

## بررسی تغییرات رئولوژیکی صمغ قدومه شهری به‌عنوان تابعی از غلظت و فرایند انجماد و مقایسه آن با صمغ تجاری زانتان

هادی باقری<sup>۱\*</sup>، زینب گرایلی<sup>۲</sup>، مهدی کاشانی نژاد<sup>۳</sup>

1. دانشجوی دکتری، مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
2. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
3. دانشیار، گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

(تاریخ دریافت: 94/8/10، تاریخ پذیرش: 94/10/1)

### چکیده

در این مطالعه اثر فرایند انجماد ( $-18^{\circ}\text{C}$  به مدت 24 ساعت) بر خصوصیات رئولوژیکی صمغ قدومه شهری به‌عنوان یک صمغ بومی در غلظت‌های مختلف 0/5، 1، 1/5 و 2 درصد مورد مطالعه و در نهایت با صمغ تجاری زانتان مورد مقایسه قرار گرفت. برای بررسی اثر فرایند و غلظت‌های مختلف بر خصوصیات رئولوژیکی از ویسکومتر بروکفیلد و برای مدل‌سازی رفتار صمغ‌ها از مدل قانون توان و هرشل بالکی استفاده شد. انجماد یکی از رایج‌ترین راه‌ها برای افزایش زمان ماندگاری محصولات غذایی به‌شمار می‌آید، هر چند کیفیت نهایی مواد غذایی ذخیره شده در دمای پایین کاهش می‌یابد که به‌طور معمول، این کاهش کیفیت مربوط به جدا شدن آب و از بین رفتن بافت و رئولوژی در طول نگهداری مواد غذایی در دمای پایین یا انجماد است. هیدروکلوئیدها با کاهش آب‌اندازی در طول ذخیره‌سازی در دمای پایین می‌توانند این مشکلات را حل و بافت و رئولوژی ماده غذایی را حفظ کنند. اگرچه تمامی هیدروکلوئیدها در شرایط حرارتی مختلف رفتار مشابهی ندارند، اما به‌منظور حفظ و بهبود بافت و رئولوژی محصولات غذایی، هیدروکلوئیدها به‌طور گسترده به‌عنوان عوامل ژل‌دهنده در سیستم‌های غذایی استفاده می‌شوند. نتایج نشان داد که ویسکوزیته ظاهری صمغ قدومه شهری و زانتان با افزایش غلظت افزایش یافت و اثر فرایند انجماد نشان‌دهنده افزایش ویسکوزیته ظاهری صمغ قدومه شهری و زانتان بود. بررسی مدل‌های رئولوژیکی نشان داد که در غلظت‌های پایین به‌خصوص در محلول صمغی قدومه شهری فرایند انجماد منجر به افزایش ضریب قوام بافت گردد، این در حالی است که در غلظت‌های بالا اثر انجماد منجر به کاهش ضریب قوام بافت شد. با توجه به بالا بودن مقدار همبستگی و مقدار خطای استاندارد پایین در برازش داده‌های تجربی در مدل هرشل بالکی، این مدل برای مدل‌سازی داده‌ها مناسب‌تر است.

واژه‌های کلیدی: صمغ قدومه شهری، انجماد، خصوصیات رئولوژیکی.

## 1- مقدمه

یکی از این ترکیبات پلی‌ساکاریدی، صمغ دانه قدومه شهری می‌باشد که می‌توان آن را در فرمولاسیون‌های غذایی استفاده نمود [4-6]. صمغ زانتان، یک پلی‌ساکارید خارج سلولی است که توسط میکروارگانیسم زانتوموناس کمپستریس تولید می‌شود. این صمغ، دارای خاصیت روان شدن در اثر برش است و یکی از مهم‌ترین خصوصیات صمغ زانتان پایداری ویسکوزیته آن در شرایط مختلف می‌باشد. این صمغ به‌طور گسترده در pH دامنه وسیعی از دما و موادی غذایی منجمد و محصولات اتوکلاوگذاری شده استفاده می‌شود [7]. امروزه دانش رئولوژی کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف صنایع غذایی اعم از ارزیابی فرایند، مقبولیت فرآورده و خرید و فروش آن دارد [8]. هم‌چنین بررسی خصوصیات رئولوژیکی و گرانیروی مواد قبل از طراحی فرایندهایی شامل انتقال سیالات، پمپ‌ها، استخراج، فیلتراسیون، پاستوریزاسیون، تبخیر و خشک‌کردن ضروری است. از این رو دانش رئولوژی یک عامل مهم برای ارزیابی کیفیت در اغلب مواد به‌ویژه صمغ قدومه شهری بوده و بر رفتار آن موثر است [9].

محصولات غذایی طی فرایندهای تولید و انبارداری در معرض فرایندهای حرارتی مختلف نظیر پاستوریزاسیون، استریلیزاسیون، سرد کردن و انجماد قرار می‌گیرند که با تغییرات دمایی بسیاری همراه است. برای ایجاد پایداری و ویسکوزیته ثابت و جلوگیری از آب‌اندازی محصولات غذایی طی این عملیات از هیدروکلوئیدها استفاده می‌شود [10]. از سوی دیگر، دما یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر خصوصیات عملکردی هیدروکلوئیدها نیز می‌باشد. از این رو، بررسی پایداری خصوصیات رئولوژیکی هیدروکلوئیدها در دما و فرایندهای مختلف بسیار حائز اهمیت است تا قابلیت استفاده از آن‌ها در فرمولاسیون‌های غذایی تعیین گردد. در این پژوهش، خصوصیات رئولوژیکی صمغ قدومه شهری به‌عنوان یکی از صمغ‌های بومی ایران و زانتان به‌عنوان یک صمغ تجاری تحت تیمار انجماد در غلظت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

## 2- مواد و روش‌ها

دانه‌های قدومه شهری از بازار مشهد تهیه و پس از حذف آلودگی‌های ثانویه، استخراج صمغ به روش کوچکی و همکاران

هیدروکلوئیدها به مجموعه‌ای از پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌ها اطلاق می‌گردد که با حل یا پخش شدن در آب، ویسکوزیته را افزایش می‌دهند و امروزه به‌طور گسترده در صنایع مختلف با عملکردهای گوناگون به کار می‌روند [1]. کاربرد و اهمیت هیدروکلوئیدها به خواص عملکردی آن‌ها بستگی دارد که این خواص در مواد غذایی تحت تاثیر ساختمان ملکولی هیدروکلوئید، غلظت هیدروکلوئید، واکنش هیدروکلوئید با سایر ترکیبات ماده غذایی و شرایط فراوری می‌باشد [2-3]. هیدروکلوئیدها در انواع مختلف موجود می‌باشند، اما از آن‌جا که تقاضای مصرف‌کنندگان با گذشت زمان تغییر و درک آن‌ها از خصوصیات عملکردی صمغ‌ها در صنعت افزایش یافته است، در نتیجه افزایش تقاضا برای هیدروکلوئیدها با خواص عملکردی ویژه منجر به اهمیت یافتن منابع جدید صمغ‌ها با خواص مناسب گردیده که در میان این منابع، پلی‌ساکاریدهای گیاهی با توجه به دسترسی آسان، افزایش مصرف‌کنندگان مشتقات گیاهی و قیمت مناسب اهمیت فراوانی پیدا کرده است. قدومه شهری گیاهی است علفی، یک یا چند ساله که ارتفاع آن تا 60 سانتی‌متر می‌رسد. میوه گیاه به شکل بیضی مسطح و به قطر حدود 4 میلی‌متر است که داخل آن‌ها دو عدد دانه بیضی‌شکل قهوه‌ای رنگ با پوششی از موسیلاژ (لعاب) وجود دارد. این دانه‌ها که قسمت مورد استفاده گیاه می‌باشند، در ایران به نام قدومه شهری مشهورند. این گیاه بومی اروپا و آسیا است، ولی در نقاط مختلف جهان رویش دارد و در بیش‌تر نقاط جنوب و مرکز ایران نیز می‌روید. قدومه شهری با نام علمی *Lepidium perfoliatum* شناخته می‌شود و از خانواده شب‌بویمان 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. 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.

**2-3- اندازه‌گیری ویسکوزیته ظاهری**

ویسکوزیته ظاهری نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ویسکومتر

چرخشی بروکفیلد (Brookfield, model RVDV-II+ pro, USA) با اسپیندل شماره 05 اندازه‌گیری شد. ویسکوزیته ظاهری هر یک از نمونه‌ها در دمای 25 درجه سانتی‌گراد و هجده سرعت چرخشی، از 5 تا 200 دور در دقیقه، بر حسب mPa.s اندازه‌گیری شد. این ویسکومتر در محل قرارگیری نمونه و اسپیندل، مجهز به یک محفظه استوانه‌ای دو جداره می‌باشد که توسط یک دستگاه حمام آب و سیرکولاتور مربوطه، دمای نمونه را تنظیم می‌کند. لذا در حین اندازه‌گیری گرانیروی، دمای نمونه ثابت باقی می‌ماند.

**2-4- محاسبه تنش برشی و سرعت برشی**

با توجه به این که 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 [12]. برای محاسبه این پارامترها، قدم اول پیدا کردن رفتار جریان (n) می‌باشد که از معادله زیر به دست می‌آید:

$$(1)$$

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

یا به صورت لگاریتمی

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

قدم بعدی محاسبه تنش برشی توسط رابطه زیر می‌باشد.

$$(2)$$

$$\tau = k\sigma(C)(M)$$

که مقدار  $k\sigma$  طبق جدول 1 با شماره اسپیندل تغییر می‌یابد و مقدار C طبق جدول 2 که به نوع ویسکومتر وابسته است. در این رابطه، M و N به ترتیب نشان دهنده درصد گشتاور و سرعت چرخشی می‌باشد.

قدم سوم محاسبه سرعت برشی متوسط است که توسط رابطه (3)

(2009) انجام گرفت. صمغ زانتان نیز از شرکت سیگما تهیه گردید [6].

**2-1- تولید پودر صمغ قدومه شهری**

به منظور تولید پودر صمغ قدومه شهری، ابتدا دانه‌های قدومه شهری با استفاده از آب با دمای 48 درجه سانتی‌گراد، pH=8 و نسبت آب به دانه 30 به 1 در طی دو ساعت خیس و سپس توسط دستگاه آبمیوه‌گیر سه کاره پارس خزر، مدل JBG610P/610SP، استخراج و در مرحله آخر توسط آون هوای داغ مدل SO-2005، با دمای 55 درجه سانتی‌گراد خشک گردید. به منظور جداسازی ناخالصی‌ها و پودرهای درشت از الک با مش 100 استفاده شد [5].

**2-2- آماده سازی نمونه‌ها**

محلول‌های صمغ دانه قدومه شهری و زانتان، توسط پراکنده کردن پودر صمغ وزن شده به کمک ترازوی (Sartoris, TE313S pro, Germany) با دقت بالا در آب مقطر (دمای محیط) در غلظت‌های مورد نظر تهیه شد. برای جلوگیری از ایجاد کلوخه حین افزودن پودر صمغ‌ها به آب مقطر، پودر صمغ‌ها به صورت تدریجی و یکنواخت به آب افزوده شدند. به این منظور از دستگاه هم‌زن مغناطیسی مدل 3001k (Heidolph, Germany) استفاده گردید و مخلوط‌ها تا به دست آمدن محلولی یکنواخت با سرعت متوسط دستگاه هم‌زنه شدند. از آن‌جا که گرانیروی محلول‌های هیدرولوئیدی پس از یک شب ماندن به مقدار بیشینه خود می‌رسند، بنابراین در این پژوهش به منظور حداکثر جذب آب به وسیله صمغ تمامی نمونه‌ها به صورت سرپوشیده و پس از یک شب نگهداری در دمای اتاق مورد آزمایش قرار گرفتند [11]. به منظور بررسی اثر تیمار انجماد، ابتدا یک بار خصوصیات رئولوژیکی صمغ‌ها اندازه‌گیری شد و دوباره صمغ‌های مورد نظر تهیه و بعد از اعمال تیمار انجماد (18- °C) به مدت 24 ساعت، به منظور خروج از انجماد کامل، نمونه‌ها به مدت 10 ساعت در دمای محیط (25 °C) قرار گرفتند و سپس خصوصیات رئولوژیکی صمغ‌های مورد نظر اندازه‌گیری شد.

جدول (1) مقادیر  $k\sigma$  برای اسپیندل‌های برروکفیلد

$K\sigma$ (Pa)	شماره اسپیندل	$K\sigma$ (Pa)	شماره اسپیندل
1/05	5	0/035	1
2/35	6	0/0119	2
8/40	7	0/279	3
		0/539	4

جدول شماره (2) مقادیر C برای ویسکومترهای برروکفیلد

C (بدون بعد)	مدل ویسکومتر
0/5	1/2RV
1	RV
2	HAT
8	HBT

## 2-5- تجزیه و تحلیل آماری

قابل محاسبه است.

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 5 درصد مقایسه شدند. برای رسم نمودارها از برنامه نرم‌افزاری اکسل استفاده شد. کلیه آزمایشات در سه تکرار انجام شد.

$$\gamma_a = K_y(N)$$

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

$$(3)$$

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

## 3- نتایج و بحث

براساس بررسی‌های اولیه انجام شده، مدل‌های قانون توان (معادله 1) و هرشل بالکلی (معادله 2) جهت بررسی خصوصیات رئولوژیکی صمغ دانه قدومه شهری مناسب تشخیص داده شدند و از این دو مدل برای بررسی خصوصیات رئولوژیکی استفاده گردید. به منظور مدل کردن داده‌های تجربی تنش برشی در برابر سرعت برشی و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌های رئولوژیکی از نرم افزار سیگما پلات نسخه 12 استفاده شد [10].

### 3-1- اثر غلظت و فرایند انجماد بر خصوصیات رئولوژیکی (ویسکوزیته ظاهری)

همان‌طور که در شکل 1 و 2 ملاحظه می‌شود، در تمامی نمونه‌ها، با افزایش سرعت برشی، ویسکوزیته ظاهری تمام نمونه‌ها کاهش یافت. کاهش ویسکوزیته با افزایش سرعت برشی، نشان دهنده خصوصیت رفتار شل‌شونده با زمان (سودوپلاستیک) صمغ دانه قدومه شهری و زانتان در غلظت‌های مختلف می‌باشد. همان‌طور که در شکل 1 و 2 دیده می‌شود، این رفتار برای بیش‌تر محلول‌های هیدروکلوئیدی قابل مشاهده است که ناشی از ساختار پلیمری و وزن مولکولی بالای آن‌ها است. کاهش ویسکوزیته ظاهری در آغاز افزایش

$$(5) \text{ مدل قانون توان}$$

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

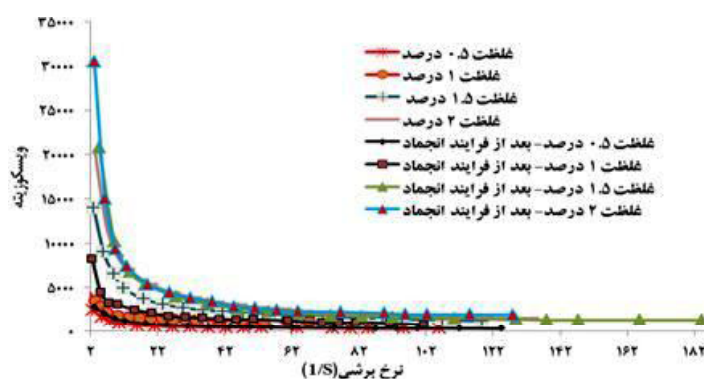
$$(6) \text{ مدل هرشل بالکلی}$$

$$\tau = k \gamma^n + \tau_0$$

سودوپلاستیک می‌باشد [6]. نتایج محققان مختلف نشان می‌دهد که رفتار اکثر صمغ‌ها از نوع غیرنیوتنی بوده و بیش‌تر جزء سیالات رقیق‌شونده با برش محسوب می‌شوند. از جمله این گزارشات می‌توان به رفتار شبه پلاستیکی صمغ تنه زردآلو، رفتار شبه پلاستیکی صمغ تنه درخت هلو و صمغ دانه ریحان اشاره کرد [16-18]. به‌عنوان 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 محدوده سرعت برشی اعمال شده، هر سه صمغ رفتار شبه پلاستیکی از خود نشان دادند [19]. رضایی و همکاران (1390) 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 تا ماست منجمد رفتار سودوپلاستیک از خود نشان دهد [20].

تغییرات غلظت از جمله پارامترهایی است که در میزان ویسکوزیته ظاهری تاثیرگذار است. همان‌طور که در شکل 1 و 2 نشان داده شده است، با افزایش غلظت، مقدار گرانیروی ظاهری افزوده شد و بررسی اثر انجماد نشان دهنده افزایش گرانیروی ظاهری در یک سرعت برشی ثابت است. در یک سرعت برشی ثابت، هر چه غلظت افزایش می‌یابد، پیرو آن گرانیروی ظاهری نیز افزایش پیدا می‌کند که افزایش گرانیروی ظاهری در سرعت‌های برشی پایین بیش از سرعت‌های برشی بالا است ولی در هر دو حالت این وابستگی از نوع مستقیم است.

سرعت برشی از شدت بالاتری برخوردار است، ولی در ادامه از شدت کاهش ویسکوزیته ظاهری کاسته می‌شود. علت کاهش شدید ویسکوزیته ظاهری در ابتدا به دلیل از بین رفتن پیوندهای بین مولکولی می‌باشد. این در حالی است که در ادامه پیوند ملکول‌ها شکسته شده و در نتیجه کاهش ویسکوزیته ظاهری به آرامی اتفاق می‌افتد [13]. کاهش ویسکوزیته ظاهری در فرایندهایی با تنش برشی بالا، همانند پمپ کردن و پر کردن، منجر به سهولت فرایند می‌گردد و در هنگام مصرف با افزایش ویسکوزیته ظاهری محصول، احساس دهانی مطلوبی ایجاد می‌کند [14]. البته این رفتار زمانی اهمیت دارد که شاخص رفتار جریان کم‌تر از 0/6 باشد که برای هر دو صمغ در بیش‌تر شرایط این مقدار کم‌تر از 0/6 بود (جدول 3). این خصوصیات در فرمولاسیون امولسیون‌های روغن در آب اهمیت فراوانی دارد و 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 [15]. محلول‌های صمغ زانتان رفتار ضعیف شونده با برش قوی‌تری نسبت به محلول‌های صمغ دانه 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 [15]. کوچکی و همکاران (2008) نیز به رفتار سودوپلاستیک صمغ قدومه شهری اشاره کردند و نشان دادند که رفتار این صمغ در همه تیمارهای اعمال شده از نوع



شکل (1) اثر سرعت برشی بر ویسکوزیته ظاهری قدومه شهری در غلظت‌های مختلف، قبل و بعد از فرایند انجماد (میلی پاسکال، ثانیه)

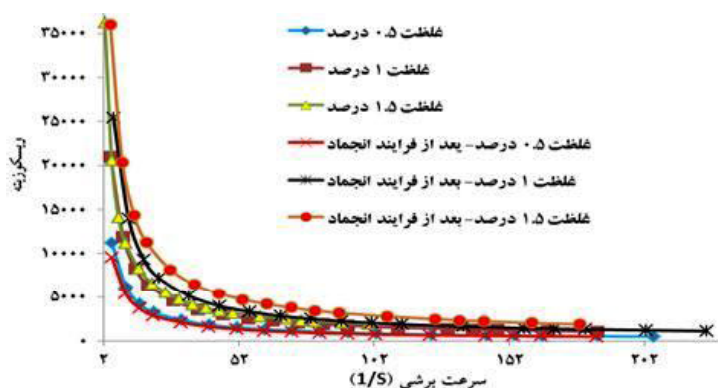
پارامترهای برازش شده مدل قانون توان برای محلول صمغ دانه قدومه شهری و زانتان به نمایش درآمده است. ضریب شاخص قوام یا ضریب پایداری<sup>1</sup> (K) که نشانگر ویسکوزیته محلول صمغ است، برای صمغ قدومه شهری در غلظت‌های مختلف قبل از فرایند تیمار انجماد در محدوده 1/3638 تا 16/2783 بود و بعد از اعمال تیمار انجماد این محدوده تغییر کرده و مقدار آن بین 2/4578 تا 14/7713 به دست آمد.

همان‌طور که در جدول 3 دیده می‌شود با افزایش غلظت صمغ قدومه شهری، ضریب قوام افزایش یافت، اما نکته قابل توجه این است که در غلظت‌های پایین صمغ قدومه شهری، اثر فرایند انجماد منجر به افزایش ضریب قوام شد، در حالی که در غلظت بالا یعنی در غلظت 2 درصد، اثر فرایند انجماد منجر به کاهش ضریب قوام شد. پژوهشگران معتقدند افزایش غلظت در محلول صمغی، میزان ظرفیت اتصال آب را افزایش داده و این مساله با کاهش جریان‌پذیری منجر به افزایش مقاومت نمونه در برابر جریان و یا همان گرانروی ظاهری می‌شود. بنابراین میزان ضریب شاخص قوام افزایش یافت [23-24]. افزایش تمایل پلیمرها به اتصالات بین مولکولی طی انجماد منجر به افزایش شاخص قوام در غلظت‌های پایین شد در حالی که در غلظت بالا، احتمالاً به دلیل تخریب شبکه یا ساختار محلول صمغ، انجماد منجر به کاهش ضریب شاخص قوام شد. محققانی هم‌چون ویلیامز و همکاران (2009) در یافته‌های خود به افزایش ضریب قوام بعد از اعمال فرایند انجماد اشاره

در تاکید نتایج به دست آمده می‌توان به مطالعات سماواتی و همکاران (1391) اشاره کرد. این پژوهشگران نشان دادند که با افزایش میزان صمغ کتیرا از غلظت 0/5 به 1 درصد گرانروی افزایش می‌یابد [21]. پژوهشگران دیگری هم‌چون فروغی‌نیا و عباسی (1385) 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 [22]. بررسی اثر انجماد بر ویسکوزیته ظاهری در یک سرعت برشی ثابت نشان‌دهنده افزایش ویسکوزیته ظاهری بود. این تغییر و افزایش ویسکوزیته در صمغ زانتان نسبت به صمغ قدومه شهری مشهودتر و واضح‌تر بود. افزایش ویسکوزیته صمغ دانه قدومه شهری و صمغ زانتان در اثر فرایند انجماد به خصوص در غلظت‌های پایین مربوط به افزایش تمایل پلیمرهای این صمغ‌ها به اتصالات بین مولکولی طی انجماد است. غلظت پلیمرها با تبدیل شدن آب به یخ افزایش می‌یابد که منجر به افزایش تجمعات زنجیره‌ها می‌گردد که پس از انجماد، پایدار باقی می‌مانند و در نهایت ویسکوزیته محلول‌ها را پس از انجماد افزایش می‌دهند [10].

### 3-2- اثر غلظت و فرایند انجماد بر مدل‌سازی رفتار رئولوژیکی

پارامترهای مدل رئولوژیکی برای محلول‌های صمغ دانه قدومه شهری و صمغ زانتان در غلظت‌های مختلف پس از اعمال تیمار انجماد در جدول 3 و 4 ارائه شده است. در جدول 3



شکل (2) اثر سرعت برشی بر ویسکوزیته ظاهری صمغ زانتان در غلظت‌های مختلف قبل و بعد از فرایند انجماد (میلی‌پاسکال، ثانیه)

کردند و عنوان کردند که ویسکوزیته مخلوط صمغ کردلان- لوبیای اقاویا و کردلان-کاپاکاراگینان پس اعمال تیمار انجماد افزایش یافت [25]، اگرچه محققان دیگری گزارش کردند که فرایند انجماد تاثیر معنی داری بر ویسکوزیته برخی محلول های هیدروکلوئیدی نظیر کربوکسی متیل سلولز [26] کمپلکس های کردلان با صمغ زانتان و صمغ گوار [25] و صمغ دانه ریحان [27] نداشته است.

ضریب شاخص قوام محلول صمغ قدومه شهری در مقایسه با زانتان کم تر بود و در یک غلظت ثابت، صمغ زانتان از ضریب قوام بالاتری نسبت به صمغ قدومه شهری برخوردار است ( $P < 0/05$ ) (جدول 3). بیشترین مقدار ضریب شاخص قوام مربوط به محلول صمغی زانتان تهیه شده از 1/5 درصد و کمترین ضریب شاخص قوام محلول مربوط به نمونه محلول صمغی قدومه شهری با غلظت 0/5 درصد است، در ضمن به علت ویسکوزیته بالای غلظت 2 درصد صمغ زانتان و بالا رفتن گشتاور مورد نیاز، ویسکومتر بروکفیلد قادر به اندازه گیری دقیق این غلظت از محلول صمغی نبود و بنابراین داده های این غلظت از محلول صمغی زانتان بیان نشد. در محلول صمغی زانتان نیر مشابه صمغ قدومه شهری با افزایش غلظت، ضریب شاخص قوام افزایش یافت، اما اثر فرایند انجماد کمی متفاوت با محلول صمغی قدومه شهری بود. در محلول صمغی زانتان، در غلظت 0/5 درصد، اثر انجماد معنی دار نبود، هر چند از نظر عددی بعد از انجماد مقدار شاخص قوام کم تر بود و در غلظت 1 درصد، انجماد منجر به افزایش ضریب شاخص قوام شد و در غلظت 1/5، اثر انجماد منجر به کاهش شاخص قوام محلول صمغی زانتان شد. همان طور که در شکل 1 ملاحظه شد، صمغ دانه قدومه شهری دارای رفتار شل شونده با زمان است و شاخص رفتار جریان گزارش شده در این جدول نیز کم تر از 1 می باشد، که معرف سیال شل شونده با برش می باشد. مقدار عددی شاخص رفتار جریان<sup>1</sup> یا شاخص قانون توان ( $n$ ) در این پژوهش از 0/4947 تا 0/3175 تغییر کرد که ابتدا تا غلظت 1 درصد، شاخص رفتار جریان افزایش و با افزایش غلظت تا 2 درصد، شاخص رفتار جریان کاهش یافت، بنابراین به راحتی مشخص شد که سیال از نوع غیرنیوتنی می باشد و هر چه قدر مقدار  $n$  بزرگ تر یا کوچک تر از یک باشد، نشان دهنده انحراف

از رفتار نیوتنی است ( $P < 0/05$ ) (جدول 3). از رفتار نیوتنی است ( $P < 0/05$ ) (جدول 3). ارتباط جالبی بین اثر فرایند بر ضریب شاخص قوام و شاخص رفتار جریان وجود دارد. در غلظت های پایین اثر فرایند انجماد برعکس شاخص ضریب قوام، منجر به کاهش ضریب رفتار جریان شد و در غلظت های بالا یعنی در غلظت 2 درصد، ضریب شاخص رفتار جریان در اثر فرایند انجماد افزایش یافت. در صمغ زانتان ضریب شاخص رفتار جریان بین 0/1803 تا 0/2234 بود که با افزایش غلظت صمغ افزایش یافت. در این محلول صمغی اثر فرایند انجماد در غلظت 0/5 بر شاخص رفتار جریان معنی دار نبود و در غلظت های بالا یعنی 1 و 1/5 درصد، اثر فرایند منجر به کاهش شاخص رفتار جریان شد ( $P < 0/05$ ) (جدول 3). جدول 4 نشان دهنده برآزش داده های تجربی با مدل هرشل بالکی می باشد. همان طور که ملاحظه می شود، در تمامی نمونه های صمغ های تنش تسلیم مشاهده می شود. مقدار تنش تسلیم برای صمغ قدومه شهری بین 2/8130 تا 16/1549 می باشد که با افزایش غلظت مقدار تنش تسلیم افزایش می یابد. مقادیر تنش تسلیم صمغ زانتان در تمامی غلظت ها بیش تر از صمغ دانه قدومه شهری بود. وجود تنش تسلیم برای محلول صمغ های مذکور ممکن است به دلیل تعداد زیاد باندهای هیدروژنی در ساختار ماریپیج آن ها باشد که منجر به ایجاد کنفورماسیون پایدار در آن ها گشته که در مقابل جریان مقاومت می کنند [28]. وجود تنش تسلیم در محلول های صمغ زمانی که به عنوان اتصال دهنده برای حفظ ترکیبات فرمولاسیون در کنار هم استفاده می شود بسیار حائز اهمیت است [29].

در غلظت های پایین محلول صمغی قدومه شهری، اثر فرایند انجماد منجر به افزایش تنش تسلیم، شاخص قوام و کاهش ضریب جریان شد در حالی که در غلظت بالا یعنی در غلظت 2 درصد اثر فرایند انجماد منجر به کاهش قوام و افزایش تنش تسلیم و ضریب جریان شد. افزایش میزان تنش تسلیم بعد از اعمال تیمار انجماد ممکن است مربوط به افزایش باندهای هیدروژنی در صمغ دانه قدومه شهری و صمغ زانتان طی انجماد است ( $P < 0/05$ ) (جدول 4).

ضریب شاخص قوام ( $K$ ) بین 0/2329 تا 6/0902 می باشد و با افزایش غلظت، ضریب شاخص قوام افزایش یافت. با توجه

انجماد مناسب تر است و این مدل می‌تواند پیش‌بینی‌کننده رفتار مناسب صمغ قدومه شهری و زانتان در غلظت‌ها و تیمارهای انجماد باشد ( $P < 0/05$ ) (جدول 3 و 4). کوچکی و همکاران (2009) نشان دادند که مدل قانون توان مدل مناسبی برای صمغ قدومه شهری است [6].

#### 4- نتیجه‌گیری

نتایج فوق، بیانگر این مطلب است که خصوصیات رئولوژیکی مستقل از زمان صمغ دانه قدومه شهری و صمغ زانتان پایداری بالایی طی انجماد دارند و انجماد نه تنها تاثیر تخریبی بر باندهای بین مولکولی ندارد، بلکه شبکه‌های قوی‌تری را ایجاد می‌کنند که از رشد کریستال‌های یخ طی انجماد جلوگیری می‌کنند. این موضوع می‌تواند زمینه جالبی برای انجام تحقیق درباره کاربرد صمغ دانه قدومه شهری در محصولات منجمد برای جلوگیری از رشد کریستال‌های یخ و پایداری محصول باشد. با توجه به قیمت بالای صمغ‌های تجاری، تولید و بررسی صمغ‌های بومی داری اهمیت بالایی است. دانه قدومه شهری، یک دانه بومی ایران حاوی مقادیر زیادی هیدروکلوئید با خواص رئولوژیکی قابل توجه می‌باشد و قابلیت تولید انبوه آن در سطح تجاری وجود دارد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان اذعان کرد که مدل رئولوژیکی هرشل بالکلی جهت بررسی خصوصیات رئولوژیکی این صمغ نسبت به مدل قانون توان مناسب‌تر است.

به جدول 4 می‌توان گفت که با افزایش غلظت صمغ قدومه شهری مقدار شاخص جریان کاهش یافته و از رفتار پلاستیک بینگهام فاصله می‌گیرد. در واقع این شاخص نشان‌دهنده میزان غیرخطی بودن منحنی تنش برشی-سرعت برشی می‌باشد ( $P < 0/05$ ) (جدول 4). بررسی مدل هرشل بالکی بر داده‌های تجربی صمغ زانتان نشان داد که در غلظت 0/5 درصد، اثر فرایند انجماد، تاثیر معنی‌داری بر پارامترهای مدل هرشل بالکی نداشت، هر چند از نظر عددی مقدار تنش تسلیم کاهش یافته بود ولی از نظر آماری معنی‌دار نبود ( $P < 0/05$ ) (جدول 4). در غلظت 1 درصد محلول صمغی زانتان، اثر فرایند انجماد منجر به افزایش ضریب قوام، میزان تنش تسلیم و کاهش ضریب جریان شد. در غلظت 1/5 درصد محلول صمغی زانتان، اثر فرایند انجماد، منجر به کاهش ضریب قوام و شاخص جریان شد ولی به طور معنی‌داری میزان تنش تسلیم افزایش یافت ( $P < 0/05$ ) (جدول 4). با توجه به ضریب همبستگی و مقدار خطای استاندارد به دست آمده (SE) از برازش مدل‌های قانون توان و هرشل بالکی می‌توان گفت که هر دو مدل داری قابلیت برازش داده‌های تجربی بالا هستند. با توجه به بالا بودن مقدار همبستگی و مقدار خطای استاندارد پایین در برازش داده‌های تجربی در مدل هرشل بالکی می‌توان گفت که مدل هرشل بالکی نسبت به مدل قانون توان برای برازش داده‌های تجربی محلول صمغی قدومه شهری و زانتان در اثر فرایند

جدول (3) پارامترهای به دست آمده از برازش داده‌های مدل قانون توان برای محلول صمغ قدومه شهری و زانتان

کد نمونه	قبل از فرایند انجماد				بعد از فرایند انجماد			
	$k_p$ (Pa s <sup>n</sup> )	$n_p$	R	SE	$k_p$ (Pa s <sup>n</sup> )	$n_p$	R	SE
G-0/5	1/3638 <sub>d</sub> <sup>b</sup>	0/4947 <sub>b</sub> <sup>a</sup>	0/9832	0/6524	2/4578 <sub>d</sub> <sup>a</sup>	0/3589 <sub>b</sub> <sup>b</sup>	0/9908	0/4274
G-1	4/0702 <sub>b</sub> <sup>b</sup>	0/6465 <sub>a</sub> <sup>a</sup>	0/9858	3/1687	5/9644 <sub>a</sub> <sup>a</sup>	0/4370 <sub>b</sub> <sup>b</sup>	0/9920	1/4450
G-1/5	10/3630 <sub>b</sub> <sup>b</sup>	0/3774 <sub>c</sub> <sup>a</sup>	0/9919	0/8761	15/7192 <sub>a</sub> <sup>a</sup>	0/2196 <sub>c</sub> <sup>b</sup>	0/9709	2/0294
G-2	16/2783 <sub>a</sub> <sup>a</sup>	0/3175 <sub>d</sub> <sup>b</sup>	0/9912	2/1908	14/7713 <sub>b</sub> <sup>b</sup>	0/3608 <sub>b</sub> <sup>a</sup>	0/9789	3/9707
X-0/5	9/8666 <sub>c</sub> <sup>a</sup>	0/1803 <sub>c</sub> <sup>a</sup>	0/9851	0/6599	9/7902 <sub>c</sub> <sup>a</sup>	0/1805 <sub>c</sub> <sup>a</sup>	0/9890	0/5039
X-1	18/1606 <sub>b</sub> <sup>b</sup>	0/2089 <sub>b</sub> <sup>a</sup>	0/9889	1/3227	23/2683 <sub>b</sub> <sup>a</sup>	0/1632 <sub>b</sub> <sup>b</sup>	0/9758	1/7107
X-1/5	35/2480 <sub>a</sub> <sup>a</sup>	0/2234 <sub>a</sub> <sup>a</sup>	0/9958	1/5515	32/3899 <sub>b</sub> <sup>b</sup>	0/2128 <sub>b</sub> <sup>b</sup>	0/9972	1/2210
X-2	غیرقابل اندازه‌گیری با ویسکومتر بروکفیلد به علت خطای گشتاور							

حروف مشابه نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌داری در سطح 5 درصد است. توان: مقایسه میانگین در هر سطح، (اثر فرایند انجماد در یک نمونه ثابت از نظر غلظت) اندیس مقایسه میانگین در هر ستون، (اثر غلظت‌های مختلف در هر محلول صمغی به طور جداگانه)



جدول (4) پارامترهای به دست آمده از برازش داده‌های مدل هرشل بالکی برای محلول صمغ قدومه شهری

بعد از فرایند انجماد					قبل از فرایند انجماد					کد نمونه
SE	R	$n_p$	$\tau_{0H}$ (Pa)	$k_p$ (Pa s <sup>n</sup> )	SE	R	$n_p$	$\tau_{0H}$ (Pa)	$k_p$ (Pa s <sup>n</sup> )	
0/2767	0/9964	0/5913 <sub>b</sub>	3/2740 <sub>d</sub>	0/6384 <sub>d</sub>	0/4241	0/9934	0/8086 <sub>a</sub>	2/8130 <sub>d</sub>	0/2329 <sub>b</sub>	G-0/5
0/4919	0/9920	0/4433 <sub>c</sub>	6/3633 <sub>c</sub>	2/7495 <sub>c</sub>	0/8536	0/9986	0/6354 <sub>b</sub>	5/5656 <sub>c</sub>	1/3682 <sub>c</sub>	G-1
0/9737	0/9938	0/4176 <sub>d</sub>	11/8822 <sub>a</sub>	8/459 <sub>a</sub>	1/6030	0/9944	0/5255 <sub>a</sub>	10/4957 <sub>b</sub>	4/3598 <sub>b</sub>	G-1/5
0/6219	0/9914	0/7246 <sub>a</sub>	18/4577 <sub>a</sub>	5/9029 <sub>b</sub>	1/8702	0/9940	0/4757 <sub>d</sub>	16/1549 <sub>b</sub>	6/0902 <sub>a</sub>	G-2
0/2230	0/9980	0/4719 <sub>c</sub>	11/6383 <sub>a</sub>	1/1568 <sub>c</sub>	0/4101	0/9946	0/4740 <sub>b</sub>	11/9830 <sub>a</sub>	1/1676 <sub>c</sub>	X-0/5
0/5028	0/9981	0/4856 <sub>b</sub>	15/8677 <sub>b</sub>	8/9223 <sub>b</sub>	0/4487	0/9988	0/5169 <sub>a</sub>	13/1885 <sub>b</sub>	7/2050 <sub>b</sub>	X-1
0/3616	0/9998	0/3610 <sub>b</sub>	28/8377 <sub>a</sub>	10/836 <sub>b</sub>	0/7508	0/9991	0/3928 <sub>c</sub>	23/1498 <sub>b</sub>	11/5367 <sub>a</sub>	X-1/5
غیر قابل اندازه‌گیری با ویسکومتر بروکفیلد به علت خطای گشتاور										X-2

حروف مشابه نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌داری در سطح 5 درصد است. توان: مقایسه میانگین در هر سطر، (اثر فرایند انجماد در یک نمونه ثابت از نظر غلظت) اندیس مقایسه میانگین در هر ستون، (اثر غلظت‌های مختلف در هر محلول صمغی به‌طور جداگانه)

## منابع

- 379-389 (3)، ص
- [6] 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 *Leidium perfoliatum* seeds. *Food Hydrocolloids*, 23, 2369-2379.
- [7] Imeson, A.P. (2000). Handbook of hydrocolloids. Cambridge: Wood head publishing, pp 156-184.
- [8] Barbosa-Cánovas, G.V., Kokini, J.L., Ma, L., Ibram, A. (1996). The rheology of semiliquid foods. *J. Adv. Food Nutr. Res.*, 39, 1-69.
- [9] Razavi, S.M.A., Mohammadi Moghaddam, T., Emadzadeh, B., Salehi, F. (2012). Dilute solution properties of wild sage (*Salvia macrosiphon*) seed gum. *Food Hydrocolloids*, 29, 205-210.
- [10] 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 [1] 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, pp137-154
- [2] Glicksman, M. (1982). Gum arabic. In: Glicksman M.(ed.), Food Hydrocolloids, CRC Press, Boca Raton, FL, pp7-30.
- [3] Marcotte, M., Taherian, A.R., Ramaswamy, H.S. (2001). Rheological properties of selected hydrocolloids as function of concentration and temperature. *Food Hydrocolloids*, 34, 695-703.
- [4] امین، غ. (1387) متداول‌ترین گیاهان دارویی سنتی ایرانی، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران، مرکز تحقیقات اخلاق و تاریخ پزشکی، ص 34-86.
- [5] رضوی، س.م.ع.؛ بستان، آ.؛ نیک‌نیا، س.؛ رزمخواه، س. (1390) بررسی خواص عملکردی عصاره خام هیدروکلونیدی برخی دانه‌های بومی ایران، نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی،

- صمغ عربی و صمغ گوار. پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، جلد 7، شماره 1، ص 42-49.
- [21] سمواتی، و؛ امام جمعه، ز؛ حجتی، م. (1390) بررسی مدل‌های مختلف رئولوژیک در سوسپانسیون‌های حاوی صمغ کتیرا. پژوهش‌های صنایع غذایی، جلد 22، شماره 1، ص 87-95.
- [22] فروغی‌نیا، س.؛ عباسی، س. (1385) بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی محلول ثعلب. مجموعه مقالات شانزدهمین کنگره ملی صنایع غذایی ایران، گرگان، ص 2-11.
- [23] Mali, S., Ferrero, C., Redigondou, V., Beleia, A.P., Grossmann, M.V.E., Zaritzky, N. E. (2003). Influence of pH and hydrocolloids addition on yam (*Dioscorea alata*) starch pastes stability. *J. Lebensm.- Wiss. U.- Technol.*, 36, 475–481.
- [24] Gómez-Díaz, D., Navaza, M.J. (2003). Rheology of aqueous solutions of food additives: Effect of concentration, temperature and blending. *J. Food Eng.*, 56, 387-392.
- [25] Williams, D.P., Sadar, L.N., Lo, Y.M. (2009). Texture stability of hydrogel complex containing curdlan gum over multiple freeze thaw cycles. *J. Food Process. Pres.*, 33, 126–139.
- [26] Hegeđušić, V., Herceg, Z., Rimac, S. (2000). Rheological properties of carboxymethylcellulose and whey model solutions before and after freezing. *Food Technol. Bioetech.*, 38(1), 19-26.
- [27] Hosseini-parvar, S.H., Matia-Merino, L., Goh, K.K.T., Razavi, S.M.A., Mortazavi. (2010). Steady shear flow behavior of gum extracted from *Ocimum bacilicum* L. seed: Effect of concentration and temperature. *J. Food Eng.*, 101, 236-243.
- [28] Steffe, J.F. (1996). *Rheological Methods in Food Process Engineering*. 2nd ed. Michigan: Freeman Press, 45-55.
- [29] Rao, M.A., Keney, J.F. (1975). Flow properties of selected food gums. *Can. J. Food Sc. Tech. J.*, 8, 142-148.
- comparative study. *Food Hydrocolloids*, 28, 75-81.
- [11] 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. *Food Hydrocolloids*, 23, 2394-2402.
- [12] Mitschka, P. (1982). Simple conversion of brookfield R.V.T. readings into viscosity functions. *J. Rheol. Acta.*, 21, 207-209.
- [13] Song, K.W., Kim, Y.S., Chang, G.S. (2006). Rheology of concentrated xanthan gum solutions: steady shear flow behavior. *J. Fiber Polym.*, 7(2), 129-138.
- [14] Tada, T., Matsumoto, T., Masuda, T. (1998). Structure of molecular association of curdlan at dilute regime in alkaline aqueous systems. *Chem. Phys.*, 228, 157–166.
- [15] Sworn, G. (2000). Xanthan Gum. In: G.O. Phillips, & P. A. Williams (Eds.), *Handbook of Hydrocolloids*, Cambridge: Wood head Publishing, pp 103-115.
- [16] سمائی، س.پ؛ قربانی، م.؛ صادقی ماهونک، ع. ر.؛ حعفری، س. م. (1393) بررسی تاثیر سرعت چرخشی، غلظت و دما بر رفتار جریان محلول صمغ تن هی زردآلو، فصلنامه علوم و فناوری‌های نوین غذایی، سال دوم، شماره 5، ص 39-48.
- [17] صالحی، ف.؛ کاشانی نژاد، م. (1392) بررسی اثر روش و شرایط خشک کردن بر روی رئولوژی و بافت صمغ دانه ریحان، علوم و فناوری‌های نوین غذایی، سال اول، شماره 2، ص 48-39.
- [18] Qian, H.F., Cui, S.W., Wang, Q., Wang, C., Zhou, H.M. (2011). Fractionation and physicochemical characterization of peach gum polysaccharides. *Food Hydrocolloids*, 25, 1285-1290.
- [19] Harry-Okuru, R.E., Carriere, C.J., Wing, R.E. (1999). Rheology of modified *Lesquerella* gum. *J. Ind Crops Pros.*, 19: 11-20.
- [20] رضایی، ر.؛ خمیری، م.؛ اعلمی، م. (1390) بررسی خواص رئولوژیکی و حسی ماست حاوی غلظت‌های مختلف