

# مدل سازی رفتار جریان محلول صمغ بومی قدومه شهری به عنوان تابعی از نرخ برشی، غلظت و دما و مقایسه آن با صمغ تجاری زانتان

هادی باقری<sup>a\*</sup>، زینب گرایلی<sup>b</sup>، مهدی کاشانی نژاد<sup>c</sup>

<sup>a</sup> دانشجوی دکتری مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

<sup>b</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد و مسئول آزمایشگاه، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

<sup>c</sup> استاد گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱/۱۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۴/۲۹

۴۹

## چکیده

**مقدمه:** با توجه به افزایش روزافزون مصرف هیدروکلوئیدها در صنایع غذایی و قیمت بالای صمغ‌های تجاری، به کارگیری و استفاده از صمغ‌های بومی اهمیت فراوانی یافته است. از این رو مطالعه صمغ‌های بومی و مقایسه آنها با صمغ‌های تجاری در شرایط مختلف فرآوری برای استفاده از آنها در صنعت لازم و ضروری است.

**مواد و روش‌ها:** در این مطالعه خصوصیات رئولوژیکی و ویسکوزیته ظاهری محلول صمغی دانه قدومه شهری در چهار غلظت مختلف (۰/۵ تا ۲ درصد)، دما (۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد) و سطح سرعت چرخشی (تا ۲۰۰ دور بر دقیقه) مورد بررسی قرار گرفت و با صمغ تجاری زانتان مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی و برازش داده‌ها از دو مدل قانون توان و بینگهام استفاده شد.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد که با افزایش دما و سرعت چرخشی، ویسکوزیته ظاهری هر دو صمغ کاهش و با افزایش غلظت هر دو، ویسکوزیته ظاهری افزایش یافت. ضریب شاخص قوام محلول صمغ قدومه شهری در مقایسه با زانتان کم‌تر بود و در یک غلظت ثابت، صمغ زانتان از ضریب قوام بالاتری نسبت به صمغ قدومه شهری برخوردار است. نتایج مربوط به مدل‌سازی و برازش داده‌ها نشان داد که بهترین مدل برای برازش داده‌های تجربی قدومه شهری مدل بینگام بود، این در حالی است که مدل قانون توان برازش بهتری نسبت به مدل بینگهام برای داده‌های تجربی محلول صمغی زانتان داشت.

**نتیجه گیری:** صمغ قدومه شهری خصوصیات رئولوژیکی مشابهی با صمغ تجاری زانتان دارند و بنابراین امکان به کارگیری آن همچون صمغ تجاری زانتان وجود دارد.

**واژه‌های کلیدی:** خصوصیات رئولوژیکی، صمغ قدومه شهری، مدل بینگهام

## مقدمه

هیدروکلوئیدهای غذایی بیوپلیمرهای با وزن ملکولی بالا هستند که معمولا دارای رنجیره‌های هیدروفیلی با خصوصیات کلوئیدی می‌باشند که قادراند مقدار زیادی آب را به خود جمع کنند. از این رو به عنوان یک افزودنی در صنایع غذایی به منظور اصلاح و تعدیل میکروساختار، بافت، مزه و افزایش زمان ماندگاری به کار می‌رود. واژه هیدروکلوئیدها پلی‌ساکاریدهای استخراج شده از گیاه، دانه و منابع میکروبی را در بر می‌گیرد. همچنین صمغ‌ها از مواد مترشح گیاهان به دست می‌آیند و بیوپلیمرهای اصلاح شده‌ای هستند که از تیمارهای شیمیایی روی سلولز بدست می‌آیند (Renard, 1996; Rollet, 1995; Dickinson, 2003). هیدروکلوئیدها به طور گسترده در تکنولوژی غذا به عنوان افزودنی استفاده می‌شود از این رو به کارگیری صمغ‌های بومی دارای اهمیت فراوانی می‌باشند. یکی از صمغ‌های بومی ایران قدومه شهری است. این صمغ با نام علمی *Lepidium perfoliatum* شناخته می‌شود و از خانواده شب‌بویان (Cruciferae family) می‌باشد. از لحاظ ظاهری دانه‌های ریز و سیاه و به شکل بیضی کشیده می‌باشد. پوسته روی دانه‌ها را لایه‌ای موسیلاژی پوشانیده و هنگامی که داخل آب قرار می‌گیرند، سریع متورم می‌شوند و مقدار زیادی موسیلاژ (صمغ محلول در آب) ایجاد می‌کند که در طب سنتی کاربرد گسترده‌ای دارد (Amin, 2005). علت انتخاب این دانه برای صمغ‌گیری، ارزان بودن قیمت دانه قدومه شهری و بالا بودن مقدار موسیلاژ تولید شده و همچنین بالا بودن ویسکوزیته موسیلاژ استخراج شده در غلظت پائین بود.

با توجه به اهمیت هیدروکلوئیدها در صنایع غذایی و قیمت بالای این ترکیبات، توجه به صمغ‌های بومی به شدت گسترش یافته و در ایران به دلیل وفور منابع گیاهی، پژوهشگران به فکر جایگزینی صمغ‌های دانه‌ای بومی با نمونه‌های تجاری هستند. یکی از این ترکیبات پلی‌ساکاریدی، صمغ دانه قدومه شهری می‌باشد که می‌توان آن را در فرمولاسیون‌های غذایی استفاده نمود (Koocheki et al., 2009). صمغ زانتان یک پلی‌ساکارید خارج سلولی است که توسط باکتری زانتاموناس کمپستریس تولید می‌شود. این صمغ وزن مولکولی بیش از

۱۰۶ دالتون دارد. از جمله ویژگی‌های مهم صمغ زانتان می‌توان به حلالیت در آب سرد و گرم، ایجاد ویسکوزیته بالا در غلظت پایین اشاره کرد. (Phillips et al., 2000). علت انتخاب صمغ زانتان برای مقایسه با دو دلیل علمی و اقتصادی انجام گرفت. با توجه به مطالعات انجام گرفته صمغ تجاری زانتان جزء بهترین صمغ‌های به کار رفته در صنایع غذایی محسوب می‌شود و از سویی دیگر یکی از پر مصرف ترین صمغ‌ها در صنایع غذایی است (García-Ochoa et al., 2009). علاوه بر این ورود چنین صمغ‌های با قیمت بالا به داخل کشور موجب خروج ارز زیادی از کشور می‌شود؛ این در حالی است که صمغ‌های بومی کشور این قابلیت را دارد که جایگزین چنین صمغ‌های در بخش صنایع غذایی شوند. بنابراین سعی شد که صمغ بومی مورد نظر با یکی از بهترین و پرکاربردترین صمغ‌ها مورد مقایسه قرار بگیرد

امروزه دانش رئولوژی کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف صنایع غذایی اعم از ارزیابی فرآیند، مقبولیت فرآورده و خرید و فروش آن دارد، همچنین بررسی خصوصیات رئولوژیکی و گرانیوی مواد قبل از طراحی فرایندهایی شامل انتقال سیالات، پمپ ها، استخراج، فیلتراسیون، پاستوریزاسیون، تبخیر و خشک کردن ضروری است. از این رو دانش رئولوژی یک عامل مهم برای ارزیابی کیفیت در اغلب مواد به ویژه صمغ قدومه شهری بوده و بر رفتار آن موثر است. ویسکوزیته ظاهری صمغ‌ها معمولا بستگی به درجه خلوص، ویژگی‌های شیمیایی و منبع استخراج آن دارد. تاثیر پارامترهای همچون غلظت، دما و سرعت چرخشی بر رفتار جریان صمغ کنترالی ایرانی توسط عباسی و رحیمی (۱۳۸۴) مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که این صمغ در غلظت‌های پایین، رفتار سیالات نیوتنی را از خود نشان می‌دهد این در حالی است که در غلظت‌های بالا رفتار این صمغ مشابه رفتار مواد شبه پلاستیک بود. از طرفی در کلیه تیمارها افزایش غلظت سبب افزایش گرانیوی ظاهری و افزایش دما سبب کاهش گرانیوی ظاهری گردید.

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و عملکردی صمغ زدو تراوشی از درخت بادام کوهی توسط خالصی و همکاران (۱۳۹۱) مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه

کلوخه حین افزودن پودر صمغ‌ها به آب سرد، پودر صمغ‌ها به صورت تدریجی و یکنواخت به آب افزوده شد. به این منظور از دستگاه هم‌زن مغناطیسی استفاده گردید و مخلوطها تا به دست آمدن محلولی یکنواخت هم زده شدند. از آنجا که گرانیروی محلول‌های هیدروکلوئیدی پس از یک شب ماندن به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسند، بنابراین در این پژوهش به منظور حداکثر جذب آب به وسیله‌ی صمغ تمامی نمونه‌ها به صورت سرپوشیده و پس از یک شب نگه داری در دمای اتاق مورد آزمایش قرار گرفتند.

#### - اندازه‌گیری ویسکوزیته ظاهری

ویسکوزیته ظاهری نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ویسکومتر چرخشی بروکفیلد (Brookfield, model RVDV-II+) (pro, USA) و اسپیندل مدل (YULA-15) شماره So2 اندازه‌گیری شد. ویسکوزیته ظاهری هر یک از نمونه‌ها در شرایط دمایی (۳۰، ۳۵، و ۴۰ درجه سانتی‌گراد) و هجده سرعت چرخشی (از ۵ تا ۲۰۰ دور در دقیقه) (در فواصل ۵ دور در دقیقه) بر حسب (mPa.s) اندازه‌گیری شد. این ویسکومتر در محل قرار گیری نمونه و اسپیندل، مجهز به یک محفظه استوانه‌ای دو جداره می باشد که توسط یک دستگاه حمام آب و سیرکولاتور مربوطه، دمای نمونه را تنظیم می‌کند. لذا در حین اندازه‌گیری گرانیروی، دمای نمونه ثابت باقی می‌ماند. براساس بررسی‌های انجام شده، مدل‌های قانون توان (معادله ۱) و بینگهام (معادله ۲) جهت بررسی خصوصیات رئولوژیکی صمغ دانه قدومه شهری و صمغ زانتان مناسب تشخیص داده شدند و از این دو مدل برای بررسی خصوصیات مستقل از زمان استفاده گردید.

#### - محاسبه تنش برشی و سرعت برشی

با توجه به اینکه دستگاه ویسکومتر بروکفیلد با استفاده از اسپیندل‌های دیسکی قادر به محاسبه تنش برشی و سرعت برشی نمی‌باشد لذا کمیت‌های قابل اندازه‌گیری در این دستگاه که به صورت سرعت چرخشی (rpm)، ویسکوزیته ظاهری و درصد گشتاور می‌باشد، باید به کمیت‌های سرعت برشی و تنش برشی تبدیل گردد تا بتوان از آن‌ها در محاسبات استفاده کرد. بنابراین از روش Mitschka برای محاسبه سرعت برشی و تنش برشی استفاده شد (Mitschka, 1982).

اثر غلظت، دما و غلظت نمک‌های مختلف بر ویسکوزیته ظاهری صمغ زرد مورد مطالعه قرار گرفت نتایج این مطالعه نشان داد که ویسکوزیته صمغ وابسته به تغییرات دما و pH می‌باشد. نتایج نشان داد که بالاترین ویسکوزیته این صمغ مربوط به نمونه صمغ داری pH برابر با ۷/۲ و دمای ۲۴ درجه‌ی سانتی‌گراد است. تقاضا برای هیدروکلوئیدها با خصوصیات عملکردی خاص اخیر منجر به این شده است که محققان و تکنولوژیست‌ها به دنبال جستجوی منابع جدید از پلی‌ساکاریدها برای تولید صمغ‌ها باشد. بر این اساس موسیلاژ صمغ قدومه شهری که برای سال‌ها به عنوان یک منبع داروی استفاده شده است. این قابلیت را دارد که به عنوان یک هیدروکلوئید با خصوصیات عملکردی خاص شناخته شود. بررسی منابع مختلف نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه‌ای در خصوص مقایسه صمغ تجاری قدومه شهری و زانتان انجام نشده است هر چند خود صمغ قدومه شهری توسط Koocheki و همکاران (۲۰۰۸) مطالعه شده است، بنابراین هدف از این مطالعه بررسی اثر دما، غلظت و سرعت برشی بر خصوصیات رئولوژیکی صمغ قدومه شهری و در نهایت مقایسه رفتار جریان این صمغ با صمغ تجاری زانتان می‌باشد.

#### مواد و روش‌ها

##### - تولید پودر صمغ قدومه شهری

به منظور تولید پودر صمغ قدومه شهری، ابتدا دانه‌های قدومه شهری (*Leidium perfoliatum*) با استفاده از آب با دمای ۴۸ درجه سانتی‌گراد، pH=۸ و نسبت آب به دانه ۳۰ به ۱ در طی دو ساعت خیس و سپس بخش موسیلاژی خارج شده از دانه توسط دستگاه آمیوه‌گیر استخراج و دانه‌های آن دور ریخته شد. در مرحله آخر توسط آون با دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. به منظور جداسازی ناخالصی‌ها و پودرهای درشت از الک با مش ۱۰۰ استفاده شد (Karazhiyan et al., 2011).

##### - آماده‌سازی نمونه‌ها

مقادیری از پودر خالص صمغ قدومه شهری و زانتان متناسب با غلظت‌های مورد نظر (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد) به کمک ترازوی (Sartoris, TE313S pro, Germany) با دقت بالا اندازه‌گیری شدند. برای جلوگیری از ایجاد

شدند به منظور مدل کردن داده‌های تجربی تنش برشی در برابر سرعت برشی، و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌های رئولوژیکی از نرم افزار سیگما پلات ورژن ۱۲ استفاده شد (Naji et al., 2012).

$$\tau = k(dv/dy)^n = k \gamma^n$$

مدل قانون توان

$$\tau = \eta_B \dot{\gamma} + \tau_{0B}$$

مدل بینگهام

### - تجزیه و تحلیل آماری

آزمایش‌ها در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. میانگین‌ها با استفاده از نرم‌افزار Minitab و آزمون دانکن در سطح ۵ درصد مقایسه شدند. برای رسم نمودارها از برنامه نرم‌افزاری اکسل استفاده شد. کلیه آزمایشات در سه تکرار انجام شد.

### یافته‌ها

ویسکوزیته ظاهری محلول صمغی حاوی درصد‌های مختلف صمغ قدومه شهری و زانتان در دماهای مختلف در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. همچنین نتایج مربوط به مدل‌سازی خصوصیات رئولوژیکی با دو مدل قانون توان و مدل بینگهام در جداول ۳، ۴، ۵ و ۶ ارائه شده است.

### بحث

با توجه به شکل‌های ۱ و ۲ در تمامی نمونه‌ها، با افزایش سرعت چرخشی، ویسکوزیته ظاهری تمام نمونه‌ها کاهش یافت. این کاهش نشان دهنده خصوصیت رفتار شل‌شونده با زمان (سودوپلاستیک) صمغ دانه قدومه شهری و زانتان در غلظت‌ها و دماهای مختلف می‌باشد. برای بیش‌تر محلول‌های هیدروکلوئیدی این رفتار قابل مشاهده است که ناشی از ساختار پلیمری و وزن مولکولی بالای آن‌ها است. در آغاز افزایش سرعت چرخشی کاهش ویسکوزیته ظاهری از شدت بالاتری برخوردار است ولی در ادامه از شدت کاهش ویسکوزیته ظاهری کاسته می‌شود. علت کاهش شدید ویسکوزیته ظاهری در ابتدا امر به دلیل از بین رفتن پیوندهای بین مولکولی می‌باشد. این درحالی

برای محاسبه این پارامترها، قدم اول پیدا کردن رفتار جریان (n) می‌باشد که از معادله زیر بدست می‌آید:

$$M = (\text{Constant}) N^n$$

$$\ln M = \ln(\text{constant}) + n \ln(N)$$

قدم بعدی محاسبه تنش برشی توسط رابطه زیر می‌باشد.

$\tau = k\dot{\gamma} (C) (M)$  که مقدار  $k\dot{\gamma}$  طبق جدول ۱ با شماره اسپیندل تغییر می‌یابد و مقدار C طبق جدول ۲ که به نوع ویسکومتر وابسته است.

در این رابطه، M و N به ترتیب نشان‌دهنده درصد گشتاور و سرعت چرخشی می‌باشد.

جدول ۱- مقادیر  $k\dot{\gamma}$  برای اسپیندل‌های بروکفیلد

شماره اسپیندل	$K\dot{\sigma}(\text{Pa})$	شماره اسپیندل	$K\dot{\sigma}(\text{Pa})$
۱	۰/۰۳۵	۵	۱/۰۵
۲	۰/۰۱۱۹	۶	۲/۳۵
۳	۰/۰۲۷۹	۷	۸/۴۰
۴	۰/۰۵۳۹		

جدول ۲- مقادیر C برای ویسکومترهای بروکفیلد

مدل ویسکومتر	C (بدون بعد)
1/2RV	۰/۵
RV	۱
HAT	۲
HBT	۸

قدم سوم محاسبه سرعت برشی متوسط است که توسط رابطه قابل محاسبه است.

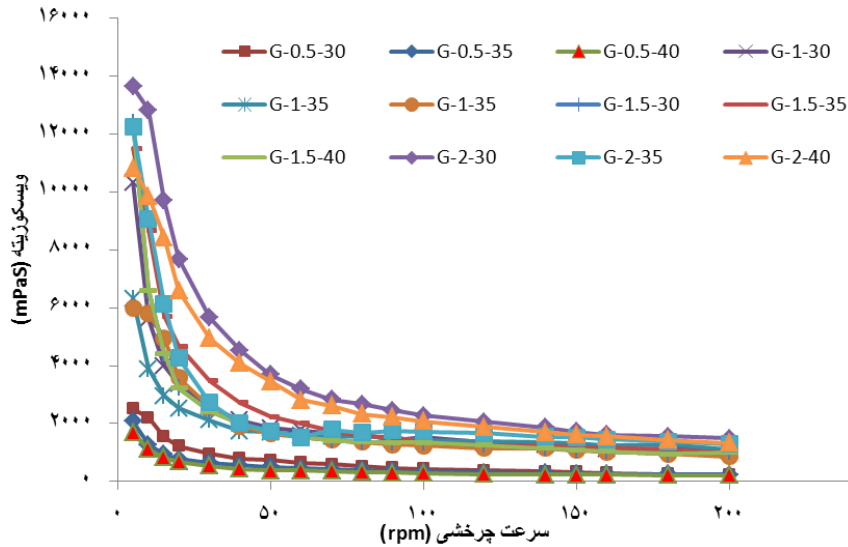
$$\dot{\gamma}_a = K_y(N)$$

مقدار  $K_y$  وابسته به مقدار عدد n می‌باشد و از رابطه زیر بدست می‌آید.

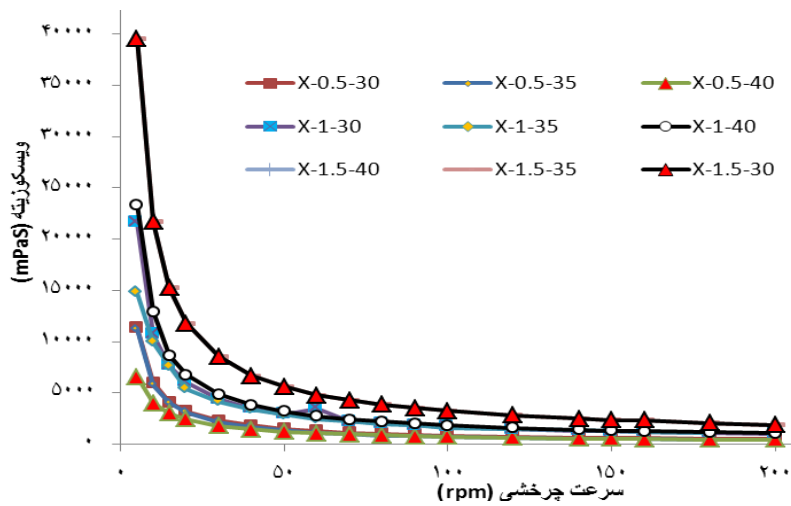
$$K_y = 0.236(1/n)^{0.771}$$

در این مقاله مدل‌های قانون توان (معادله ۱) و بینگام (معادله ۲) جهت بررسی خصوصیات رئولوژیکی استفاده

باقری و همکاران



شکل ۱- اثر سرعت برشی، غلظت و دما بر ویسکوزیته ظاهری محلول صمغی قدومه شهری



شکل ۲- اثر سرعت برشی، غلظت و دما بر ویسکوزیته ظاهری محلول صمغی زانتان

جدول ۳- پارامترهای بدست آمده از برازش داده‌های مدل قانون توان برای محلول صمغ قدومه شهری

SE	R <sup>2</sup>	n <sup>p</sup>	kp (Pa s <sup>n</sup> )	کد نمونه
۰/۴۹۱۳	۰/۹۸۱۱	۰/۲۵۵۳ <sup>f</sup>	۳/۶۶۶۳ <sup>ef</sup>	G-0/5-30 <sup>0</sup> C
۰/۲۸۸۳	۰/۹۹۵۸	۰/۴۵۷۸ <sup>d</sup>	۱/۴۸۱۷ <sup>g</sup>	G-0/5-35 <sup>0</sup> C
۰/۲۲۸۹	۰/۹۹۶۹	۰/۵۰۷۱ <sup>c</sup>	۱/۰۸۷۶ <sup>g</sup>	G-0/5-40 <sup>0</sup> C
۲/۴۲۴۰	۰/۹۸۷۶	۰/۵۵۱۸ <sup>c</sup>	۴/۵۷۷۱ <sup>e</sup>	G-1-30 <sup>0</sup> C
۳/۷۱۰۱	۰/۹۵۷۶	۰/۵۰۲۸ <sup>c</sup>	۴/۵۵۰۶ <sup>e</sup>	G-1-35 <sup>0</sup> C
۱/۸۶۴۵	۰/۹۹۴۶	۰/۶۷۷۹ <sup>a</sup>	۳/۰۱۹۳ <sup>f</sup>	G-1-40 <sup>0</sup> C
۰/۵۲۱۶	۰/۹۸۷۳	۰/۲۷۵۸ <sup>ef</sup>	۱۲/۲۱۰۳ <sup>c</sup>	G-1/5-30 <sup>0</sup> C
۲/۵۶۰۷	۰/۹۷۰۵	۰/۳۲۷۹ <sup>e</sup>	۹/۶۶۳۳ <sup>d</sup>	G-1/5-35 <sup>0</sup> C
۲/۹۷۷۰	۰/۹۷۰۷	۰/۴۷۶۹ <sup>cd</sup>	۵/۰۵۶۳ <sup>e</sup>	G-1/5-40 <sup>0</sup> C
۴/۳۶۷۱	۰/۹۶۳۱	۰/۳۰۳۱ <sup>e</sup>	۱۷/۰۰۳۳ <sup>a</sup>	G-2-30 <sup>0</sup> C
۲/۰۶۵۲	۰/۹۸۹۰	۰/۲۹۶۳ <sup>ef</sup>	۱۵/۶۴۲۳ <sup>a</sup>	G-2-35 <sup>0</sup> C
۵/۳۱۸۲	۰/۹۶۰۲	۰/۶۱۹۴ <sup>b</sup>	۱۳/۸۷۶۶ <sup>b</sup>	G-2-40 <sup>0</sup> C

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد است.

جدول ۴- پارامترهای بدست آمده از برازش داده‌های مدل قانون توان برای محلول صمغ قدومه زانتان

SE	R <sup>2</sup>	n <sup>p</sup>	kp (Pa s <sup>n</sup> )	کد نمونه
۰/۵۱۴۸	۰/۹۸۹۰	۰/۱۶۵۱ <sup>c</sup>	۱۰/۲۷۳۶ <sup>f</sup>	X-0/5-30 <sup>0</sup> C
۰/۷۰۸۳	۰/۹۵۸۵	۰/۱۲۷۵ <sup>d</sup>	۱۰/۳۷۰۸ <sup>f</sup>	X-0/5-35 <sup>0</sup> C
۰/۱۴۴۹	۰/۹۹۹۴	۰/۲۴۶۸ <sup>a</sup>	۶/۳۹۱۶ <sup>g</sup>	X-0/5-40 <sup>0</sup> C
۱/۶۳۹۴	۰/۹۶۸۶	۰/۱۳۴۸ <sup>d</sup>	۲۵/۷۳۶۰ <sup>c</sup>	X-1-30 <sup>0</sup> C
۱/۰۰۷۱	۰/۹۹۲۱	۰/۱۷۹۱ <sup>c</sup>	۲۱/۰۰۴۴ <sup>d</sup>	X-1-35 <sup>0</sup> C
۱/۱۷۴۹	۰/۹۹۰۰	۰/۲۰۴۵ <sup>b</sup>	۱۷/۵۹۶۹ <sup>e</sup>	X-1-40 <sup>0</sup> C
۲/۰۲۵۹	۰/۹۸۸۵	۰/۱۶۴۴ <sup>c</sup>	۳۹/۷۲۴۳ <sup>a</sup>	X-1/5-30 <sup>0</sup> C
۳/۰۲۰۹	۰/۹۸۱۶	۰/۲۰۱۴ <sup>b</sup>	۳۳/۹۵۱۷ <sup>b</sup>	X-1/5-35 <sup>0</sup> C
۱/۰۱۶۵	۰/۹۹۷۹	۰/۲۰۸۰ <sup>b</sup>	۳۲/۲۵۵۰ <sup>b</sup>	X-1/5-40 <sup>0</sup> C
				X-2-30 <sup>0</sup> C
				X-2-35 <sup>0</sup> C
				X-2-40 <sup>0</sup> C

غیرقابل اندازه‌گیری با ویسکومتر بروکفیلد

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد است.

جدول ۵- پارامترهای بدست آمده از برازش داده‌های مدل بینگهام برای محلول صمغ قدومه شهری

SE	R <sup>2</sup>	$\tau_{0B}$ (Pa)	$\eta_B$ (Pa.s)	کد نمونه
۰/۹۰۷۹	۰/۹۳۴۰	۶/۸۰۴۶ <sup>g</sup>	۰/۰۴۸۳ <sup>h</sup>	G-0/5-30 <sup>0</sup> C
۰/۶۵۸۶	۰/۹۷۷۸	۳/۵۰۴۳ <sup>h</sup>	۰/۰۹۶۵ <sup>h</sup>	G-0/5-35 <sup>0</sup> C
۰/۴۰۳۴	۰/۹۹۰۳	۲/۷۰۹۲ <sup>h</sup>	۰/۰۹۵۵ <sup>h</sup>	G-0/5-40 <sup>0</sup> C
۱/۷۰۶۷	۰/۹۹۳۹	۱۲/۴۹۵۶ <sup>c</sup>	۰/۵۰۲۰ <sup>c</sup>	G-1-30 <sup>0</sup> C
۱/۳۸۷۳	۰/۹۹۴۲	۱۲/۱۸۶۷ <sup>e</sup>	۰/۳۴۸۴ <sup>d</sup>	G-1-35 <sup>0</sup> C
۲/۳۶۱۱	۰/۹۹۱۴	۸/۴۰۵۲ <sup>f</sup>	۰/۷۲۵۸ <sup>a</sup>	G-1-40 <sup>0</sup> C
۱/۸۳۱۰	۰/۹۸۱۶	۲۳/۴۳۳۳ <sup>c</sup>	۰/۱۹۳۸ <sup>g</sup>	G-1/5-30 <sup>0</sup> C
۱/۱۵۶۳	۰/۹۹۴۱	۲۰/۲۴۹۹ <sup>d</sup>	۰/۲۳۵۷ <sup>f</sup>	G-1/5-35 <sup>0</sup> C
۱/۵۸۵۹	۰/۹۹۱۸	۱۳/۴۶۲۰ <sup>e</sup>	۰/۳۳۹۳ <sup>d</sup>	G-1/5-40 <sup>0</sup> C
۲/۳۱۰۸	۰/۹۸۹۸	۳۴/۱۰۴۵ <sup>a</sup>	۰/۳۴۱۳ <sup>d</sup>	G-2-30 <sup>0</sup> C
۲/۴۰۴۷	۰/۹۸۵۱	۳۰/۹۵۴۷ <sup>b</sup>	۰/۲۹۹۱ <sup>e</sup>	G-2-35 <sup>0</sup> C
۲/۴۸۱۴	۰/۹۸۳۱	۲۳/۰۰۳۳ <sup>c</sup>	۰/۵۷۲۶ <sup>b</sup>	G-2-40 <sup>0</sup> C

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد است.

جدول ۶- پارامترهای بدست آمده از برازش داده‌های مدل بینگهام برای محلول صمغ زانتان

SE	R <sup>2</sup>	$\tau_{0B}$ (Pa)	$\eta_B$ (Pa.s)	کد نمونه
۰/۷۵۱۶	۰/۹۷۶۴	۱۶/۱۱۶۵ <sup>g</sup>	۰/۰۴۸۷ <sup>e</sup>	X-0/5-30 <sup>0</sup> C
۰/۵۸۰۱	۰/۹۷۲۴	۱۴/۹۶۷۴ <sup>h</sup>	۰/۰۲۸۴ <sup>e</sup>	X-0/5-35 <sup>0</sup> C
۱/۳۴۱۶	۰/۹۴۵۰	۱۱/۵۷۷۰ <sup>k</sup>	۰/۰۷۹۶ <sup>d</sup>	X-0/5-40 <sup>0</sup> C
۱/۰۴۲۲	۰/۹۸۷۴	۳۷/۷۶۱۷ <sup>d</sup>	۰/۰۷۸۹ <sup>d</sup>	X-1-30 <sup>0</sup> C
۱/۸۶۷۵	۰/۹۷۲۷	۳۳/۸۹۲۳ <sup>e</sup>	۰/۱۱۹۵ <sup>c</sup>	X-1-35 <sup>0</sup> C
۱/۷۲۴۴	۰/۹۷۸۳	۲۹/۷۸۵۲ <sup>e</sup>	۰/۱۳۶۱ <sup>c</sup>	X-1-40 <sup>0</sup> C
۲/۸۷۸۷	۰/۹۷۶۶	۶۲/۲۳۷۹ <sup>a</sup>	۰/۱۸۶۲ <sup>b</sup>	X1/5-30 <sup>0</sup> C
۴/۶۳۰۵	۰/۹۵۶۱	۵۷/۲۳۱۷ <sup>b</sup>	۰/۲۵۲۷ <sup>a</sup>	X-1/5-35 <sup>0</sup> C
۴/۸۲۲۵	۰/۹۵۱۰	۵۴/۹۴۹۸ <sup>c</sup>	۰/۲۶۱۵ <sup>a</sup>	X-1/5-40 <sup>0</sup> C
				X-2-30 <sup>0</sup> C
				X-2-35 <sup>0</sup> C
				X-2-40 <sup>0</sup> C

غیرقابل اندازه‌گیری با ویسکومتر بروکفیلد

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد است.

اعمال شده، هر سه صمغ رفتار شبه پلاستیکی از خود نشان دادند (Harry-Okuru *et al.*, 1999).

رضایی و همکاران (۱۳۹۰) اثر افزودن غلظت‌های مختلف صمغ گوآر و صمغ عربی بر رفتار رئولوژیکی ماست منجمد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که هر دو صمغ افزوده شده سبب شدند ماست منجمد رفتار سودوپلاستیک از خود نشان دهد.

تغییرات غلظت از جمله پارامترهایی است که در میزان ویسکوزیته ظاهری تاثیرگذار است. همان‌طور که در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است، با افزایش غلظت مقدار گرانروی ظاهری افزوده شد. در یک سرعت برشی ثابت، هر چه غلظت افزایش می‌یابد پیرو آن گرانروی ظاهری نیز افزایش پیدا می‌کند که افزایش گرانروی ظاهری در سرعت‌های برشی پایین بیش از سرعت‌های برشی بالا است ولی در هر دو حالت این وابستگی از نوع مستقیم است.

در تاکید نتایج به دست آمده می‌توان به مطالعات سماواتی و همکاران (۱۳۹۱) اشاره کرد. این پژوهشگران نشان دادند که با افزایش میزان صمغ کتیرا از غلظت ۰/۵ به ۱ درصد گرانروی افزایش می‌یابد. پژوهشگران دیگری همچون فروغی و عباسی (۱۳۸۵) با بررسی ویژگی‌های رئولوژیک صمغ ثعلب نشان دادند که این محلول در غلظت‌های پایین رفتار نیوتنی و در غلظت‌های بالاتر رفتار شبه پلاستیک داشت و افزایش غلظت سبب افزایش گرانروی گشت.

ویسکوزیته ظاهری هیدروکلوئیدها به شدت به دما وابسته است. دما عامل بسیار مهمی است که علاوه بر تغییر مقدار ویسکوزیته ظاهری حتی قادر به تغییر رفتار جریان محلول نیز می‌باشد. اثر دما بر روی ویسکوزیته ظاهری محلول صمغ دانه قدومه شهری و زانتان قابل توجه است. در شکل‌های ۱ و ۲ تاثیر دما بر گرانروی ظاهری صمغ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود با افزایش دما ویسکوزیته ظاهری کم می‌شود. در رابطه با توجیه رفتار ذکر شده شاید بتوان گفت که افزایش دما با رقیق کردن محلول روی گرانروی ظاهری تاثیر می‌گذارد و در واقع با افزایش دما انرژی جنبشی مولکول‌ها افزایش یافته و پیوند بین مولکول‌ها را ضعیف‌تر و کم‌تر می‌کند و

است که در ادامه این پیوندهای ملکول‌ها شکسته شده و در نتیجه کاهش ویسکوزیته ظاهری به آرامی اتفاق می‌افتد (Song *et al.*, 2006).

در فرآیندهایی با تنش برشی بالا همانند پمپ کردن و پر کردن، کاهش ویسکوزیته‌ی ظاهری منجر به سهولت فرآیند می‌گردد و در هنگام مصرف با افزایش ویسکوزیته‌ی ظاهری محصول، احساس دهانی مطلوبی ایجاد می‌کند (Tada *et al.*, 1998). البته این رفتار زمانی اهمیت دارد که شاخص رفتار جریان کم‌تر از ۰/۶ باشد که برای هر دو صمغ در بیشتر شرایط این مقدار کم‌تر از ۰/۶ بود (جداول ۴ و ۵).

در فرمولاسیون امولسیون‌های روغن در آب این خصوصیات از اهمیت فرآوانی برخوردار است چرا که با وجود این که امولسیون در هنگام خروج از ظرف به راحتی جریان پیدا می‌کند، اما از جدا شدن ذرات در اثر نیروی جاذبه جلوگیری شده و امولسیون با ثبات باقی می‌ماند (Sworn, 2000).

محلول‌های صمغ زانتان رفتار ضعیف شونده با برش قوی‌تری نسبت به محلول‌های صمغ دانه‌ی قدومه شهری نشان دادند. رفتار ضعیف شونده با برش صمغ‌های قدومه شهری و زانتان مربوط به وزن مولکولی بالای آن و واکنش‌های بین مولکولی است که تجمعاتی را از طریق باندهای هیدروژنی و درگیری‌های پلیمری تشکیل می‌دهند (Sworn, 2000). Koocheki و همکاران (۲۰۰۸) نیز به رفتار سودوپلاستیک صمغ قدومه شهری اشاره کردند و نشان دادند که رفتار این صمغ در همه تیمارهای اعمال شده از نوع سودوپلاستیک می‌باشد.

نتایج محققان مختلف نشان می‌دهد که رفتار اکثر صمغ‌ها از نوع غیرنیوتنی بوده و اکثراً جزء سیالات رقیق‌شونده با برش محسوب می‌شوند. از جمله این گزارشات می‌توان به رفتار شبه پلاستیکی صمغ تنه‌ی زردآلو، رفتار شبه پلاستیکی صمغ تنه‌ی درخت هلو و صمغ دانه ریحان اشاره کرد (سمائی و همکاران، ۱۳۹۳؛ صالحی و کاشانی‌نژاد، ۱۳۹۲؛ Qian *et al.*, 2011).

به عنوان مثال در مطالعه‌ای که بر روی صمغ کتیرا انجام شد، این صمغ با دو صمغ تجاری و پرمصرف مانند گوآر و زانتان مقایسه گردید. در محدوده‌ی سرعت برشی

شده از ۱/۵ درصد و کمترین ضریب شاخص قوام محلول مربوط به نمونه محلول صمغی قدومه شهری با غلظت ۰/۵ درصد است، در ضمن به علت ویسکوزیته بالای غلظت ۲ درصد صمغ زانتان و بالا رفتن کشتاور مورد نیاز، ویسکومتر بروکفیلد قادر به اندازه‌گیری دقیق این غلظت از محلول صمغی نبود و بنابراین داده‌های این غلظت از محلول صمغی زانتان بیان نشد.

مقدار عددی شاخص رفتار جریان یا شاخص قانون توان (n) برای صمغ زانتان تغییر معنی‌داری نکرد و مقدار آن حدود ۰/۱۶ بود ولی برای صمغ قدومه شهری متغیر بود. بنابراین به راحتی مشخص شد که سیال از نوع غیرنیوتنی می‌باشد و هر چه قدر مقدار n بزرگتر یا کوچک‌تر از یک باشد، نشان‌دهنده انحراف از رفتار نیوتنی است ( $P < 0.05$ ) (جدول ۳ و ۴).

پارامترهای حاصل از برازش داده‌های محلول صمغی قدومه شهری و زانتان با مدل بینگهام (جدول ۵ و ۶) نشان داد که تنش تسلیم بینگهام محلول صمغی قدومه شهری و زانتان با افزایش غلظت افزایش یافت. این افزایش نشان‌دهنده وجود تعداد زیاد باندهای هیدروژنی در ساختار ماریپیچ صمغ‌ها است که در مقابله با جریان مقاومت می‌کنند و در نتیجه نیازمند یک تنش تسلیم اولیه‌اند (Steffe, 1996). افزایش دما نشان‌دهنده کاهش تنش تسلیم محلول صمغی قدومه شهری و زانتان در غلظت‌های مختلف می‌باشد. این بدین معنی است که با افزایش دما، تعداد پیوندهای هیدروژنی موجود در داخل محلول صمغی قدومه شهری کاهش یافته و در نتیجه با افزایش دما، تنش تسلیم بینگهام کاهش یافته است. مقادیر تنش تسلیم بینگهام صمغ زانتان در تمامی غلظت‌ها بیشتر از صمغ دانه‌ی قدومه شهری بود. وجود تنش تسلیم برای محلول صمغ‌های مذکور ممکن است به دلیل تعداد زیاد باندهای هیدروژنی در ساختار ماریپیچ آن‌ها باشد که منجر به ایجاد کنفورماسیون پایداری در آن‌ها گشته که در مقابله با جریان مقاومت می‌کنند (Steffe, 1996). وجود تنش تسلیم در محلول‌های صمغ زمانی که به عنوان اتصال‌دهنده برای حفظ ترکیبات فرمولاسیون در کنار هم استفاده می‌شود بسیار حائز اهمیت است (Rao & Keney, 1975).

با توجه به ضریب همبستگی و مقدار خطای استاندارد به دست آمده (SE) از برازش مدل‌های قانون توان و

در نتیجه محلول در مقابل جریان، مقاومت کمتری نشان می‌دهد. Koocheki و همکاران (۲۰۰۹) نیز با بررسی اثر دما نشان دادند که با افزایش دما ویسکوزیته صمغ قدومه شهری کم می‌شود. مطالعات پژوهشگران مختلف نیز بر روی صمغ زدو و صمغ کنیرا روند مشابهی را گزارش کرده‌اند (سمائی و همکاران، ۱۳۹۳). طی پژوهشی که روی صمغ تنه‌ی گیلاس در فصول مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که در غلظت ۵ درصد گرانروی ظاهری این صمغ نیز با افزایش دما کاهش یافت (Amarioarei et al., 2012).

پارامترهای مدل رئولوژیکی برای محلول‌های صمغ دانه‌ی قدومه شهری و صمغ زانتان در غلظت و دماهای در جداول ۳، ۴، ۵ و ۶ ارائه شده است.

در جداول ۳ و ۴ پارامترهای برازش شده مدل قانون توان برای محلول صمغ دانه قدومه شهری و زانتان به نمایش درآمده است. همان‌طور که در جدول ۳ دیده می‌شود، ضریب شاخص قوام یا ضریب پایداری (K) که نشانگر ویسکوزیته‌ی محلول صمغ است، برای صمغ قدومه شهری و زانتان در غلظت‌ها و دماهای مختلف به ترتیب در محدوده ۱/۰۸۷۶ تا ۱۷/۰۰۳۳ و ۶/۳۹۱۶ تا ۳۹/۷۲۴۲ بود. و با افزایش غلظت صمغ قدومه شهری و زانتان، ضریب قوام افزایش یافت. پژوهشگرانی همچون Gómez-Díaz و Navaza (۲۰۰۳) و Gujal و همکاران (۲۰۰۲) عنوان کردند که افزایش غلظت هیدروکلوئیدها میزان ظرفیت اتصال آب را افزایش داده و در نتیجه کاهش جریان پذیری محلول، میزان مقاومت نمونه در برابر کرنش برشی افزایش می‌یابد، بنابراین با افزایش غلظت صمغ‌ها، شاخص قوام محلول‌های صمغی افزایش می‌یابد.

همچنین افزایش دما نشان‌دهنده کاهش ضریب قوام محلول صمغی قدومه شهری و زانتان بود. افزایش دما منجر به افزایش انرژی جنبشی مولکول‌ها شده و در نتیجه پیوند بین مولکول‌ها را ضعیف‌تر می‌شود که این عامل کاهش دهنده ضریب قوام می‌باشد

ضریب شاخص قوام محلول صمغ قدومه شهری در مقایسه با زانتان کم‌تر بود و در یک غلظت ثابت، صمغ زانتان از ضریب قوام بالاتری نسبت به صمغ قدومه شهری برخوردار است ( $P < 0.05$ ) (جدول ۳ و ۵). بیش‌ترین مقدار ضریب شاخص قوام مربوط به محلول صمغی زانتان تهیه



منطقه میان جنگل، استان فارس. پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، ۸(۳)، ۳۱۷-۳۲۶.

رضایی، ر.، خمیری، م. و اعلمی، م. (۱۳۹۰) بررسی خواص رئولوژیکی و حسی ماست حاوی غلظت‌های مختلف صمغ عربی و صمغ گوار. پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، جلد ۷، شماره ۱، ص ۴۲-۴۹.

سمائی، س. پ.، قربانی، م.، صادقی ماهونک، ع. و جعفری، س. م. (۱۳۹۳). بررسی تاثیر سرعت چرخشی، غلظت و دما بر رفتار جریان محلول صمغ تن هی زردآلو. فصلنامه علوم و فناوری‌های نوین غذایی، سال دوم، شماره ۵، صفحه ۵۷-۶۵.

سماواتی، و.، امام جمعه، ز. و حجتی، م. (۱۳۹۱). بررسی مدل‌های مختلف رئولوژیک در سوسپانسیون‌های حاوی صمغ کتیرا. پژوهش‌های صنایع غذایی، ۲۲(۱)، ۸۷-۹۵.

صالحی، ف. و کاشانی‌نژاد، م. (۱۳۹۲). بررسی اثرات روش و شرایط خشک‌کردن بر روی رئولوژی و بافت صمغ دانه ریحان. فصلنامه علوم و فناوری‌های نوین غذایی، سال اول، شماره ۲. صفحه ۳۹-۴۸.

عباسی، س. و رحیمی، س. (۱۳۸۴). بررسی تاثیر غلظت، دما، پ هاش و سرعت چرخشی روی رفتار جریان محلول صمغ کتیرای ایرانی. علوم و صنایع غذایی ایران، ۲۹-۴۲، (۴)۲.

فروغی نیا، س. و عباسی، س. (۱۳۸۵). بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی محلول ثعلب. مجموعه مقالات شانزدهمین کنگره ملی صنایع غذایی ایران، گرگان، ۲-۱۱.

Amin, G. H. (2005). Medicinal plants of Iran (1st ed.). (pp. 106) Tehran, Iran: Tehran University Publication.

Dickinson, E., 2003. Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems. *Food Hydrocolloids*, 17, 25-39.

García-Ochoa, F., Santos, V. E., Casas, J. A. & Gómez, E. (2000). Xanthan gum: production, recovery, and properties. *Biotechnology Advances*, 18, 549-579.

Gómez-Díaz, D. & Navaza, M. J. (2003). Rheology of aqueous solutions of food.

Gujal, H. S., Sharma, A. & Singh, N. (2002). Effect of hydrocolloids, storage temperature and duration on the consistency of tomato ketchup. *International Journal of Food Properties*, 5, 179-191.

بینگهام می‌توان گفت که هر دو مدل داری قابلیت برآزش داده‌های تجربی بالا هستند. به طور متوسط مقدار خطالی استاندارد و مقدار همبستگی برای دو مدل بینگهام و مدل قانون توان در برآزش داده‌های تجربی محلول صمغی قدومه شهری به ترتیب عبارتند از ۱/۵۹۹۵، ۰/۹۸۴۰ و ۲/۲۳۴۷، ۰/۹۷۹۵. بنابراین با توجه به بالا بودن مقدار همبستگی و مقدار خطالی استاندارد پائین در برآزش داده‌های تجربی در مدل بینگهام می‌توان گفت که این مدل نسبت به مدل قانون توان برای برآزش داده‌های تجربی محلول صمغی قدومه شهری مناسب‌تر است و این مدل می‌تواند پیش بینی کننده‌ی رفتار مناسب صمغ قدومه شهری در غلظت‌ها و دماهای مختلف باشد ( $P < 0.05$ ) (جدول ۳ و ۵) هر چند کوچکی و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که مدل قانون توان مدل مناسبی برای صمغ قدومه شهری است.

بررسی برآزش داده‌های تجربی محلول صمغی زانتان نشان داد که مدل قانون توان نسبت به مدل بینگام از برآزش مناسب تری برخوردار است و مدل قانون توان با مقدار خطالی استاندارد کمتری و مقدار همبستگی بالای داده‌های تجربی را برآزش می‌کند.

به طور متوسط مقدار مقدار خطالی استاندارد و مقدار همبستگی برای دو مدل قانون توان و مدل بینگهام در برآزش داده‌های تجربی محلول صمغی زانتان به ترتیب عبارتند از ۱/۲۵۰۳، ۰/۹۸۵۰ و ۲/۱۸۲۱، ۰/۹۶۸۴.

## نتیجه‌گیری

دانه قدومه شهری، یک دانه بومی ایران است که حاوی مقادیر زیادی هیدروکلوئید با خواص رئولوژیکی قابل توجه می‌باشد و قابلیت تولید انبوه آن در سطح تجاری وجود دارد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان اذعان کرد که مدل رئولوژیکی بینگهام و مدل قانون توان قابلیت برآزش مناسب داده‌های تجربی محلول صمغی قدومه شهری و زانتان را دارند.

## منابع

خالصی، ه.، علیزاده، م. و رضازادباری، م. (۱۳۹۱). بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و عملکردی صمغ زرد تراوشی از گیاه *Amygdalus scoparia Spach* در

Harry-Okuru, R. E., Carriere, C. J. & Wing, R. E. (1999). Rheology of modified Lesquerella gum. *J. Industrial Crops and Products.*, 19: 11-20.

*Hydrocolloids*, 23, 2062-2068.

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*

Koocheki, A., Taherian, A. R., Razavi, S. M. A. & Bostan, A. (2009). Response surface methodology for optimization of extraction yield, viscosity, hue and emulsion stability of mucilage extracted from *Leididium perfoliatum* seeds, *Food Hydrocolloids*, 23, 2369-2379.

Li, X., Fang, Y., AlAssaf, S., Phillips, G O., Nishinari, F. & Zhang, H. (2009). Rheological study of gum Arabic solution: Interpretation based on molecular self-association. *Journal Food Hydrocolloids*, 23, 2394-2402.

Mitschka, P. (1982). Simple conversion of brookfield R.V.T. readings into viscosity functions. *J. Rheol. Acta.*, 21:

Naji, S., Razavi, S. M. A. & Karazhiyan, H. (2012). Effect of thermal treatments on functional properties of cress seed (*Lepidium sativum*) and xanthan gums: A comparative study. *J. Food Hydrocolloids.*, 28, 75-81.

Qian, H. F., Cui, S. W., Wang, Q., Wang, C. & Zhou, H. M. (2011). Fractionation and physicochemical characterization of peach

gum polysaccharides. *J. Food Hydrocolloids*, 25, 1285-1290.

Rao, M. A. & Keney, J. F. (1975). Flow properties of selected food gums. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 8, 142-148.

Renard, A. C. (1996). Ultra-fresh yoghurt or dessert. *Reveu Laitiere Francaise*, 555, 12-14.

Rolled, B., 1995: Stabilizers for dairy desserts: Some interesting interactions. *Revue-Laitiere- Francaise*, 555: 22-23.

Song, K. W., Kim, Y. S. & Chang, G. S. (2006). Rheology of concentrated xanthan gum solutions: steady shear flow behavior. *Fiber. Polym.*, 7(2), 129-138.

Steffe, J. F. (1996). *Rheological Methods in Food Process Engineering*. 2nd ed. Michigan: Freeman Press.

Sworn, G. (2000). Xanthan Gum. In: G.O. Phillips, & P. A. Williams (Eds.), *Handbook of Hydrocolloids*. (pp. 103-115). Cambridge: Wood head Publishing.

Tada, T., Matsumoto, T. & Masuda, T. (1998). Structure of molecular association of curdlan at dilute regime in alkaline aqueous systems. *Chemical Physics*, 228, 157-166.

Williams, P. A. & Phillips, G. O. (2000). Introduction to food hydrocolloids. In: G.O. Phillips, & P. A. Williams (Eds.), *Handbook of Hydrocolloids*. Cambridge: Wood head Publishing.