

# مقایسه رفتار رئولوژیک محلول‌ها و امولسیون‌های روغن در آب پایدار شده توسط صمغ عربی

صدیقه امیری<sup>a\*</sup>، محسن رادی<sup>a</sup>

<sup>a</sup>عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یاسوج، گروه صنایع غذایی، باشگاه پژوهشگران جوان، یاسوج، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۱/۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۲/۵

۵

## چکیده

**مقدمه:** صمغ عربی یک پلی‌سارید بسیار پرکاربرد در صنایع غذایی است که علاوه بر آنکه دارای خواص عملکردی مؤثری است از خواص سلامتی‌بخش مهمی نیز برخوردار است. هدف از انجام این مطالعه، مقایسه رفتار رئولوژیک محلول صمغ عربی با امولسیون حاوی صمغ در غلظت‌های یکسان از صمغ است.

**مواد و روش‌ها:** محلول‌ها و امولسیون‌های O/W حاوی صمغ عربی در غلظت‌های ۰/۱، ۵، ۱۰ و ۲۰٪ تهیه گردیدند و ویسکوزیته آن‌ها اندازه‌گیری شد. پایداری امولسیون‌های پایدار شده با صمغ عربی سنجش شد و ریزساختارهای آن‌ها در زیر میکروسکوپ نوری بررسی گردید.

**یافته‌ها:** ویسکوزیته محلول‌ها و امولسیون‌های حاوی صمغ عربی با افزایش غلظت صمغ افزایش پیدا کرد. صمغ عربی رفتاری نیوتنی در محیط‌های مورد بررسی از خود نشان داد، اما این رفتار با افزایش غلظت صمغ به ۲۰٪ در امولسیون به رقیق‌شونده برشی تغییر یافت. طبق مدل استوالد-دی-وال، ثابت قوام (k) همه نمونه‌های آبی و امولسیونی با افزایش غلظت صمغ افزایش یافت و ایندکس جریان (n) نزدیک به ۱ بود که نشان دهنده رفتار نیوتنی صمغ بود. رفتار رئولوژیک صمغ در همه نمونه‌ها با ضرایب همبستگی بسیار بالا با مدل توان و کاسون تطابق داشت. افزودن صمغ عربی پایداری امولسیون‌های روغن در آب را به‌خوبی افزایش داد که این پایداری با افزایش غلظت صمغ افزایش یافت.

**نتیجه‌گیری:** رفتار رئولوژیک صمغ عربی در هر دو محیط آبی و امولسیون بسیار شبیه بود. بنابر نتایج این تحقیق، از صمغ عربی نه تنها می‌توان به‌عنوان یک پایدارکننده مطلوب استفاده کرد، بلکه از آن می‌توان به‌عنوان یک امولسیفایر بسیار کارا حتی در غلظت‌های کم بهره جست.

**واژه‌های کلیدی:** امولسیون، پایداری، رئولوژی، صمغ عربی

## مقدمه

امولسیون‌های روغن در آب، سامانه‌هایی بسیار پرکاربرد در صنعت مواد غذایی هستند. یکی از مشکلات بزرگ این سامانه‌ها پایداری کم آن‌هاست، چراکه امولسیون‌ها سامانه‌هایی ناپایدار از لحاظ ترمودینامیک هستند (Derkach, 2009). با استفاده از امولسیفایرها و پایدارکننده‌ها، پایداری این سامانه‌ها را می‌توان افزایش داد. مکانیزم عمل پایدارکننده‌ها برای پایدارسازی امولسیون‌ها افزایش ویسکوزیته محیط است (Krstonosic et al., 2009). یکی از ترکیباتی که می‌توان از آن به‌عنوان پایدارکننده استفاده کرد صمغ عربی است که از درخت آکاسیا (Acacia) گرفته می‌شود. صمغ عربی یک پلی‌ساکارید خوراکی، طبیعی، خشک با ساختاری منشعب است که ساختار شیمیایی آن پیچیده و بسته به منبع، شرایط آب و هوا، فصل، سن درخت و غیره کمی فرق می‌کند. بدنه اصلی آن از واحدهای  $\beta$ -۱،۳-گالاکتوپیرانوزیل تشکیل شده است و زنجیره‌های جانبی از دو تا پنج  $\beta$ -۳و۱-گالاکتوپیرانوزیل تشکیل شده‌اند که به زنجیره اصلی با اتصال ۶و۱ متصل شده است (Phillips & Williams, 2000). صمغ عربی به‌راحتی در آب حل می‌شود و محلولی شفاف را ایجاد می‌کند. معمولاً به شکل نمک کلسیمی، منیزیمی و یا پتاسیمی از یک پلی‌ساکاریدیک اسید (عربیک اسید) به فروش می‌رسد. Mothe و Rao (۱۹۹۹) رفتار رئولوژیک محلول‌های صمغ عربی را تا غلظت‌های ۵۰٪ (وزن/حجم) بررسی کردند و اظهار داشتند که صمغ عربی در سرعت‌های برشی پایین‌تر از ۱۰ بر ثانیه رفتار رقیق‌شوندگی و در سرعت‌های برشی بالاتر از ۱۰۰ بر ثانیه رفتار نیوتنی از خود نشان می‌دهد. Ibanoglu (۲۰۰۲) اظهار داشت که امولسیون‌های پایدار شده به‌وسیله ایزوله پروتئین آب پنیر دارای رفتاری سودوپلاستیک در حضور غلظت‌های ۰ تا ۱۵٪ وزنی صمغ عربی هستند. Wang و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که صمغ عربی در غلظت ۲٪ می‌تواند امولسیون‌های روغن در آب پایدار شده به‌وسیله کنسانتره پروتئین بزرگ را در مقابل نمک کلرید سدیم و یا در دماهای بالا حفظ کند. صمغ عربی در سطح وسیعی در صنعت به‌عنوان پایدارکننده، تغلیظ‌کننده و امولسیفایر استفاده می‌شود (Badreldin et al., 2009) که

مقایسه رفتار رئولوژیک محلول‌ها و امولسیون‌های روغن در آب پایدار شده توسط صمغ عربی

خاصیت امولسیفایری آن خصوصاً از لحاظ صنعتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از کاربردهای مهم صنعتی صمغ عربی می‌توان به استفاده از آن در صنایع قنادی در تولید محصولات پاستیل، تافی و مارشمالو و یا در صنعت نوشابه‌سازی (به دلیل پایداری صمغ در محیط اسیدی و همچنین عملکرد آن به‌عنوان امولسیفایر)، در تولید کنسانتره‌های طعم کولا و یا پرتقال برای استفاده در تولید نوشابه‌های غیرالکلی اشاره کرد (Phillips & Williams, 2000). از آن‌جا که در تولید برخی از محصولات (به‌ویژه محصولات قنادی) از محلول‌های صمغ و در تولید برخی دیگر از محصولات چون تولید کنسانتره‌های طعم از امولسیون‌های صمغ استفاده می‌شود، هدف اصلی از این تحقیق بررسی رفتار رئولوژیک صمغ عربی در محیط آبی و مقایسه این رفتار با رفتار صمغ در یک امولسیون فرموله شده روغن در آب است.

## مواد و روش‌ها

### - مواد لازم

صمغ عربی از شرکت سیگما (G-9752، امریکا) تهیه گردید. روغن آفتابگردان از یک فروشگاه محلی تهیه شد. لسیتین سویا (۶۰٪ فسفولیپید، ۴۰٪ روغن) از نوع تجاری بود و از شرکت بهپاک خریداری شد.

### - آماده‌سازی محلول صمغ عربی

برای تهیه محلول‌های ۱/۰، ۵، ۱۰ و ۲۰٪ آبی صمغ عربی، مقادیر مناسبی از صمغ عربی در آب مقطر در دمای محیط حل گردید، در حالیکه سوسپانسیون توسط یک هم‌زن مغناطیسی هم زده می‌شد. برای جلوگیری از اتصال و کلوخه شدن ذرات صمغ، پودر صمغ عربی به تدریج به آبی که در حال هم خوردن بود اضافه شد. این در حالی بود که به ذرات اضافه شده فرصت داده می‌شد تا حل شوند. به محلول‌ها اجازه داده شد که برای یک شب در دمای محیط، در حالیکه هم می‌خوردند، هیدراته شوند.

### - آماده‌سازی امولسیون

امولسیون O/W روغن دانه آفتابگردان و آب با نسبت وزنی ۱:۱ تهیه گردید. برای این منظور، لسیتین ابتدا در فاز روغنی حل گردید به گونه‌ای که غلظت نهایی ۰/۵٪ را در

امولسیون‌های تهیه شده با غلظت‌های مختلف صمغ عربی، بر روی اسلاید میکروسکوپی پخش گردید. سپس، هر نمونه بوسیله لامل پوشیده شد و زیر یک میکروسکوپ نوری برای مشاهده قرار داده شد (Olympus BX40, Japan). از یک دوربین ویدیویی ۵ مگاپیکسلی (Kruss, Germany) (VOPC85) برای گرفتن عکس از اسلایدها استفاده گردید، سپس عکس‌ها در کامپیوتر ذخیره شدند (Mandala et al., 2004).

#### - تجزیه و تحلیل آماری

کلیه آزمایشات در سه تکرار انجام شد و مقایسه میانگین‌ها در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از آنالیز واریانس و به روش دانکن با نرم افزار SPSS (Version 10.5 software, New Jersey, USA) صورت گرفت.

#### یافته‌ها

##### - رفتار جریان‌های محلول‌ها و امولسیون‌های O/W پایدار شده با صمغ عربی

نمودار ۱ رابطه تنش برشی-سرعت برشی را در محلول‌ها و امولسیون‌های O/W حاوی صمغ عربی نشان می‌دهد. وجود یک رابطه خطی بین تنش برشی-سرعت برشی در محلول‌ها و امولسیون‌های پایدار شده با غلظت‌های مختلف صمغ، حکایت از رفتار نیوتنی این صمغ دارد.

نمودار ۲ ویسکوزیته محلول‌ها و امولسیون‌های پایدار شده با غلظت‌های مختلف صمغ عربی (۱/۰، ۵، ۱۰ و ۲۰٪) را در مقابل سرعت برشی نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار ۲ نشان داده شده است ویسکوزیته محلول و امولسیون‌های حاوی صمغ (یعنی مقاومت به نیروهای برشی) با افزایش غلظت صمغ عربی افزایش یافت. صمغ عربی ویسکوزیته ثابتی را در مقابل سرعت برشی در غلظت‌های مختلف در محلول‌های آبی نشان داد که این نتیجه خود تاییدی بر نیوتنی بودن رفتار این صمغ در محلول آبی تا غلظت ۲۰٪ است (نمودار ۲-الف). برای مقایسه رفتار جریان‌های صمغ عربی در محیط آبی و در محیط غذایی، از صمغ عربی برای پایداری نوعی امولسیون روغن در آب فرموله شده نیز استفاده شد. ویسکوزیته

امولسیون ایجاد کند. سپس مقدار مناسب آب اضافه شد. یک نمونه به این روش به‌عنوان نمونه کنترل تهیه گردید. برای نمونه‌هایی که حاوی صمغ بودند محلول صمغ با غلظت‌های ۱/۰، ۵، ۱۰ و ۲۰٪ به جای آب اضافه گردید. مخلوط‌های تهیه شده با غلظت نهایی ۱/۰، ۵، ۱۰ و ۲۰٪ صمغ با استفاده از یک همزنایزر Ultra-Turrax T25 basic مجهز به S 25 N-18 G dispersing tool برای مدت ۱ دقیقه با سرعت ۲۴۰۰ دور در دقیقه و ۳۰ ثانیه با سرعت ۳۶۰۰ دور در دقیقه در دمای محیط همزن گردیدند. آزمایش‌های پایداری و بررسی خصوصیات رئولوژیک بلافاصله بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها انجام شدند (Mirhosseini et al., 2008).

##### - اندازه‌گیری ویسکوزیته

ویسکوزیته محلول‌ها و امولسیون‌های پایدار شده با غلظت‌های ۱/۰، ۵، ۱۰ و ۲۰٪ صمغ عربی سنجش گردید. برای اندازه‌گیری ویسکوزیته از یک رئومتر چرخشی بروکفیلد (Brookfield Engineering Laboratories, LV-DVIII Ultra Model, Stoughton, MA, USA) که مجهز به یک ژئومتری استوانه هم‌محور (UL Adaptor) بود، استفاده شد. ویسکوزیته امولسیون‌های آماده شده بلافاصله بعد از تهیه در دمای ۲۵°C و در سرعت برشی ۰ تا ۱۰۰ بر ثانیه، اندازه‌گیری شد. جمع‌آوری و پردازش داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Brookfield Rheocalc 3.3 (Engineering Laboratories, USA) صورت گرفت.

##### - اندازه‌گیری پایداری امولسیون

ضرورت اندازه‌گیری پایداری امولسیون برای نشان دادن پایداری امولسیون در طول نگهداری است. برای اندازه‌گیری پایداری، ۱۰ میلی‌لیتر از هر یک از امولسیون‌های تهیه شده در ۵۰۰۰ g، به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شدند. بعد از سانتریفیوژ کردن، حجم فازهای جدا شده آب و یا روغن اندازه‌گیری گردید. پایداری امولسیون به صورت نسبت حجمی فازهای جدا شده به کل حجم مایع گزارش گردید (Buffo et al., 2001).

##### - مشاهده میکروسکوپی

برای مشاهده میکروسکوپی، مقدار کمی از نمونه‌های

مقایسه رفتار رئولوژیک محلول‌ها و امولسیون‌های روغن در آب پایدار شده توسط صمغ عربی

امولسیون نشان می‌دهد و با افزایش سرعت برشی، ویسکوزیته کاهش می‌یابد.

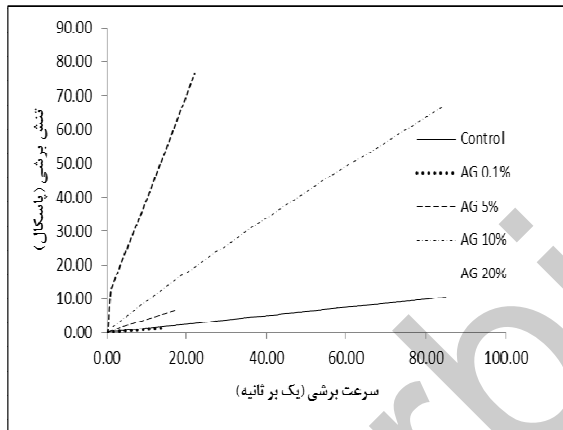
بنابراین، در امولسیون روغن در آب حاوی غلظت ۲۰٪ صمغ عربی، در سرعت‌های برشی بیشتر ویسکوزیته با توجه به وابستگی قانون توان (معادله ۱) به سرعت برشی کاهش می‌یابد.

$\tau = \text{تنش برشی (pa)}$ ،  $\gamma = \text{سرعت برشی (1/s)}$ ،  $k = \text{ضریب قوام (pa.s}^n)$  و  $n = \text{شاخص رفتار جریان (بدون واحد)}$  است. تغییرات  $n$  در مقابل غلظت صمغ عربی در نمودار ۳ ارائه شده است.

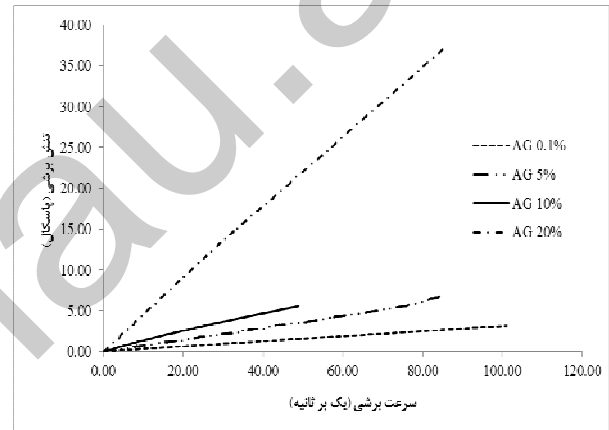
معادله (۱)

$$\tau = k(\gamma)^n \quad \text{Ostwald-de Waele model} \\ \text{(Mandala \& Bayas, 2004)}$$

امولسیون‌های حاوی صمغ در تمام موارد بجز غلظت ۰/۱٪ صمغ عربی، بیشتر از نمونه کنترل بود (نمودار ۲-ب). اضافه کردن صمغ در غلظت ۰/۱٪ هیچ تاثیری بر ویسکوزیته امولسیون نداشت. صمغ عربی رفتاری مشابه به آنچه که در محیط آبی از خود نشان داده بود تا غلظت ۱۰٪ در محیط امولسیونی نیز نشان داد یعنی امولسیون‌های حاوی صمغ عربی تا غلظت ۱۰٪، ویسکوزیته ثابتی را با افزایش سرعت برشی نشان دادند. این بدان معناست که ویسکوزیته محلول صمغی هیچ وابستگی به سرعت برشی ندارد که این به معنای نیوتنی بودن رفتار محلول و یا امولسیون صمغی است. به این ترتیب یک رفتار نیوتنی از صمغ عربی در محیط امولسیونی دیده می‌شود، در حالی که با افزایش غلظت تا ۲۰٪، رفتار متفاوتی را صمغ در

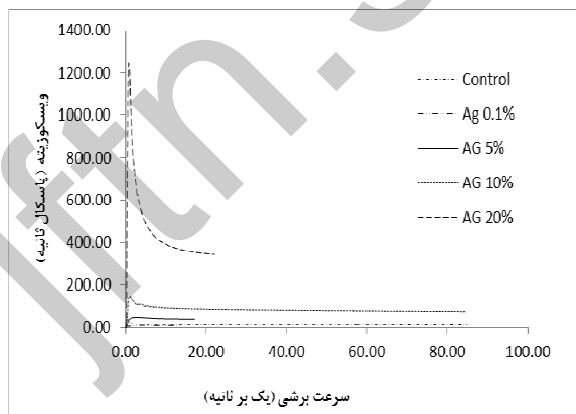


ب

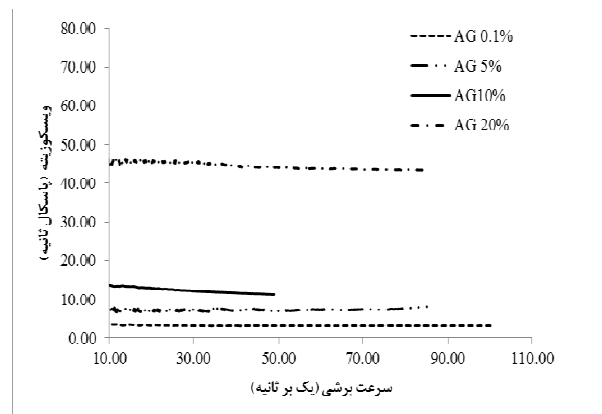


الف

نمودار ۱- رابطه سرعت برشی-تنش برشی (الف) محلول‌ها و (ب) امولسیون‌های حاوی غلظت‌های مختلف صمغ عربی



ب



الف

نمودار ۲- تاثیر سرعت برشی بر ویسکوزیته ظاهری (الف) محلول‌ها و (ب) امولسیون‌های حاوی غلظت‌های مختلف صمغ عربی

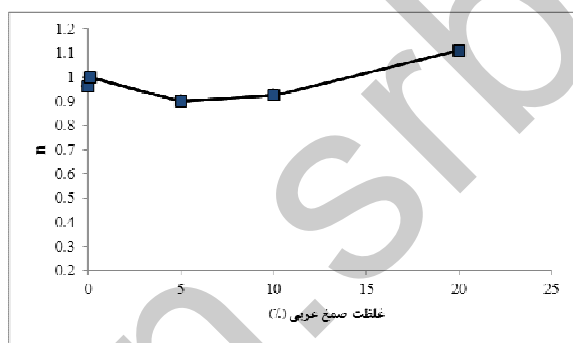
رفتار صمغ با مدل کاسون (Casson) تطابق داده شد. معادله کاسون (معادله ۲) به قرار زیر است:

$$\tau^{0.5} = \tau_0^{0.5} + k_c (\dot{\gamma})^{0.5} \quad \text{Casson equation (Bourne, 2002)}$$

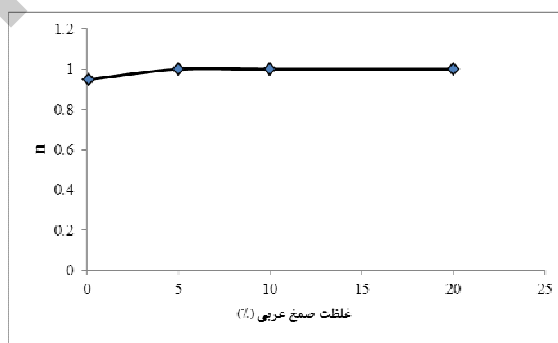
$\tau$  = تنش برشی (pa)،  $\tau_0$  = تنش تسلیم (pa)،  $k_c$  = ضریب قوام  $(Pa \cdot s)^{1/2}$ ،  $\dot{\gamma}$  = سرعت برشی (1/s) است. تنش تسلیم کاسون ( $\tau_0$ ) و ضریب قوام ( $k_c$ ) از طریق رسم رگرسیون خطی سرعت برشی-تنش برشی به دست آمد. مدل کاسون نیز یک مدل مناسب برای توضیح خصوصیات رئولوژیک محلول‌ها و امولسیون‌های حاوی صمغ عربی با ضریب همبستگی بالا (۰/۹۹۹۹-۰/۹۹۶۴) تشخیص داده شد (جدول ۲). Turabi و همکاران (۲۰۰۸) نیز مدل کاسون را یک مدل مناسب برای خمیر کیک برنجی معرفی کردند. این مدل همچنین برای دیسپرسیون پخته شده آرد برنج، نشاسته برنج و آرد چسبناک برنج به کار برده شده است. Li و همکاران (۲۰۱۱) نیز چنین مدلی را برای صمغ عربی مناسب دیدند.

شیب این منحنی ( $n$ ) بستگی به غلظت پلیمر دارد. گزارش شده است که مقادیر پایین‌تر عدد  $n$  حضور تعاملات بین زنجیره‌های را در محلول‌های غلیظ و یا نیمه غلیظ نشان می‌دهد (Xu et al., 2006). شاخص رفتاری جریان ( $n$ )، با افزایش غلظت صمغ تغییر چندانی نکرد و در تمام موارد نزدیک به عدد یک بود که نشان از رفتار نیوتنی صمغ دارد. تنها برای غلظت ۲۰٪ صمغ در امولسیون مقدار  $n$  ۰/۶۴۳۲ شد که نشان از نزدیک‌تر شدن رفتار صمغ به رفتار سودوپلاستیک دارد (جدول ۱). البته لازم به ذکر است که رفتار صمغ عربی در امولسیون در غلظت ۲۰٪ با معادله بینگهام  $\tau = \tau_0 + (\eta/\dot{\gamma})$  تطابق بیشتری دارد. بنا بر معادله بینگهام صمغ عربی (در غلظت ۲۰٪) در امولسیون دارای رفتار بینگهام با تنش تسلیم ۸/۴۳ پاسکال با  $R^2 = ۰/۹۹۵۵$  است.

همانطوریکه قبلاً توضیح داده شد، داده‌های به دست آمده از رسم تنش برشی در مقابل سرعت برشی برای محلول‌ها و امولسیون‌های پایدار شده با صمغ عربی کاملاً با مدل قانون توان با ضریب همبستگی بسیار بالا ( $R^2 = ۰/۹۸۰۶ - ۰/۹۹۹۹$ ) تطابق داشت. ثابت‌های مدل قانون توان در جدول ۱ نشان داده شده است. در مرحله بعد



ب



الف

نمودار ۳- وابستگی مقدار عددی  $n$  به غلظت صمغ عربی در الف) محلول‌ها و ب) امولسیون‌های حاوی غلظت‌های مختلف صمغ عربی

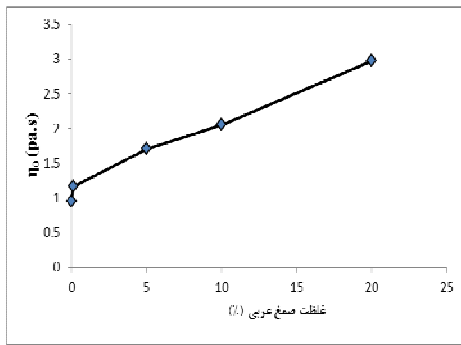
جدول ۱- ضرایب تاثیر  $n$  و  $k$  در معادله استوالد-دی-وال در محلول‌ها و امولسیون‌های حاوی غلظت‌های مختلف صمغ عربی

غلظت (%)	$n$		$k$ (pa.s <sup>n</sup> )		R <sup>2</sup>
	محلول	امولسیون	محلول	امولسیون	
۰/۱	۰/۹۴۸۸	۱/۰۰۰۰	۰/۰۳۸۵	۰/۰۷۲۱	۰/۹۹۳۳
۵	۱/۰۰۰۰	۰/۹۰۰۳	۰/۰۷۶۰	۰/۵۰۹۶	۰/۹۹۹۳
۱۰	۰/۹۰۰۰	۰/۹۲۵۲	۰/۱۷۳۱	۱/۱۰۹۶	۰/۹۹۹۹
۲۰	۱/۰۰۰۰	۰/۶۴۳۲	۰/۴۳۲۵	۹/۴۴۴۵	۰/۹۸۰۶
کنترل	-	۰/۹۶۲۸	-	۰/۱۴۵۳	۰/۹۹۸۰

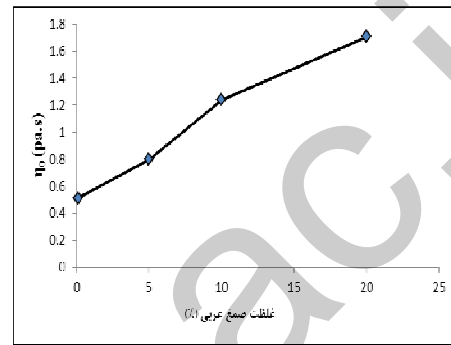
مقایسه رفتار رئولوژیک محلول‌ها و امولسیون‌های روغن در آب پایدار شده توسط صمغ عربی

جدول ۲- ثابت‌های مدل کاسون برای محلول‌ها و امولسیون‌های حاوی غلظت‌های مختلف صمغ عربی.

غلظت (%)	$\tau_0$ (Pa)	$k_c$ (Pa s) <sup>1/2</sup>	R <sup>2</sup>
۰/۱	۰/۰۰۰۰	۰/۱۷۶۶	۰/۹۹۸۱
۵	۰/۰۳۰۹	۰/۲۸۰۳	۰/۹۹۹۳
۱۰	۰/۱۷۴۲	۰/۳۱۵۲	۰/۹۹۹۶
۲۰	۳/۰۸۵۹	۰/۶۴۲۱	۰/۹۹۶۴
کنترل	۰/۰۱۲۳	-	۰/۹۹۸۰

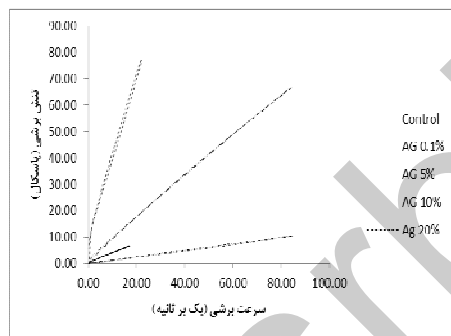


ب

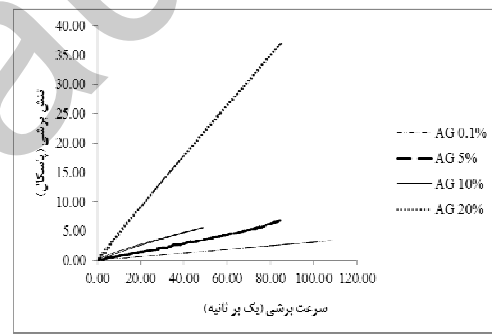


الف

نمودار ۴- وابستگی ویسکوزیته در سرعت برشی صفر به غلظت صمغ عربی در الف) محلول‌ها و ب) امولسیون‌های حاوی غلظت‌های مختلف صمغ عربی



ب



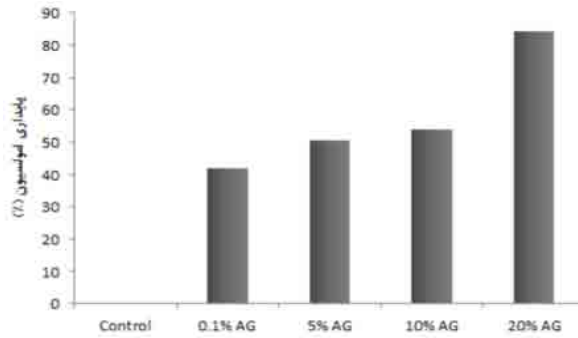
الف

نمودار ۵- عدم وابستگی به زمان الف) محلول‌ها و ب) امولسیون‌های حاوی غلظت‌های مختلف صمغ عربی

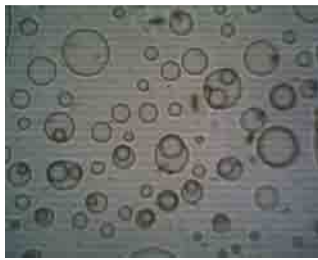
صمغ عربی در غلظت ۲۰٪ در امولسیون یک رفتار سودوپلاستیک تیکسوتروپیک ضعیف را نشان داد چرا که منحنی رفت سرعت برشی-تنش برشی آن دقیقاً بر منحنی برگشت قرار نمی‌گیرد و یک لوپ هیستریسیس را تشکیل می‌دهد (رفتار وابستگی به زمان). البته این لوپ بسیار کوچک است که نشان می‌دهد رفتار وابستگی به زمان بسیار ضعیف است. صمغ عربی در سایر نمونه‌ها (محلول‌ها و امولسیون‌ها) رفتاری غیر تیکسوتروپیک را نشان می‌دهد (عدم وابستگی به زمان)، که علت آن قرارگیری دقیق منحنی رفت سرعت برشی-تنش برشی بر منحنی برگشت است (Bourne, 2002).

مقادیر  $\eta_0$  از طریق رسم  $\log \eta$  در مقابل  $\log \dot{\gamma}$  محاسبه گردید.  $\eta_0$  محلول‌ها و امولسیون‌های حاوی صمغ با افزایش غلظت صمغ عربی افزایش یافت. وابستگی  $\eta_0$  به غلظت صمغ در دمای محیط در نمودار ۵ نشان داده شده است. دو منطقه مشخص خطی برای محلول‌های صمغ (نمودار ۴-الف) و سه منطقه مشخص خطی برای امولسیون‌های پایدار شده با صمغ (نمودار ۴-ب) تشخیص داده شد. شیب دو منطقه خطی از ۰/۰۷۳ به ۰/۰۴۷ در محلول و از ۱/۱۱۴ به ۰/۱۱۱ و از ۰/۱۱۱ به ۰/۰۸۶ در امولسیون تغییر کرد.

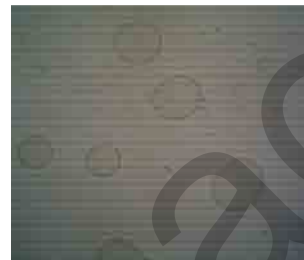
نمودار ۵ نتایج بررسی وابستگی به زمان محلول‌ها و امولسیون‌های پایدار شده با صمغ عربی را نشان می‌دهد.



نمودار ۶- پایداری آمولسیون های حاوی غلظت های مختلف صمغ عربی



آمولسیون حاوی صمغ عربی ۰/۱٪



کنترل



آمولسیون حاوی صمغ عربی ۵٪



آمولسیون حاوی صمغ عربی ۲۰٪

نمودار ۷- تصاویر میکروسکوپی آمولسیون های پایدار شده با غلظت های مختلف صمغ عربی. همه عکس ها با بزرگنمایی ۱۰۰۰ نشان داده شده اند (نمونه آمولسیون حاوی ۰/۱٪ صمغ عربی نشان داده نشده است)

نشان می دهند اندازه ذرات آمولسیون با افزودن صمغ عربی کوچک می شوند و افزایش در غلظت صمغ همراه است با افزایش در کوچک شدن ذرات. بررسی ها نشان می دهد که اندازه ذرات آمولسیون هایی که با پلی ساکارید پایدار می شوند، تفاوت چندانی را با نمونه کنترل نشان نمی دهند این امر نشان دهنده این واقعیت است که صمغ بر سطح ذرات آمولسیون جذب نمی شود، اما وجود کمپلکس پروتئین- پلی ساکارید (مانند صمغ عربی) در سطح قطرات آمولسیون پایدار استریک آمولسیون را بهبود می دهد (Wang et al., 2011).

### بحث

همانطوریکه در نمودار ۱ نیز نشان داده شده است صمغ عربی در تمام غلظت های بررسی شده در محلول آبی و تا غلظت ۱۰٪ در آمولسیون، رفتاری نیوتنی از خود نشان داد،

### - پایداری آمولسیون

نمودار ۶ پایداری آمولسیون های روغن در آب حاوی غلظت های مختلف صمغ عربی را نشان می دهد. نمونه کنترل که فاقد صمغ بود بعد از سانتیفریوژ شدن کاملاً ناپایدار بود در حالی که افزودن صمغ عربی بطور معنی داری باعث افزایش پایداری آمولسیون های فرموله شده گردید و این پایداری با افزایش غلظت صمغ افزایش پیدا کرد. صمغ عربی با وجود آنکه در غلظت ۰/۱٪ تاثیر معنی داری بر ویسکوزیته سیستم آمولسیونی در مقایسه با نمونه کنترل نداشت ( $p < 0.05$ ), اما بطور موثری پایداری این سیستم را در مقایسه با سیستم کنترل افزایش داد.

### - مشاهده میکروسکوپی

تصاویر میکروسکوپی آمولسیون های حاوی صمغ عربی در نمودار ۷ نشان داده شده است. همانطوریکه تصاویر

مقایسه رفتار رئولوژیک محلول‌ها و امولسیون‌های روغن در آب پایدار شده توسط صمغ عربی

می‌یابد، واحدهای ساختاری یا به شکل هم‌جهت شدن در راستای جریان و یا تغییر شکل برای هم‌راستا شدن در جهت جریان و یا از طریق شکسته شدن و تجزیه اجتماعات به ذرات اولیه در برابر نیروی وارده عکس‌العمل نشان می‌دهند. در نهایت مولکول‌های پلیمری درگیر شده در همدیگر ممکن است از هم باز شوند و در نهایت کاملاً هم‌راستا با جهت جریان قرار گیرند. همه این تغییرات ریزساختاری جریان، کل سیستم را آسان می‌کند. این امر می‌تواند منجر به کاهش ویسکوزیته موثر سیستم با افزایش سرعت برشی شود و رفتار ویسکوالاستیک رقیق شونده برشی در سیستم مشاهده شود (Chhabra & Richardson, 2008). اما در مورد صمغ عربی که بسیار شاخه‌دار است و می‌تواند به شکل ملکول‌های گرد و گرانولی شکل در نظر گرفته شود، اجتماعات مولکولی آن با افزایش غلظت شکل می‌گیرد. با اعمال تنش برشی اجتماعات شکل گرفته، شکسته شده و به ذرات کوچکتری تبدیل می‌شوند، ویسکوزیته کاهش می‌یابد و رفتار پلاستیک مشاهده می‌شود (Li et al., 2011). به این ترتیب به نظر می‌رسد که رفتار جریانی صمغ عربی در غلظت‌های ۲۰٪ در محیط‌های امولسیون متفاوت از رفتار صمغ در یک محیط ساده آبی باشد. در هر حال رفتار جریانی صمغ عربی بستگی به غلظت صمغ مانند سایر پلی‌ساکاریدها دارد (Xu et al., 2006).

در قانون توان، مقدار عددی  $n$  هرچقدر به سمت یک حرکت کند، رفتار محلول به نیوتنی نزدیک می‌شود و بالعکس هرچقدر از یک دورتر و کوچکتر شود و به صفر نزدیک‌تر شود رفتار محلول ویسکوپلاستیک و به سمت سودوپلاستیک میل خواهد کرد (Xu et al., 2006). طبق ثابت‌های معادله استوالد-دی-وال، ثابت قوام محلول‌های صمغ با افزایش غلظت صمغ، افزایش یافت، بنابراین اضافه کردن صمغ عربی قوام امولسیون و محلول‌های حاوی صمغ را افزایش داد. این اثر در غلظت‌های بالاتر صمغ بیشتر مشهود بود. ساختار بسیار منشعب صمغ عربی، فشردگی ملکول را با قطر هیدرودینامیک نسبتاً کم افزایش می‌دهد و در نتیجه باعث می‌شود که محلول صمغ تنها در غلظت‌های بالا ویسکوز شود (Phillips & Williams, 2000). گفته می‌شود که محلول صمغ عربی با غلظت ۳۰٪ ویسکوزیته‌ای کمتر

در حالی که در غلظت ۲۰٪ با افزایش سرعت برشی، ویسکوزیته کاهش یافت (Shear thinning behavior) که این امر به شکسته شدن میکروساختارها در امولسیون حاوی صمغ مربوط می‌شود (Li et al., 2011). این نتیجه برخلاف نتایج به‌دست آمده توسط Mothe و Rao (۱۹۹۹) است که رفتار غیرنیوتنی و رقیق‌شونده برشی برای صمغ عربی در غلظت‌های ۴٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ تعریف کردند و علت آن را تشکیل تجمع‌های کوچک در دیسپرسیون صمغ عربی دانستند. Ibanoglu (۲۰۰۲) اظهار داشت که با افزایش غلظت صمغ عربی سودوپلاستیسیته امولسیون کاهش پیدا می‌کند. این محقق اظهار داشت که رفتار رئولوژیک امولسیونی که با صمغ عربی پایدار شده است، با افزایش غلظت صمغ به رفتار نیوتنی نزدیک می‌شود. این در حالی است که گفته می‌شود صمغ عربی در غلظت‌های کمتر از ۴۰٪ رفتاری نیوتنی از خود نشان می‌دهد (Phillips & Williams, 2000) که این موضوع با نتایج به‌دست آمده در این بررسی کاملاً تطابق دارد. Yaseen و همکاران (۲۰۰۵) نیز گزارش کردند که صمغ عربی در غلظت‌های ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۵ رفتاری نیوتنی دارد. محلول‌های حاوی پلیمرهای بسیار شاخه‌دار چون صمغ عربی در محدوده وسیعی از سرعت برشی رفتار نیوتنی از خود نشان می‌دهند. ساختار بسیار منشعب و ممانعت فضایی ناشی از این‌گونه ماکروملکول‌های بسیار منشعب کمتر توانایی شکل‌گیری ساختارهای درگیر در هم را به این ماکروملکول‌ها برخلاف ساختارهای طویل رشته چون سدیم کربوکسی‌متیل سلولز (CMC) می‌دهد. رفتار رئولوژیک پلیمرهای شاخه‌دار بسیار به درجه انشعاب آن‌ها بستگی دارد (Li et al., 2011).

صمغ عربی در غلظت ۲۰٪ رفتار پلاستیک در امولسیون از خود نشان داد. در مورد ملکول‌های بلند زنجیر چون CMC، سیستم حاوی مولکول‌های بلند زنجیر بسیار درگیر در همدیگر است که در آن ملکول‌ها به دلیل دستیابی به پایین‌ترین سطح انرژی به‌طور تصادفی قرار می‌گیرند. در استرس‌های پایین اعمال شده، سیستم در مقابل تغییر شکل مقاومت می‌کند و تلاش می‌کند که ساختار خود را حفظ کند. به همین دلیل مقاومت زیادی که باعث بروز ویسکوزیته ظاهری زیادی می‌شود نشان می‌دهد. همان‌طوری که نیروی برشی به تدریج افزایش



برشی و زمان (وابسته به زمان هستند) ( Bourne, 2002). به نظر می‌رسد که رفتار فرمولاسیون‌های حاوی صمغ عربی در غلظت‌های ۲۰٪ وابسته به زمان است چرا که ویسکوزیته ظاهری آن‌ها با شکسته شدن مداوم تجمعات ملکولی، به تدریج کاهش پیدا می‌کند. همانطوریکه تعداد پیوندهای ساختاری که پتانسیل شکسته شدن را دارند کاهش پیدا می‌کنند، سرعت تغییر در ویسکوزیته ظاهری نیز کاهش پیدا می‌کند ( Chhabra & Richardson, 2008). صمغ عربی رفتار غیر تیکسوتروپیک در محلول‌های حاوی صمغ تا غلظت ۲۰٪ و امولسیون‌های پایدار شده تا غلظت ۱۰٪ صمغ را از خود نشان داد.

نتایج حاصل از پایداری امولسیون‌های حاوی صمغ عربی، نشان دهنده این امر است که صمغ عربی می‌تواند به عنوان یک امولسیفایر بسیار مطلوب در سیستم‌های غذایی استفاده شود. به همین دلیل است که از صمغ عربی به عنوان امولسیفایر برای اسانس‌های روغنی و مواد طعم‌دار استفاده می‌کنند. صمغ عربی به عنوان یک ترکیب پرپروتئین با جرم ملکولی بالا بر سطح قطرات روغن جذب می‌شود. در حالیکه زنجیره‌های پلی‌پپتیدی هیدروفوب جذب سطح می‌شوند و مانند لنگری به سطح می‌چسبند، قسمت کربوهیدراتی از طریق نیروهای دافعه الکتروستاتیک و استریک مانع از فلاکوله شدن و اتصال قطرات چربی به همدیگر برای چندین ماه و یا حتی بیشتر هم می‌شود (Phillips & Williams, 2000). به این ترتیب صمغ عربی پایداری طولانی مدت و مناسبی را از طریق تثبیت ذرات امولسیون در یک شبکه از طریق نیروهای دافعه بارهای الکتروستاتیک موجود بر سطح ملکول ایجاد می‌کند (Ibanoglu, 2002).

### نتیجه‌گیری

ویسکوزیته محلول‌های آبی و امولسیون‌های پایدار شده توسط صمغ عربی با افزایش غلظت صمغ، افزایش یافت. رفتار صمغ عربی در محلول‌ها و امولسیون‌های پایدار شده توسط صمغ کاملاً قابل مقایسه با همدیگر بود. صمغ عربی در غالب نمونه‌های مورد بررسی رفتاری نیوتنی داشت. تنها در امولسیون حاوی ۲۰٪ صمغ عربی رفتار رقیق‌شوندگی مشاهده گردید. رفتار رئولوژیک محلول‌ها و امولسیون‌های حاوی صمغ به خوبی با مدل توان و کاسون تطابق داشت.

از محلول ۱٪ صمغ زانتان و یا سدیم کربوکسی‌متیل سلولز در سرعت‌های برشی پایین دارد ( Phillips & Williams, 2000; Mandala & Bayas, 2004). لازم به ذکر است در حالیکه محلول صمغ عربی در غلظت ۱۰٪ و یا ۲۰٪ رفتاری نیوتنی از خود نشان می‌دهد، صمغ زانتان و CMC رفتاری غیرنیوتنی و رقیق‌شوندگی ( Zhao et al., 2009; Menezes et al., 2010) دارند. این امر به دلیل خطی بودن ساختار زانتان و CMC است که باعث درگیری درون ملکولی می‌شود، در حالیکه این حالت برای ساختارهای بسیار فشرده و شاخه‌دار مثل صمغ عربی صادق نیست (Phillips & Williams, 2000).

غلظتی از صمغ که در آن شیب منحنی  $\eta_0$  (نمودار ۴) تغییر می‌کند "غلظت بحرانی و یا غلظت هم‌پوشانی کوپل‌ها" نامیده می‌شود. به طور کلی گفته می‌شود که غلظت بحرانی شروع حرکت کوپل‌ها و رشته‌ها است که منجر به شکل‌گیری یک شبکه درگیر در هم می‌شود و در نتیجه ویسکوزیته افزایش می‌یابد (در مورد صمغ عربی افزایش غلظت به بیشتر از حد بحرانی باعث ایجاد تجمعات ملکولی می‌شود). در غلظت‌ها و یا رژیم‌های با وزن ملکولی پایین (زیر غلظت بحرانی و یا وزن ملکولی پایین) درگیری بین زنجیره‌ها وجود ندارد و یا آنکه بسیار پایین است (Mandala & Bayas, 2004). در چنین شرایطی، زنجیره‌های پلیمری بسیار کوتاه‌تر از آنند که با یکدیگر ارتباط برقرار کنند تا با هم درگیر شوند. با افزایش غلظت پلیمر و یا افزایش در وزن ملکولی تعداد ملکول‌های غیردرگیر افزایش پیدا می‌کند و به همین دلیل ویسکوزیته افزایش می‌یابد (Chhabra & Richardson, 2008). از سویی دیگر، وقتی غلظت و یا وزن ملکولی پلیمر افزایش می‌یابد و از حد بحرانی می‌گذرد، زنجیره‌های پلیمری با همدیگر درگیر می‌شوند و جریان کلی سیستم سخت می‌شود و در نتیجه ویسکوزیته به طور معنی‌داری افزایش پیدا می‌کند (Chhabra & Richardson, 2008). این غلظت بحرانی (که در آن با تجمعات و نه شکل‌گیری ملکول‌های درگیر مواجه هستیم) برای صمغ عربی ۵٪ به دست آمد. Xu و همکاران (۲۰۰۶) غلظت بحرانی معادل با ۱٪ برای صمغ *Aeromonas* به دست آوردند.

مایعاتی وجود دارند که وقتی تحت نیروهای برشی قرار می‌گیرند، تنش برشی آن‌ها تابعی است از دو عامل سرعت

wheat starch dispersions. *Food Hydrocolloids*, 18, 191–201.

Mandala, I. G., Savvas, T. P. & Kostaropoulos, A. E. (2004). Xanthan and locust bean gum influence on the rheology and structure of a white model-sauce. *Journal of Food Engineering*, 64, 335–342.

Mothe, C. G. & Rao, M. A. (1999). Rheological behavior of aqueous dispersions of cashew gum and gum arabic: effect of concentration and blending. *Food Hydrocolloids*, 13, 501–506.

Menezes, R. R., Marques, L. N., Campos, L. A., Ferreira, H. S., Santana, L. N. L. & Neves, G. A. (2010). Use of statistical design to study the influence of CMC on the rheological properties of bentonite dispersions for water-based drilling fluids. *Applied Clay Science*, 49, 13–20.

Mirhosseini, H., Tan, Ch. P., Aghlara, A., Hamid, N.S.A., Yusof, S. & Chern, B. H. (2008). Influence of pectin and CMC on physical stability, turbidity loss rate, cloudiness and flavor release of orange beverage emulsion during storage. *Carbohydrate Polymers*, 73, 83–91.

Phillips, G. O. & Williams, P. A. (2000). *Handbook of hydrocolloids*. Woodhead Publishing Limited Abington Hall, Abington, Chapter 9.

Turabi, E., Sumnu, G. & Sahin, S. (2008). Rheological properties and quality of rice cakes formulated with different gums and an emulsifier blend. *Food Hydrocolloids*, 22, 305–312.

Wang, Y., Li, D., Wang, L. & Adhikari, B. (2011). The effect of addition of flaxseed gum on the emulsion properties of soybean protein isolate (SPI). *Journal of Food Engineering*, 104, 56–62.

Xu, X., Liu, W. & Zhang, L. (2006). Rheological behavior of *Aeromonas* gum in aqueous solutions. *Food Hydrocolloids*, 20, 723–729.

Yaseen, E. I., Herald, T. J., Aramouni, F. M. & Alavi, S. (2005). Rheological properties of selected gum solutions. *Food Research International*, 38, 111–119.

Zhao, Q., Zhao, M., Yang, B. & Cui, Ch. (2009). Effect of xanthan gum on the physical properties and textural characteristics of whipped cream. *Food Chemistry*, 116, 624–628.

صمغ عربی حتی در غلظت‌های پایین ۰/۱٪ توانست به‌خوبی امولسیون روغن در آب فرموله شده در تحقیق را پایدار کند.

### سپاسگزاری

این مقاله از طرح پژوهشی اجرا شده از محل بودجه باشگاه پژوهشگران جوان واحد یاسوج استخراج گردیده است. بدینوسیله نویسندگان مقاله از باشگاه پژوهشگران جوان واحد یاسوج به‌دلیل تامین هزینه‌های مالی این تحقیق کمال تشکر را دارند.

### منابع

Badreldin, H. A., Ziada, A. & Blunden, G. (2009). Biological effects of gum arabic: A review of some recent research. *Food and Chemical Toxicology*, 47, 1–8.

Bourne, M. C. (2002). *Food texture and viscosity: concept and measurement*. Academic Press, New York, pp. 84-94.

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.

Chhabra, R. P. & Richardson, J. F. (2008). *Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications*. Pergamon Press, London, pp. 37-43.

Derkach, S. R. (2009). Rheology of emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 151, 1–23.

Ibanoglu, E. (2002). Rheological behaviour of whey protein stabilized emulsions in the presence of gum arabic. *Journal of Food Engineering*, 52, 273–277.

Krstonos'ic, V., Dokic, L., Dokic, P. & Dapcevic, T. (2009). Effects of xanthan gum on physicochemical properties and stability of corn oil in water emulsions stabilized by polyoxyethylene (20) sorbitan monooleate. *Food Hydrocolloids*, 23, 2212–2218.

Li, X., Fang, Y., Zhang, H., Nishinari, K., Al-Assaf, S. & Phillips, G. O. (2011). Rheological properties of gum arabic solution: From Newtonianism to thixotropy. *Food Hydrocolloids*, 25, 293-298.

Mandala, I. G. & Bayas, E. (2004). Xanthan effect on swelling, solubility and viscosity of