۴، ۰/۷۹ و ۰/۷۲ می‌باشد که کمتر از ۱ و بیشتر از ۰/۱ است که نشان می‌دهد این امولسیون‌ها دارای رفتار الاستیک می‌باشند و قابلیت تشکیل ژل ضعیف را دارند که رفتار معمول امولسیون‌های حاوی هیدروکلوئید است [۴۸]. با افزایش درصد کرنش، مقادیر G' و G'' کاهش پیدا کرده و برهم‌کنش‌های موجود در ساختار جامدگون امولسیون شکسته می‌شود که در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

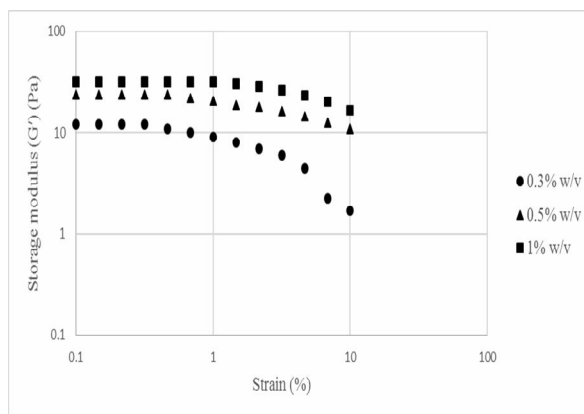


Fig 3 Strain sweep profile of emulsions containing PMS gum for elastic modulus (G') changes with different concentrations (Angular frequency: 1 rad/s, 25°C)

Table 5 Frequency sweep parameters of emulsions containing PMS gum (Angular frequency = 0.1 – 100%, strain%: 0.01%, 25°C)

Concentration	G' (Pa)	G'' (Pa)	Tan δ	η^* (Pa.s)	Slope of η^* -f
0.3%	32.85 ± 0.74	22.00 ± 0.14	0.66 ± 0.41	5.67 ± 0.35	-0.58 ± 0.12
0.5%	39.85 ± 0.41	25.50 ± 0.79	0.63 ± 0.79	6.81 ± 0.46	-0.63 ± 0.78
1%	48.85 ± 0.69	27.92 ± 0.08	0.60 ± 0.88	9.26 ± 0.05	-0.75 ± 0.09

این قابلیت با افزایش مقدار صمغ، افزایش می‌یابد. آزمون فرکانس متغیر چهار نوع سیستم را می‌تواند شناسایی کند: محلول‌های رقیق، محلول‌های غلیظ، ژل‌های ضعیف و ژل‌های قوی. برای ژل‌های ضعیف، در محدوده فرکانس اعمال شده، مقدار مدول

مقادیر مدول الاستیک (G') امولسیون‌ها در محدوده فرکانس اعمال شده (۱۰۰ - ۰/۱ هرتز) بالاتر از مدول ویسکوز (G'') می‌باشد و هیچ نقطه تقاطعی مشاهده نمی‌گردد. در نتیجه، می‌توان گفت همه امولسیون‌ها دارای قابلیت تشکیل ژل ضعیف هستند که

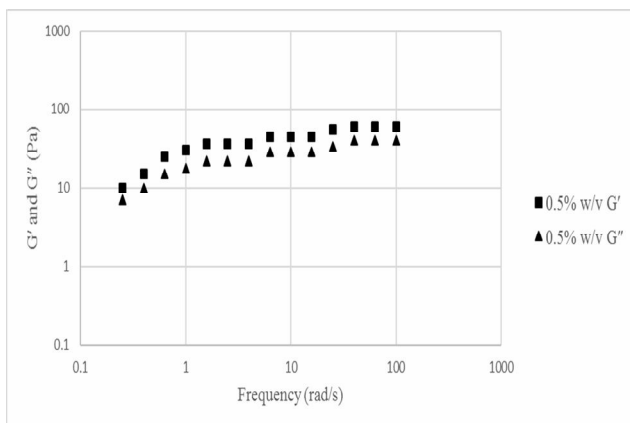


Fig 6 Frequency sweep profile of emulsions containing PMS gum for elastic modulus (G') and viscous modulus (G'') for 0.5% concentration (Strain: 0.01%, 25°C)

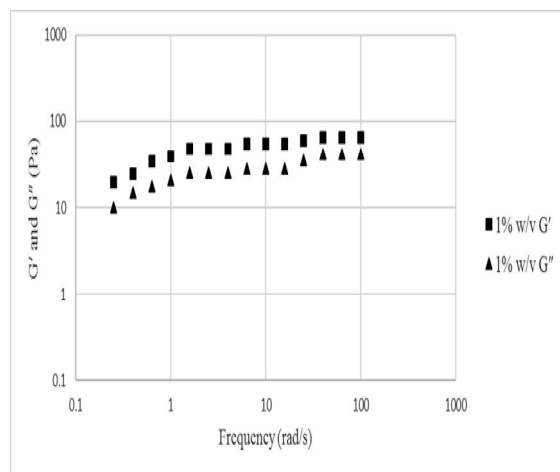


Fig 7 Frequency sweep profile of emulsions containing PMS gum for elastic modulus (G') and viscous modulus (G'') for 1% concentration (Strain یکی دیگر از پارامترهای مورد بررسی در آزمون فرکانس متغیر، مدول کمپلکس (G^*) می‌باشد که از نسبت تنش حداکثر به کرنش حداکثر در آزمون نوسانی به دست می‌آید. مدول کمپلکس، سفتی کلی را نشان می‌دهد که شامل سفتی الاستیک و سفتی ویسکوز است. از نسبت مدول کمپلکس (G^*) به فرکانس، ویسکوزیته کمپلکس (η^*) به دست می‌آید و معیاری از سفتی کلی ماده مورد نظر است. مقادیر ویسکوزیته کمپلکس امولسیون‌های حاوی صمغ دانه بارهنگ با افزایش فرکانس، کاهش پیدا می‌کند که نشان دهنده رفتار غیر نیوتنی و روان شوندگی با برش امولسیون‌ها می‌باشد. همان طور که در جدول ۵ نیز مشاهده می-

الاستیک (G') همواره بیشتر از مدول ویسکوز (G'') است و هر دو مدول وابسته به فرکانس هستند. تفاوت ژل‌های قوی و ضعیف در این است که مدول‌ها در ژل قوی وابسته به فرکانس نیستند. در محلول‌های رقیق در محدوده فرکانس مورد مطالعه، مدول ویسکوز (G'') بزرگتر از مدول الاستیک (G') است و مدول‌ها در فرکانس‌های بالاتر به هم نزدیک می‌شوند، اما در محلول‌های غلیظ، در فرکانس‌های پایین مقدار مدول الاستیک (G') کمتر از مدول ویسکوز (G'') است و در میانه محدوده فرکانس اعمالی یکدیگر را قطع می‌کنند. محل تقاطع دو مدول به ساختار مولکولی، وزن مولکولی و غلظت بستگی دارد [۴۹]. مقادیر مدول الاستیک و ویسکوز به دست آمده در آزمون فرکانس متغیر با مقایسه حاصل از آزمون کرنش متغیر مطابقت کامل دارد. مقادیر تانژانت افت حاصل از نسبت مدول ویسکوز به مدول الاستیک امولسیون‌های حاوی مقایسه متفاوت صمغ شامل ۰/۳، ۰/۵ و ۱٪ وزنی - حجمی به ترتیب ۰/۶۶، ۰/۶۳ و ۰/۶۰ به دست آمد که نشان دهنده توانایی آن‌ها در تشکیل ژل ضعیف می‌باشد.

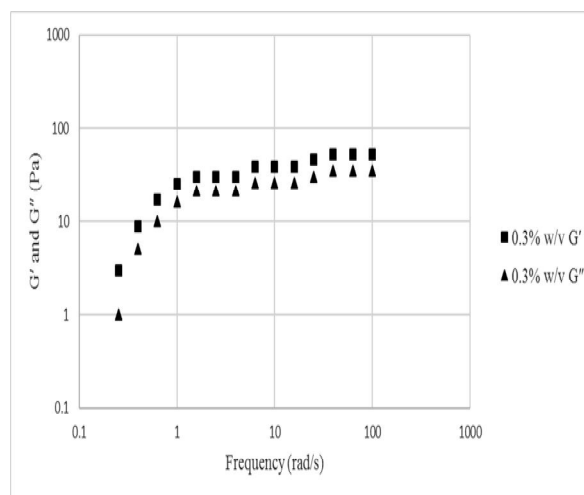


Fig 5 Frequency sweep profile of emulsions containing PMS gum for elastic modulus (G') and viscous modulus (G'') for 0.3% concentration (Strain: 0.01%, 25°C)

$$G'' = k'' \times \omega^d \quad (13)$$

که در آن ω فرکانس نوسانی است، b و d شاخص‌های قانون توان در مدول الاستیک و ویسکوز می‌باشند. برای ژل کووالانسی (وابستگی کم به فرکانس)، $b=0$ است، در حالی که برای یک ژل فیزیکی، $b > 0$ است. در مقادیر b نزدیک به ۱، سیستم به صورت یک ژل ویسکوز رفتار می‌کند [۵۱]. بنابراین در مقادیر b و d نزدیک به صفر، مدول الاستیک و ویسکوز با فرکانس تغییر نمی‌کنند

و الاستیسیته بالای ساختار را نشان می‌دهند [۹]. همان طور که در جدول شماره ۶ مشاهده می‌شود، مقادیر b و d امولسیون‌ها با مقدار صمغ ۰/۳، ۰/۵ و ۱٪ وزنی - حجمی با افزایش غلظت کاهش می‌یابد. پایین‌ترین مقدار b مربوط به امولسیون‌های با

مقدار (0.01%, 25°C, صمغ ۱٪ وزنی - حجمی می‌باشد که تصدیق‌کننده نتایج به دست آمده در آزمون فرکانس متغیر و کرنش متغیر در ارتباط با توانایی این امولسیون‌ها برای تشکیل ژل پایدار است. نتایج آزمون فرکانس متغیر به دست آمده توسط سماواتی و همکاران (۲۰۱۲) روی امولسیون‌های حاوی صمغ تراگاکانت نشان از وابستگی مقادیر مدول الاستیک و ویسکوز به فرکانس داشت و چون مقادیر مدول ویسکوز بیشتر از مدول الاستیک بود، این امولسیون‌ها به عنوان امولسیون‌های رقیق در نظر گرفته شدند [۴۰].

گردد، مقادیر ویسکوزیته کمپلکس امولسیون‌های با مقدار صمغ ۱٪ وزنی - حجمی (۹/۲۶ Pa.s) بالاتر از سایر امولسیون‌ها با مقادیر ۶/۸۱ Pa.s برای مقدار صمغ ۰/۵٪ و ۵/۶۷ Pa.s برای مقدار صمغ ۰/۳٪ می‌باشد.

مقدار شیب نمودار ویسکوزیته کمپلکس (η^*) در مقابل فرکانس زاویه‌ای (ω) یکی از روش‌های مهم تعیین قدرت ژل است. مقادیر بالای این شیب نشان دهنده رفتار الاستیک (ژل) امولسیون مورد بررسی است که این امر خود به پارامترهای متفاوتی از جمله غلظت هیدروکلوئید به عنوان پایدار کننده در امولسیون بستگی دارد. لازم به ذکر است شیب نمودار ویسکوزیته کمپلکس - فرکانس زاویه‌ای نزدیک به ۰/۸ - بیانگر یک ژل ضعیف پلی- ساکاریدی است که توسط در هم تنیده شدن و تداخل زنجیره- های حلقه تصادفی پلی ساکاریدها حاصل می‌شود [۵۰]. مقادیر شیب نمودار ویسکوزیته کمپلکس - فرکانس زاویه‌ای برای امولسیون‌های حاوی صمغ دانه بارهنگ با مقادیر صمغ ۰/۳، ۰/۵ و ۱٪ وزنی - حجمی به ترتیب ۰/۵۸، ۰/۶۳، و ۰/۷۵ - به دست آمد که نشان دهنده قابلیت تشکیل ژل ضعیف توسط امولسیون‌ها است.

وابستگی بین مدول الاستیک (G') و مدول ویسکوز (G'') با فرکانس را می‌توان با استفاده از قانون توان توجیه کرد که به صورت زیر است:

(۱۲)

$$G' = k' \times \omega^b$$

Table 6 Power law parameters calculated for the G' and G'' of emulsions containing PMS gum at frequency sweep test

Concentration	$G' = a\omega^b$			$G'' = c\omega^d$		
	b	R ²	RMSE	d	R ²	RMSE
0.3%	0.238	0.965	0.593	0.218	0.962	0.543
0.5%	0.216	0.994	1.546	0.192	0.915	1.483
1%	0.171	0.955	2.692	0.136	0.905	1.771

برشی پایا می‌باشد و نشان دهنده عدم تبعیت از قانون کوکس - مرز است که در نمودارهای ۸ (قسمت a,b,c) مشاهده می‌شود.

براساس قانون کوکس - مرز، منحنی ویسکوزیته کمپلکس (η^*) در برابر فرکانس (ω) با منحنی ویسکوزیته جریان پایا (η_a) در برابر سرعت برشی (γ) رابطه دارد [۵۲]. در همه امولسیون‌های مورد بررسی، مقادیر ویسکوزیته کمپلکس بیشتر از ویسکوزیته

خوبی دارند. انحراف از معادله فوق معمولاً در نتیجه وجود برهم-کنش‌های قوی و دامنه بلند بین زنجیرها و وجود خواص الاستیک بالا در سیالات ویسکوالاستیک است و می‌تواند ناشی از پدیده‌هایی مانند ساختار میله‌ای سفت و منظم در هیدروکلوئید، وجود ساختار ناهمگون در هیدروکلوئید، تشکیل ساختار ژل و توده شدن قطرات در امولسیون باشد [۵۳،۵۲،۱۱،۹]

۴- نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله، خواص رئولوژیکی پایا و دینامیک امولسیون‌های حاوی مقادیر مختلف صمغ دانه بارهنگ (۰/۳، ۰/۵ و ۰/۲ وزنی - حجمی) مطالعه شد. نتایج آزمون‌های خواص برشی پایا نشان داد که برای برآزش داده‌های تنش برشی - سرعت برشی، مدل هرشل بالکلی، داده‌های سرعت برشی - ویسکوزیته ظاهری، مدل کارائی و برای داده‌های تنش برشی - زمان، مدل تئو - بوگر به عنوان مدل‌های بهتر انتخاب شدند. همه امولسیون‌های مورد بررسی رفتار روان شوندگی با برش را از خود نشان دادند. بررسی نتایج آزمون‌های رئولوژی دینامیک شامل آزمون فرکانس متغیر و کرنش متغیر نشان داد که همه امولسیون‌ها دارای رفتار الاستیک (جامدگون) بودند و توانایی تشکیل ژل ضعیف را داشتند که این توانایی با افزایش مقدار صمغ، بیشتر شد. به طور کلی افزودن صمغ دانه بارهنگ سبب بیشتر شدن پایداری امولسیون‌ها گردید که این پایداری با افزایش مقدار صمغ و به دنبال آن، افزایش ویسکوزیته، افزایش یافت.

۵- منابع

- [1] Shao, P., Ma, H., Zhu, J., & Qiang, Q. (2017). Impact of ionic strength on physicochemical stability of o/w emulsions stabilized by *Ulva fasciata* polysaccharide. *Food Hydrocolloids*, 69, 202 – 209.
- [2] Desplanques, S., Renou, F., Grisel, M., & Malhiac, C. (2012). Impact of chemical composition of xanthan and acacia gums on the emulsification and stability of oil in water emulsions. *Food Hydrocolloids*, 27, 401 – 410.
- [3] Najji, S., Razavi, S.M.A., & Karazhiyan, H. (2012). Effect of thermal treatments on functional properties of cress seed (*Lepidium*

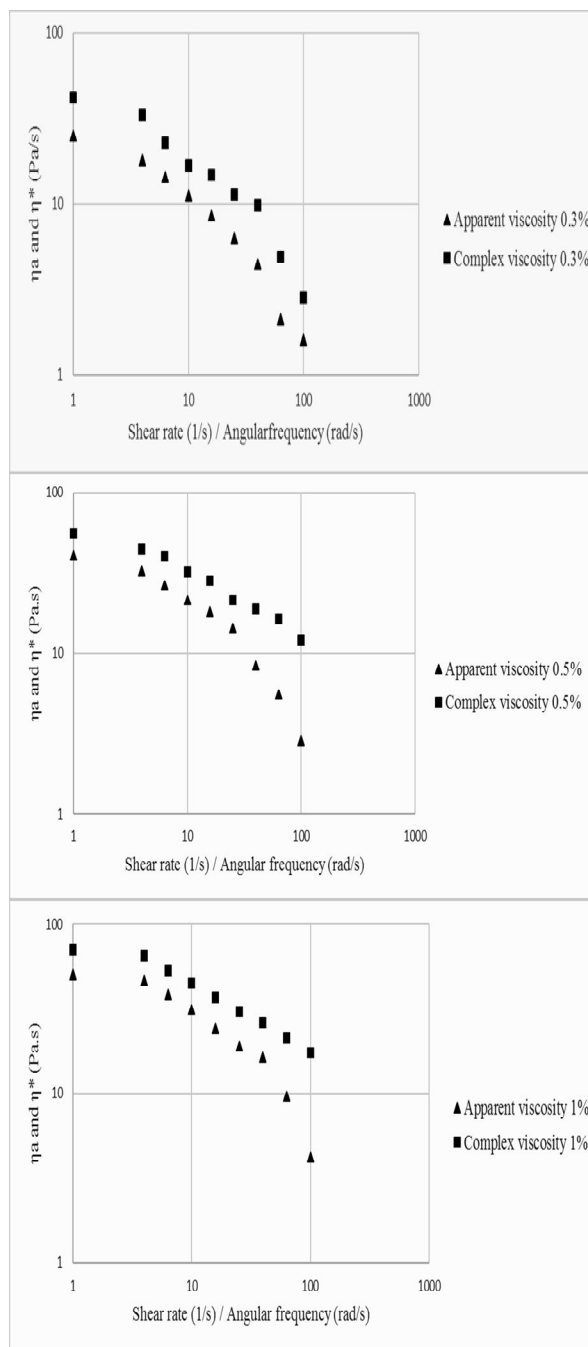


Fig 8 Cox – Merz plots of complex viscosity against apparent viscosity for emulsions containing PMS gum (0.3, 0.5 and 1% w/v)

معادلات کوکس - مرز برای امولسیون‌های با ساختار مارپیچ نامنظم و تصادفی و دارای ساختار یکنواخت مانند محلول‌های رقیق نشاسته، محلول دکستران غلیظ، صمغ دانه خرنوب، گوار و پکتین کم متوکسیل که حالت ویسکوالاستیک مایع دارند، برآزش

- viscoelastic properties of guar and karaya gums. *Journal of Food Science*, 49, 1 – 4.
- [14] Gigli, L., Gamier, C., & Piazza, L. (2009). Rheological behaviour of low – methoxyl pectin gels over an extended frequency window. *Food Hydrocolloids*, 23, 1406 – 1412.
- [15] Rafe, A., & Razavi, S.M.A. (2013). Dynamic viscoelastic study on the gelation of basil seed gum. *International Journal of Food Science and Technology*, 48, 556 – 563.
- [16] Alghooneh, A., Razavi, S.M.A., & Behrouzian, F. (2017). Rheological characterization of hydrocolloids interaction: A case study on sage seed gum – xanthan blends. *Food Hydrocolloids*, 66, 206 – 215.
- [17] Alizadeh Behbahani, B., Tabatabaei Yazdi, F., Shahidi, F., Hesarinejad, M., Mortazavi, S., & Mohebbi, M. (2016). *Plantago major* seed mucilage: Optimization of extraction and some physicochemical and rheological aspects. *Carbohydrate Polymers*, 155, 68 – 77.
- [18] Naji – Tabasi, S., & Razavi, S.M.A. (2016). New studies on basil (*Ocimum bacilicum* L.) seed gum: Part 2 – Emulsifying and foaming characterization. *Carbohydrate Polymers*, 149, 140 – 150.
- [19] Silva, C., Torres, M.D., Chenlo, F., & Moreira, R. (2017). Rheology of aqueous mixtures of tragacanth and guar gums: Effects of temperature and polymer ratio. *Food Hydrocolloids*, 69, 293 – 300.
- [20] Chaharlang, M., & Samavati, V. (2015). Steady shear flow properties of *Cordia myxa* leaf gum as a function of concentration and temperature. *International Journal of Biological Macromolecules*, 79, 56 – 62.
- [21] Adeli, M., & Samavati, V. (2015). Studies on the steady shear flow behaviour and chemical properties of water – soluble polysaccharide from *Ziziphus lotus* fruit. *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 580 – 587.
- [22] Razavi, S.M.A., Taheri, H., & A. Quinchia, L. (2011). Steady shear flow properties of wild sage (*Salvia macrosiphon*) seed gum as a function of concentration and temperature. *Food Hydrocolloids*, 25, 451 – 458.
- [23] Salehi, F., Kashaninejad, M., & Behshad, V. (2014). Effects of sugars and salts on rheological properties of Balangu seed (*Leptochloa setacea*) and xanthan gums: A comparative study. *Food Hydrocolloids*, 28, 75 – 81.
- [4] Simas – Tosin, F.F., Barraza, R.R., Petkowicz, C.L.O., Silveira, J.L.M., Sasaki, G.L., Santos, E.M.R., Gorin, P.A.J., & Iacomini, M. (2010). Rheological and structural characteristics of peach tree gum exudates. *Food Hydrocolloids*, 24, 486 – 493.
- [5] Buffo, R.A., Reineccius, G.A., & Oehlert, G.W. (2001). Factors affecting the emulsifying and rheological properties of gum *Acacia* in beverage emulsions. *Food Hydrocolloids*, 15, 53 – 66.
- [6] Vianna – Filho, R., Petkowicz, C., & Silveira, J. (2013). Rheological characterization of O/W emulsions incorporated with neutral and charged polysaccharides. *Carbohydrate Polymers*, 93, 266 – 272.
- [7] Samuelsen, A. (2000). The traditional uses, chemical constituents and biological activities of *Plantago major* L. A review. *Journal of Ethnopharmacology*, 71, 1 – 21..
- [8] Razmkhah, S., Razavi, S.M.A., & Mohammadifar, M. (2017). Dilute solution, flow behaviour, thixotropy and viscoelastic characterization of cress seed (*Lepidium sativum*) gum fractions. *Food Hydrocolloids*, 63, 404 – 413.
- [9] Naji – Tabasi, S., & Razavi, S.M.A. (2015). New studies on basil (*Ocimum basilicum* L.) seed gum: Part 3 – Steady and dynamic shear rheology. *Food Hydrocolloids*, 1, 1 – 8.
- [10] Razavi, S.M.A., Alghooneh, A., Behrouzian, F., & Cui, S. (2016). Investigation of the interaction between sage seed gum and guar gum: Steady and dynamic shear rheology. *Food Hydrocolloids*, 60, 67 – 76.
- [11] Timilsena, Y., Adhikari, R., Kasapis, S., & Adhikari, B. (2015). Rheological and microstructural properties of chia seed polysaccharide. *International Journal of Biological Macromolecules*, 81, 991 – 999.
- [12] Karazhiyan, H., Razavi, S.M.A., Phillips, G.O., Fang, Y., Al-Assaf, S., Nishinari, K., & Farhoosh, R. (2009). Rheological properties of *Lepidium sativum* seed extract as a function of concentration, temperature and time. *Food Hydrocolloids*, 23 (8), 2062 – 2068.
- [13] Mills, P.L., & Kokini, K.E. (1984). Comparison of steady shear and dynamic

- [35] Koocheki, A., Kadkhodae, R., Mortazavi, S.A., Shahidi, F., & Taherian, A. (2009). Influence of *Alyssum homolocarpum* seed gum on the stability and flow properties of O/W emulsion prepared by high intensity ultrasound. *Food Hydrocolloids*, 23, 2416 – 2424.
- [36] Koocheki, A., Mortazavi, S.A., Shahidi, F., Razavi, S.M.A., & Taherian, A. (2009). Rheological properties of mucilage extracted from *Alyssum homolocarpum* seed as a new source of thickening agent. *Journal of Food Engineering*, 91, 490 – 496.
- [37] Sadar, L.N. (2004). Rheological and textural characteristics of copolymerized hydrocolloidal solutions containing curdlan gum.
- [38] Rao, M., & Kenny, J. (1975). Flow properties of selected food gums. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 8, 142 – 148.
- [39] McClements, D.J. (2004). *Food emulsions: principles, practices and techniques*. CRC Press.
- [40] Samavati, V., Emam-Djomeh, Z., Mohammadifar, M.A., Omid, M., & Mehdi, A. (2012). Application of rheological modeling in food emulsions. *Iran Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 31 (2), 71 – 83.
- [41] Krstonosic, V., Dokic, L., Nikolic, I., & Milanovic, M. (2015). Influence of xanthan gum on oil-in-water emulsion characteristics stabilized by OSA starch. *Food Hydrocolloids*, 45, 9 – 17.
- [42] Surh, J., Decker, E.A., & McClements, D.J. (2006). Influence of pH and pectin type on properties and stability of sodium-caseinate stabilized oil in water emulsions. *Food Hydrocolloids*, 20, 607 – 618.
- [43] Durairaj, R., Ekere, N.N., & Salam, B. (2004). Thixotropy flow behaviour of solder and conductive adhesive pastes. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 15 (10), 677 – 683.
- [44] Chandra, M.V., & Shamasundar, B.A. (2015). Rheological properties of gelatin prepared from the swim bladders of freshwater fish *Catla catla*. *Food Hydrocolloids*, 48, 47 – 54.
- (*Lallemantia royleana*) gum. *International Journal of Biological Macromolecules*, 67, 16 – 21.
- [24] Koocheki, A., Taherian, A., & Bostan, A. (2013). Studies on the steady shear flow behaviour and functional properties of *Lepidium perfoliatum* seed gum. *Food Research International*, 50, 446 – 456.
- [25] Mizrahi, S., & Berk, Z. (1972). Flow behaviour of concentrated orange juice: Mathematical treatment. *Journal of Texture Studies*, 3, 69 – 79.
- [26] Song, K., Kim, Y., & Chang, G. (2006). Rheology of concentrated xanthan gum solutions: Steady shear flow behaviour. *Journal of Fibres and Polymers*, 7 (2), 129 – 138.
- [27] Costa, K.K.F.D., Garcia, M.C., O. Ribeiro, K., Soares Junior, M.S., & Caliar, M. (2016). Rheological properties of fermented rice extract with probiotic bacteria and different concentrations of waxy maize starch. *LWT – Food Science and Technology*, 72, 71 – 77.
- [28] Khounvilay, K., & Sittikijyothin, W. (2012). Rheological behaviour of tamarind seed gum in aqueous solutions. *Food Hydrocolloids*, 26, 334 – 338.
- [29] Rao, M.A. (1999). *Rheology of fluid and semi-solid foods (Principles and Applications)*. Aspen publication.
- [30] Steffe, J.F. (1996). *Rheological methods in food process engineering (second edition)*. Michigan, Freeman Press.
- [31] Figoni, P.I., & Shoemaker, C.F. (1983). Characterization of time dependant flow properties of mayonnaise under steady shear. *Journal of Texture Studies*, 14, 431 – 442.
- [32] Tiu, C., & Boger, D.V. (1974). Complete rheological characterization of time-dependant food products. *Journal of Texture Studies*, 5, 329 – 338.
- [33] Chen, Y., Zhang, J., Sun, H., & Wei, Z. (2014). Pectin from *Abelmoschus esculentus*: Optimization of extraction and rheological properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 70, 498 – 505.
- [34] Moreira, R., Chenlo, F., Torres, M.D., & Prieto, D.M. (2010). Influence of the particle size on the rheological behaviour of chestnut flour doughs. *Journal of Food Engineering*, 100, 270 – 277.

- [50] Morris, E.R. (1990). Shear-thinning of random coil polysaccharides: characterization by two parameters from a simple linear plot. *Carbohydrate Polymers*, 13, 85 – 96.
- [51] Hesarinejad, M.A., Koocheki, A., & Razavi, S.M.A. (2014). Dynamic rheological properties of *Lepidium perfoliatum* seed gum: effect of concentration, temperature and heating/cooling rate. *Food Hydrocolloids*, 35, 583 – 589.
- [52] Cox, W., & Merz, E. (1958). Correlation of dynamic and steady flow viscosities. *Journal of Polymer Science*, 28, 619 – 622.
- [53] Fang, Y., Takemasa, M., Katsuta, K., & Nishinari, K. (2004). Rheology of schizophyllan solutions in isotropic and anisotropic phase regions. *Journal of Rheology*, 48, 1147 – 1166.
- [45] Singla, N., Verma, P., Ghoshal, G. & Basu, S. (2013). Steady state and time dependent rheological behavior of mayonnaise (egg and eggless). *International Food Research Journal*, 20 (4), 2009 – 2016.
- [46] Steffe, J.F. (1996). *Rheological methods in Food process engineering*. Freeman Press.
- [47] Clark, A.H., & Ross – Murphy, S.B. (1987). Structural and mechanical properties of biopolymer gels. In *Biopolymers* (pp. 57 – 192). Springer.
- [48] Mandala, I., Savvas, T., & Kostaropoulos, A. (2004). Xanthan and locust bean gum influence on the rheology and structure of a white model-sauce. *Journal of Food Engineering*, 64, 335 – 342.
- [49] Kutz, M. (2013). *Handbook of farm, dairy and food machinery engineering*. Academic Press.

Steady shear flow and dynamic rheology of the emulsions containing ultrasound-assisted extracted *Plantago major* seed gum

Niknam, R.¹, Ayaseh, A.^{2*}, Ghanbarzadeh, B.³

1. MSc Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz
2. Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz
3. Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

(Received: 2017/12/19 Accepted:2018/08/26)

The rheological properties of emulsions containing ultrasound-assisted extracted *Plantago major* seed gum with different concentrations (0.3, 0.5 and 1% w/v) were discussed in this paper. The results of steady shear flow experiments were categorized in three main groups: Shear rate – shear stress (fitted well with Herschel - Bulkley model), apparent viscosity – shear rate (fitted well with Carreau model) and shear stress – time relationships (fitted well with Tiu - Bugar model). Models were selected due to their R^2 and RMSE values. The dynamic rheology experiment results including strain and frequency sweep demonstrated that all emulsions showed gel-like behavior which is resulted from more stable interactions and chains in the structure. Cox – Merz rule was applied to investigate the relationship between complex viscosity (η^*) as a function of frequency and apparent viscosity (η_a) as a function of shear rate in which the results considered that in all samples the complex viscosity was higher than apparent viscosity. Therefore, the PMS gum based emulsions did not obey this rule.

Key Words: *Plantago major* L. seed gum, Ultrasound-assisted extraction, Emulsion, Steady shear flow, Dynamic rheology

* Corresponding Author E-Mail Address: ayaseh@tabrizu.ac.ir