

تأثیر تیمارهای حرارت و انجماد بر خصوصیات رئولوژیکی مستقل از زمان صمغ دانه‌ی شاهی و صمغ گزانتان

سارا ناجی^۱، سید محمد علی رضوی^۲، حجت کاراژیان^{۳*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تربت حیدریه، گروه علوم و صنایع غذایی، تربت حیدریه، ایران

تاریخ دریافت: ۹۰/۷/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۰/۹/۸

چکیده

محصولات غذایی طی تولید، نگه داری و پخش تحت تیمارهای حرارتی قرار می‌گیرند که بر خصوصیات رئولوژیکی محلول‌های هیدروکلوئیدی موثر هستند. در این پژوهش، صمغ دانه‌ی شاهی و گزانتان در غلظت ۱٪ (وزنی - وزنی) تهیه و تحت تیمارهای گرم کردن (60°C - 30°C دقیقه، 80°C - 23°C دقیقه، 100°C - 18°C دقیقه و 121°C - 15°C دقیقه) و انجماد (18°C - 24°C ساعت و 30°C - 15°C ساعت) قرار گرفتند. سپس، خصوصیات رئولوژیکی محلول‌های هیدروکلوئیدی توسط ویسکومتر دورانی (مدل بوهلین) در دمای 25°C اندازه‌گیری گردید. با اعمال گرما یک افزایش غیرقابل بازگشت در ویسکوزیته‌ی صمغ دانه‌ی شاهی مشاهده شد، در حالی که صمغ گزانتان قابلیت مقاومت در برابر دمای بالا (121°C) را نداشت. در فرآیند انجماد، تبدیل آب به یخ منجر به افزایش اتصالات مولکولی و بهبود خصوصیات رئولوژیکی صمغ دانه‌ی شاهی و صمغ گزانتان گردید.

واژه‌های کلیدی: انجماد، زانتان، صمغ دانه‌ی شاهی، گرم کردن، خصوصیات رئولوژیکی، هیدروکلوئید.

۱- مقدمه

صمغ گزانتان، یک پلی ساکارید خارج سلولی است که توسط میکروارگانیسم گزانتوموناس کمپستریس^۱ تولید می شود. این صمغ، دارای خاصیت روان شدن در اثر برش است و یکی از مهم ترین خصوصیات صمغ گزانتان پایداری ویسکوزیته آن در دامنه ی وسیعی از دما و pH می باشد. این صمغ به طور گسترده در مواد غذایی منجمد و محصولات اتوکلاو گذاری شده استفاده می شود (۲۰).

محصولات غذایی، طی فرآیندهای تولید و انبارداری در معرض فرآیندهای حرارتی مختلف نظیر پاستوریزاسیون، استریلیزاسیون، سرد کردن و انجماد قرار می گیرند که با تغییرات دمایی بسیاری همراه است. برای ایجاد پایداری و ویسکوزیته ی ثابت و جلوگیری از آب اندازی محصولات غذایی طی این عملیات از هیدروکلوئیدها استفاده می شود. از سوی دیگر، دما یکی از مهم ترین عوامل تاثیر گذار بر خصوصیات عملکردی هیدروکلوئیدها نیز می باشد. از این رو، بررسی پایداری خصوصیات رئولوژیکی هیدروکلوئیدها در دماهای مختلف بسیار حائز اهمیت است تا قابلیت استفاده از آن ها در فرمولاسیون های غذایی تعیین گردد. در این پژوهش، خصوصیات رئولوژیکی صمغ شاهی به عنوان یکی از صمغ های بومی ایران و گزانتان تحت تیمارهای گرم کردن و انجماد مورد بررسی قرار گرفته شده است.

۲- مواد و روش ها

دانه های شاهی از بازار محلی تهیه و پس از حذف آلودگی های ثانویه، استخراج صمغ به روش کاراژیان و همکاران (۲۰۱۱) انجام گرفت (۸). صمغ گزانتان از شرکت سیگما (آمریکا) تهیه شد. محلول های صمغ دانه ی شاهی و گزانتان توسط پراکنده کردن پودر صمغ در آب دیونیزه (25°C) در غلظت ۱٪ (وزنی-وزنی) تهیه گردید و به منظور جلوگیری از آلودگی های باکتریایی ۰/۰۲٪ سدیم آزید (اپلی چم، آلمان) اضافه شد. سپس به منظور کامل شدن هیدراتاسیون به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط (25°C) روی رولر میکسر نگه داری شدند. نمونه ها پس از تهیه، جهت تیمار حرارتی در دماهای ۱۲۱، ۱۰۰، ۸۰ و 60°C به ترتیب به مدت ۱۵، ۱۸، ۲۳ و ۳۰ دقیقه قرار گرفتند و تیمارهای انجماد به مدت ۲۴ و ۱۵ ساعت به ترتیب در دماهای -18°C

هیدروکلوئیدها به مجموعه ای از پلی ساکاریدها و پروتئین ها اطلاق می گردد که با حل یا پخش شدن در آب، ویسکوزیته را افزایش می دهند و امروزه به طور گسترده در صنایع مختلف با عملکردهای گوناگون به کار می روند (۲۰). کاربرد و اهمیت هیدروکلوئیدها به خواص عملکردی آن ها بستگی دارد که این خواص در مواد غذایی تحت تاثیر ساختمان ملکولی هیدروکلوئید، غلظت هیدروکلوئید، واکنش هیدروکلوئید با سایر ترکیبات ماده ی غذایی (نمک ها، قندها، چربی ها، پروتئین و...)، pH و شرایط فرآوری (مانند دما) می باشد (۴ و ۱۲).

هیدروکلوئیدها در انواع مختلف موجود می باشند، اما از آن جا که تقاضای مصرف کنندگان با گذشت زمان تغییر کرده است و درک آن ها از خصوصیات عملکردی صمغ ها در صنعت افزایش یافته است در نتیجه افزایش تقاضا برای هیدروکلوئیدها با خواص عملکردی ویژه منجر به اهمیت یافتن منابع جدید صمغ ها با خواص مناسب گردیده است که در میان این منابع، پلی ساکاریدهای گیاهی با توجه به دسترسی آسان، افزایش مصرف کنندگان مشتقات گیاهی و قیمت مناسب فراوانی پیدا کرده است (۷ و ۲۰).

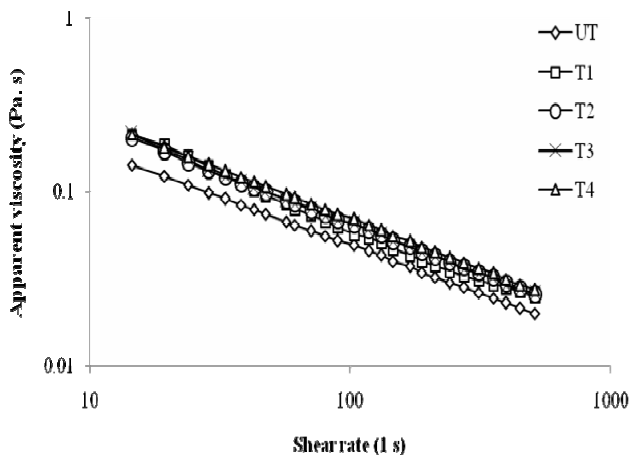
لیپیدیوم ساتیوم (*Lepidium sativum*) یا شاهی باغی، گیاه علفی است که دانه های آن به علت وجود لایه های پلی ساکاریدی زمانی که در آب خیسانده می شوند، آب جذب می کنند و یک لایه ی موسیلاژی چسبناک در اطراف آن تولید می شود. صمغ دانه ی شاهی با رفتار جریان تضعیف شونده با برش برای استفاده در فرمولاسیون هایی که بافتی با لزجی کم تر یا احساس دهانی مطلوب تر مورد نیاز است، قابل کاربرد است. خصوصیات صمغ های دانه ای بستگی به ترکیبات قندی آن ها دارد و میزان اختلاف ها باعث ایجاد تفاوت در رفتار هیدروکلوئیدها می گردد. آنالیز ترکیبات قندی در صمغ دانه ی شاهی نشانگر نسبت بالای مانوز/گالاکتوز (M/G) بوده که بیش تر از ۸/۲ می باشد. صمغ دانه ی شاهی دارای متوسط وزن ملکولی معادل ۵۴۰ KDa و مقدار شعاع چرخش ۷۵nm می باشد که نزدیک به شعاع چرخش گزانتان (۷۰-۹۰nm) با وزن ملکولی مشابه است. جزء ماکروملکولی صمغ دانه ی شاهی کنفورماسیون زنجیری نیمه سخت با انعطاف پذیری بینابینی بین حلقه تصادفی و میله ای سخت دارد که این زنجیره ی سفت، قابل مقایسه با گزانتان است (۹).

توسط آنالیز واریانس (ANOVA) در نرم افزار Minitab R14 تحلیل شدند و اختلاف بین میانگین‌ها با استفاده از نرم‌افزار MSTAT به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ مورد مقایسه قرار گرفتند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر فرآیندهای گرم کردن

شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب منحنی‌های جریان محلول‌های صمغ دانه‌ی شاهی و صمغ گزانتان را تحت شرایط حرارتی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌ها مشهود است ویسکوزیته‌ی ظاهری این صمغ‌ها با افزایش درجه‌ی برش کاهش یافته است که نشانگر رفتار غیرنیوتنی رقیق شونده با برش آن‌ها است. نتایج مدل قانون توان (جدول ۱) نیز نشانگر رفتار شبه پلاستیک ($n < 1$) محلول‌های صمغ دانه‌ی شاهی و صمغ گزانتان بود. این رفتار برای بیش تر محلول‌های هیدروکلوئیدی قابل مشاهده است که ناشی از ساختار پلیمری و وزن مولکولی بالای آن‌ها است. محلول‌های صمغ گزانتان رفتار ضعیف‌شونده با برش قوی‌تری نسبت به محلول‌های صمغ دانه‌ی شاهی نشان دادند. رفتار رقیق شونده با برش صمغ گزانتان مربوط به وزن مولکولی بالای آن و واکنش‌های بین مولکولی است که تجمع‌اتی را از طریق باندهای هیدروژنی و درگیری‌های پلیمری تشکیل می‌دهند (۱۷) و در صمغ دانه‌ی شاهی به ساختار زنجیره‌ی میله‌ای آن بستگی دارد که باعث افزایش درگیری ماکرومولکولی محلول می‌گردد (۹).



شکل ۱: تأثیر تیمارهای گرم کردن بر ویسکوزیته‌ی ظاهری محلول صمغ دانه‌ی شاهی (۱٪).

UT: شاهد (۲۵ °C)، T1: ۶۰-۳۰ دقیقه، T2: ۸۰-۲۳ دقیقه، T3: ۱۰۰-۱۸ دقیقه، T4: ۱۲۱-۱۵ دقیقه.

۳-۰ اعمال گردید و به منظور خروج از انجماد کامل، نمونه‌ها به مدت ۱۰ ساعت در دمای محیط (۲۵ °C) قرار گرفتند.

خصوصیات رئولوژیکی محلول‌های هیدروکلوئیدی توسط ویسکومتر دورانی (مدل بوهلین، ویسکو ۸۸، انگلستان) مجهز به سیرکولاتور حرارتی (جولابو، مدل F-12-MC، آلمان) اندازه‌گیری گردید. با توجه به ویسکوزیته‌ی نمونه از اسپیندل مناسب (C_{۱۴} و C_{۲۰}) استفاده گردید. حجم مناسبی از نمونه‌ی آماده شده در داخل کاپ ریخته شد و در تماس با باب و سیرکولاتور قرار گرفت. پس از آن که دمای نمونه به ۲۵ ± ۰/۱ رسید، آزمون رئولوژیکی مورد نظر برای به دست آوردن تنش برش-درجه‌ی برش بر آن اعمال گردید.

اثر سرعت برشی بر رفتار رئولوژیکی محلول‌های هیدروکلوئیدی در دامنه‌ی درجه‌ی برش ۱۴ تا ۵۰۰ s^{-۱} مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های آزمون (سرعت برشی-تنش برشی) با مدل‌های ذیل برازش شدند (۱۶):

۱- مدل قانون توان

$$\tau = k_p \dot{\gamma}^{np} \quad (1)$$

در این معادله، k ضریب قوام (Pa.sⁿ) و n، شاخص رفتار جریان (بدون بعد) می‌باشد. K، بزرگی ویسکوزیته سیال و n، ویژگی رفتار سیال را نشان می‌دهد.

۲- مدل هرشل بالکی

$$\tau = k_H (\dot{\gamma})^{n_H} + \tau_{0H} \quad (2)$$

در معادله‌ی فوق، τ_{0H} ، K_H و n_H به ترتیب تنش تسلیم (Pa)، ضریب قوام (Pa.sⁿ) و شاخص رفتار جریان مدل هرشل-بالکی است.

۳- مدل بینگهام

را ویسکوزیته‌ی پلاستیک بینگهام $\eta_B \tau = \eta_B \dot{\gamma} + \tau_{0B}$ و تنش تسلیم بینگهام (Pa) می‌گویند.

۴- مدل کاسون

$$\tau^{0.5} = k_{0c}^{0.5} + k_c (\dot{\gamma})^{0.5} \quad (3)$$

k_{0c} ، عرض از مبدأ نمودار - $(\tau^{0.5})$ و k_c ، شیب نمودار فوق است. $(k_{0c})^2 = \tau_{0c}$ و $K_c^2 = \mu_c$ به ترتیب عبارتند از ویسکوزیته‌ی کاسون (Pa.s) و تنش تسلیم کاسون (Pa).

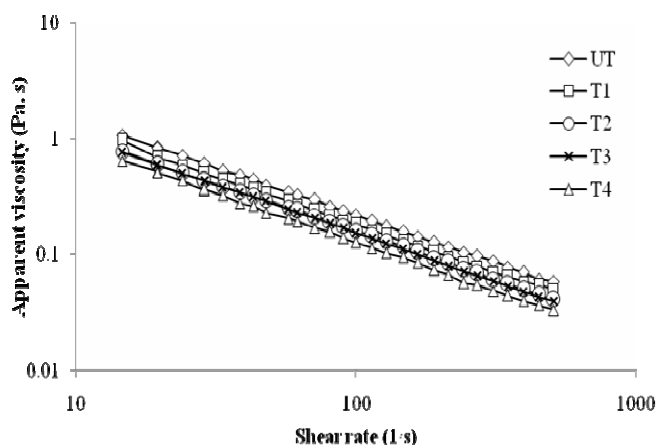
تمامی آزمایش‌ها در سه تکرار صورت گرفت و برای تجزیه و تحلیل آماری نتایج از طرح کاملاً تصادفی استفاده گردید. داده‌ها

اگرچه تمامی تیمارهای حرارتی بر مقدار ضریب قوام صمغ دانه‌ی شاهی تأثیر معنی‌داری داشتند ($P < 0.05$)، اما اختلاف بین تیمار ۱ ($60-30^\circ\text{C}$ ، ۳۰ دقیقه)، ۲ ($80-23^\circ\text{C}$ ، ۲۳ دقیقه) و ۳ ($100-80^\circ\text{C}$ ، ۳۰ دقیقه) بی‌معنا بود ($P > 0.05$) و ضریب قوام در تمامی تیمارها در حدود ۳۰٪ افزایش یافت. اتوکلاو‌گذاری ($121-15^\circ\text{C}$ ، ۱۵ دقیقه) نمونه‌ها بیش‌ترین تأثیر را بر میزان k داشت. با وجود اثر‌گذاری تیمارهای حرارتی بر ویسکوزیته‌ی صمغ دانه‌ی شاهی، هیچ تغییری در شاخص رفتار جریان (n) صمغ دانه‌ی شاهی پس از اعمال تیمارهای حرارتی مشاهده نگردید که نشانگر پایداری شبه پلاستیکی صمغ می‌باشد. این نتیجه، مطابق با یافته فریتاس و همکاران (۲۰۰۹) برای محلول‌های صمغ سودوموناس اولتورانس^۱ بود که شاهد ثبات سودوپلاستیسته محلول‌های این صمغ پس از اعمال حرارت بودند (۲).

کنفورماسیون زنجیره‌ی نیمه سخت عامل اصلی رفتار ضعیف‌شونده با برش صمغ دانه‌ی شاهی است و تجمعات و اتصالات قوی پلیمرهای این صمغ منجر به ویسکوزیته‌ی پایدار این صمغ طی حرارت‌دهی می‌شود. این افزایش ویسکوزیته پس از اعمال تیمار حرارتی نشانگر یک بازآرایی بین مولکولی برگشت‌ناپذیر در صمغ دانه‌ی شاهی توسط تیمار حرارتی است.

شکل ۲ و داده‌های k در جدول ۱ نشان می‌دهد که تیمار حرارتی تأثیر معنی‌داری بر ویسکوزیته‌ی ظاهری صمغ گزانتان داشت و کاهش مشهودی در ویسکوزیته با افزایش دمای تیمار حرارتی مشاهده گردید ($P < 0.05$). اتوکلاو‌گذاری ($121-15^\circ\text{C}$ ، ۱۵ دقیقه) بیش‌ترین کاهش را در ویسکوزیته‌ی محلول‌های صمغ گزانتان سبب شد.

گلیکوزمن (۱۹۸۲) کاهش مشابهی را در ویسکوزیته‌ی محلول‌های صمغ گزانتان که در آب مقطر تهیه و در 115°C برای ۳۰ دقیقه حرارت داده شده بودند گزارش کرده است. او همچنین بیان کرده است که حضور ۰/۱٪ سدیم کلرید در محلول صمغ گزانتان ۱٪ از کاهش ویسکوزیته‌ی محلول گزانتان در اثر حرارت جلوگیری می‌کند. حضور نمک‌هایی چون سدیم یا پتاسیم کلرید ساختار منظم گزانتان را حفظ می‌کند. بنابراین، حضور نمک برای پایداری صمغ گزانتان ضروری است (۱۱). کاهش مشابهی در ویسکوزیته‌ی تحت تأثیر تیمارهای حرارتی برای



شکل ۲: تأثیر تیمارهای گرم کردن بر ویسکوزیته‌ی ظاهری محلول صمغ گزانتان (۱).

UT: شاهد (25°C)، T1: $60-30^\circ\text{C}$ ، ۳۰ دقیقه، T2: $80-23^\circ\text{C}$ ، ۲۳ دقیقه، T3: $100-80^\circ\text{C}$ ، ۳۰ دقیقه، T4: $121-15^\circ\text{C}$ ، ۱۵ دقیقه.

کاهش ویسکوزیته‌ی ظاهری در فرآیندهایی با تنش برشی بالا همانند پمپ کردن و پر کردن منجر به سهولت فرآیند می‌گردد و در هنگام مصرف با افزایش ویسکوزیته‌ی ظاهری محصول، احساس دهانی مطلوبی ایجاد می‌کند (۱۸). البته این رفتار زمانی اهمیت دارد که شاخص رفتار جریان کم‌تر از ۰/۶ باشد (۱) که برای هر دو صمغ در تمامی شرایط این مقدار کم‌تر از ۰/۶ بود (جدول ۱) 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 (۱۹).

ضریب پایداری (k_p) صمغ دانه‌ی شاهی، که نشانگر ویسکوزیته‌ی محلول صمغ است، در مقایسه با گزانتان کم‌تر بود که در محلول‌های صمغ دانه‌ی شاهی پس از اعمال تیمار حرارتی افزایش یافت. این افزایش در ضریب قوام با افزایش دمای تیمار حرارتی و کاهش مدت زمان حرارت روند رو به افزایش داشت (جدول ۱).

نتیجه‌ی به دست آمده قابل مقایسه با یافته‌های یامازاکی و همکاران (۲۰۰۹) است که گزارش نموده‌اند ویسکوزیته‌ی هیدروکلوئید کور کوروس اولتوریتوس پس از حرارت‌دهی در دمای 60°C به مدت ۳۰ دقیقه افزایش می‌یابد. اما با افزایش دمای تیمار حرارتی ویسکوزیته‌ی صمغ مذکور کاهش یافته است (۲۲).

نسبت زمان حرارت دهی بر رفتار رئولوژیکی هیدروکلوئیدهای مورد بررسی است.

پارامترهای به دست آمده برای مدل هر شل بالکی در جدول ۳ بیانگر این است که ضریب تبیین (R^2) این مدل بسیار نزدیک به ۱ می‌باشد. تیمارهای حرارتی به طور معنی‌داری بر تنش تسلیم محلول‌های صمغ دانه‌ی شاهی اثرگذار بودند ($P < 0.05$) و موجب افزایش مقدار این پارامتر گردیدند، اما مشابه آن چه در افزایش ضریب قوام مشاهده گردید، اختلاف معنی‌داری بین تیمار ۱ ($60-30^\circ\text{C}$ ، دقیقه)، تیمار ۲ ($80-23^\circ\text{C}$ ، دقیقه) و تیمار ۳ ($100-18^\circ\text{C}$ ، دقیقه) وجود نداشت ($P > 0.05$). نمونه‌های مربوط به محلول‌های صمغ گزانتان تحت تمامی شرایط حرارت دهی دارای مقادیر تنش تسلیم بالایی بودند که با نتایج مارکوت و همکاران (۲۰۰۱) مطابقت داشت. اگرچه میزان تنش تسلیم توسط تیمارهای حرارتی کاهش یافت و این کاهش با افزایش میزان درجه حرارت تیمار حرارتی تشدید گردید.

مدل کاسون نیز به خوبی رفتار صمغ دانه‌ی شاهی و صمغ گزانتان را در شرایط مختلف توصیف کرد (جدول ۴). این نتایج با یافته‌های گارسیا-اوجائو و کیساس (۱۹۹۴) موافقت دارد که گزارش نموده‌اند مدل کاسون قابلیت خوبی در توصیف رفتار محلول‌های گزانتان دارا است (۳). در مقابل، سانگ و همکاران (۲۰۰۶) گزارش نموده‌اند که مدل کاسون ضریب تبیین قابل ملاحظه‌ای برای گزانتان ندارد (۱۵). این اختلاف در مشاهدات مربوط به حساسیت دستگاه، غلظت و محدوده‌ی درجه‌ی برش مورد استفاده در آزمون است. میزان تنش تسلیم کاسون (τ_{oc}) به طور معنی‌داری در محلول‌های صمغ دانه‌ی شاهی توسط تیمارهای حرارتی افزایش یافت ($P < 0.05$). اگرچه، این افزایش در ویسکوزیته‌ی کاسون (η_c) معنی‌دار نبود. از طرف دیگر پارامترهای مدل کاسون مربوط به صمغ گزانتان با اعمال تیمارهای حرارتی به طور معنی‌داری کاهش یافت ($P < 0.05$).

هیدروکلوئیدهایی چون لوییای اقایا^۱ (۱۰)، سودوموناس اولتورانس (۲)، صمغ گوار و کربوکسی متیل سلولز^۲ (۱۴) گزارش شده است.

شاخص رفتار جریان در تمام شرایط حرارتی پایدار بود که نشانگر ثبات رفتار رقیق شونده با برش این صمغ پس از اعمال تیمار حرارتی می‌باشد. این پایداری بالا در شاخص رفتار جریان در محلول‌های صمغ دانه‌ی شاهی و صمغ گزانتان بسیار حائز اهمیت، زیرا افزایش در میزان شاخص رفتار جریان منجر به ایجاد احساس دهانی لزج می‌شوند.

مدل‌های رئولوژیکی دارای تنش تسلیم شامل مدل بینگهام، هرشل بالکی و کاسون برای بررسی خصوصیات رئولوژیکی محلول‌های صمغ دانه‌ی شاهی و صمغ گزانتان استفاده گردید. همان طور که انتظار می‌رفت پارامترهای به دست آمده توسط مدل‌های دارای تنش تسلیم، رفتار رئولوژیکی محلول‌های صمغ دانه‌ی شاهی و گزانتان را به خوبی و با R^2 بالا توصیف کردند. اگرچه بهترین برازش توسط مدل هرشل بالکی با $R^2 \sim 1$ حاصل گردید (جدول ۲ تا ۴).

نتایج، نشان داد که تمامی محلول‌ها در تمامی شرایط دارای تنش تسلیم می‌باشند که مقادیر تنش تسلیم صمغ گزانتان در تمامی مدل‌ها بیشتر از صمغ دانه‌ی شاهی بود. وجود تنش تسلیم برای محلول‌های صمغ‌های مذکور ممکن است به دلیل تعداد زیاد باندهای هیدروژنی در ساختار ماریچ آن‌ها باشد که منجر به ایجاد کنفورماسیون پایداری در آن‌ها گشته که در مقابل جریان مقاومت می‌کنند (۱۶). وجود تنش تسلیم در محلول‌های صمغ زمانی که به عنوان اتصال‌دهنده برای حفظ ترکیبات فرمولاسیون در کنار هم استفاده می‌شود بسیار حائز اهمیت است (۱۳).

ویسکوزیته‌ی بینگهام (η_B) و تنش تسلیم بینگهام (τ_{0B}) صمغ دانه‌ی شاهی پس از اعمال تیمار حرارتی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت، اگرچه تأثیر تیمارهای گرم کردن در دماهای بالاتر و زمان کوتاه‌تر قابل ملاحظه‌تر بود. در حالی که، پارامترهای مدل بینگهام به دست آمده برای صمغ گزانتان پس از حرارت دهی به طور معنی‌داری کاهش یافت که در دماهای بالاتر این کاهش بیش‌تر بود. نتایج، نشانگر تأثیرگذاری بیش‌تر دما

جدول ۱- پارامترهای رئولوژیکی مدل قانون توان برای محلول های صمغ دانه‌ی شاهی و صمغ گزانتان در شرایط گرم کردن مختلف

صمغ گزانتان			صمغ دانه‌ی شاهی			تیمارها
R^2	n_p	k_p (Pa.s ⁿ)	R^2	n_p	k_p (Pa.s ⁿ)	
۰/۹۸۷	^a ۰/۱۷	^a ۹/۸۶	۰/۹۸۵	^a ۰/۴۴	^c ۰/۶۵	شاهد
۰/۹۸۲	^a ۰/۱۵	^a ۹/۴۱	۰/۹۸۱	^a ۰/۴۲	^b ۰/۸۹	تیمار ۱ (۳۰-۶۰ °C دقیقه)
۰/۹۸۹	^a ۰/۱۷	^b ۷/۱۷	۰/۹۸۰	^a ۰/۴۳	^b ۰/۸۸	تیمار ۲ (۲۳-۸۰ °C دقیقه)
۰/۹۸۱	^a ۰/۱۶	^b ۷/۲۱	۰/۹۹۸	^a ۰/۴۳	^b ۰/۹۰	تیمار ۳ (۱۸-۱۰۰ °C دقیقه)
۰/۹۸۶	^a ۰/۱۵	^c ۶/۳۴	۰/۹۸۷	^a ۰/۴۲	^a ۱/۰۱	تیمار ۴ (۱۵-۱۲۱ °C دقیقه)

جدول ۲- پارامترهای رئولوژیکی مدل بینگهام برای محلول های صمغ دانه‌ی شاهی و صمغ گزانتان در شرایط گرم کردن مختلف

صمغ گزانتان			صمغ دانه‌ی شاهی			تیمارها
R^2	η_B (Pa.s)	τ_{0B} (Pa)	R^2	η_B (Pa.s)	τ_{0B} (Pa)	
۰/۹۸۷	^a ۰/۰۲۴	^a ۱۸/۱۶	۰/۹۹۱	^b ۰/۰۱۷	^c ۲/۹۱	شاهد
۰/۹۱۳	^b ۰/۰۲۰	^{ab} ۱۵/۶۸	۰/۹۸۷	^{ab} ۰/۰۲۱	^b ۳/۷۱	تیمار ۱ (۳۰-۶۰ °C دقیقه)
۰/۸۴۵	^{bc} ۰/۰۱۷	^{bc} ۱۳/۲۱	۰/۹۶۷	^{ab} ۰/۰۲۰	^b ۳/۷۱	تیمار ۲ (۲۳-۸۰ °C دقیقه)
۰/۸۴۷	^{bc} ۰/۰۱۵	^{bc} ۱۳/۱۱	۰/۹۹۰	^a ۰/۰۲۲	^{ab} ۳/۷۹	تیمار ۳ (۱۸-۱۰۰ °C دقیقه)
۰/۹۲۸	^d ۰/۰۱۲	^c ۱۰/۱۵	۰/۹۸۸	^a ۰/۰۲۲	^a ۴/۱۶	تیمار ۴ (۱۵-۱۲۱ °C دقیقه)

جدول ۳- پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل بالکی برای محلول های صمغ دانه‌ی شاهی و صمغ گزانتان در شرایط گرم کردن مختلف

صمغ گزانتان				صمغ دانه‌ی شاهی				تیمارها
R^2	n_H	k_H (Pa.s ⁿ)	τ_{0H} (Pa)	R^2	n_H	k_H (Pa.s ⁿ)	τ_{0H} (Pa)	
۰/۹۹۹	^a ۰/۵۰	^{bc} ۰/۶۷	^a ۱۴/۴۴	۰/۹۹۹	^a ۰/۸۳	^a ۰/۰۶	^c ۲/۳۸	شاهد
۰/۹۹۹	^b ۰/۳۰	^b ۰/۹۱	^b ۱۱/۹۶	۰/۹۹۹	^a ۰/۷۶	^a ۰/۱۰	^b ۲/۸۷	تیمار ۱ (۳۰-۶۰ °C دقیقه)
۰/۹۹۴	^b ۰/۲۳	^a ۴/۰۲	^d ۴/۲۳	۰/۹۹۹	^a ۰/۷۸	^a ۰/۰۹	^b ۲/۸۷	تیمار ۲ (۲۳-۸۰ °C دقیقه)
۰/۹۹۸	^a ۰/۴۵	^{bc} ۰/۵۶	^b ۱۰/۸۶	۰/۹۹۸	^a ۰/۷۵	^a ۰/۱۰	^b ۲/۸۹	تیمار ۳ (۱۸-۱۰۰ °C دقیقه)
۰/۹۹۹	^a ۰/۴۹	^c ۰/۳۵	^c ۸/۹۸	۰/۹۹۸	^a ۰/۷۶	^a ۰/۱۰	^a ۳/۳۱	تیمار ۴ (۱۵-۱۲۱ °C دقیقه)

۳-۲- تأثیر فرآیندهای انجماد

پارامترهای مدل رئولوژیکی برای محلول‌های صمغ دانه‌ی شاهی و صمغ گزانتان پس از اعمال تیمار انجماد در جدول ۵ خلاصه شده است. عدم تغییر معنی دار مقادیر n پارامترهای مدل قانون توان این دو صمغ، نشانگر ثبات رفتار رقیق شونده با برش این صمغ‌ها در شرایط انجمادی است که ناشی از کنفورماسیون زنجیره‌ی نیمه سخت این هیدروکلونیدها می‌باشد. میزان ضریب قوام مدل قانون توان نیز به طور جزئی پس از انجماد افزایش یافت اما این تغییرات معنی دار نبود ($P > 0.05$).

این نتایج، قابل مقایسه با یافته‌های ویلیامز و همکاران (۲۰۰۹) می‌باشد که گزارش نموده‌اند که ویسکوزیته‌ی مخلوط صمغ کردلان/ لویبای اقاچیا و کردلان/ کاپاکاراجینان پس اعمال تیمار انجماد- خروج از انجماد افزایش یافت. اگرچه فرآیند انجماد تأثیر معنی‌داری بر ویسکوزیته‌ی برخی محلول‌های هیدروکلونیدی نظیری کربوکسی‌متیل سلولز (۵)، کمپلکس‌های کردلان با صمغ گزانتان و صمغ گوار (۲۱) و صمغ دانه‌ی ریحان (۶) نداشته است.

افزایش جزئی ویسکوزیته‌ی صمغ دانه‌ی شاهی و صمغ گزانتان 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 ویسکوزیته‌ی محلول‌ها را پس از انجماد افزایش می‌دهند.

براساس پارامترهای حاصل از مدل‌های با تنش تسلیم (جدول ۵)، میزان تنش تسلیم بعد از اعمال تیمار حرارتی انجماد- خروج از انجماد، افزایش یافت. این افزایش، مربوط به افزایش باندهای هیدروژنی در صمغ دانه‌ی شاهی و صمغ گزانتان طی انجماد است. به علاوه، قوام (k_H) در صمغ گزانتان به طور جزئی افزایش یافت، اما هیچ تغییر مشهودی در ضریب قوام صمغ دانه‌ی شاهی مشاهده نگردید. مدل هر شل بالکی نیز ثبات رفتار رقیق شونده با برش این دو صمغ را پس از اعمال فرآیند انجماد تأیید کرد که به دلیل انعکاس پایداری احساس دهانی، بسیار حائز اهمیت است.

نتایج شرایط مختلف تیمارهای انجماد (دما و زمان) تعیین نمود که اختلاف معنی‌داری بین تأثیر شرایط انجماد بر رفتار رئولوژیکی صمغ دانه‌ی شاهی و گزانتان وجود ندارد، اگرچه شرایط انجمادی ۱ تأثیر بیش تری بر پارامترهای رفتار مستقل از زمان صمغ دانه‌ی شاهی و صمغ گزانتان داشته است و نشان

دهنده‌ی تأثیر بیش تر زمان نسبت به دمای انجماد بر خصوصیات مستقل از زمان این دو صمغ است.

نتایج فوق، بیانگر این مطلب است که خصوصیات رئولوژیکی مستقل از زمان صمغ دانه‌ی شاهی و صمغ گزانتان پایداری بالایی طی انجماد دارند و انجماد نه تنها تأثیر تخریبی بر باندهای بین مولکولی ندارد، بلکه شبکه‌های قوی تری را ایجاد می‌کنند که از رشد کریستال‌های یخ طی انجماد جلوگیری می‌کنند. این موضوع می‌تواند زمینه‌ی جالبی برای انجام تحقیق درباره کاربرد صمغ دانه‌ی شاهی در محصولات منجمد برای جلوگیری از رشد کریستال‌های یخ و پایداری محصول باشد.

۴- نتیجه‌گیری

صمغ دانه‌ی شاهی، یک منبع جدید هیدروکلونیدی است که بومی ایران است و خصوصیات رئولوژیکی مطلوبی دارا است. ویسکوزیته‌ی محلول صمغ دانه‌ی شاهی پس از اعمال تیمارهای گرما افزایش یافت، درحالی که در محلول‌های صمغ گزانتان شاهد کاهش ویسکوزیته بودیم. تجمعات و اتصالات قوی پلیمرهای صمغ دانه‌ی شاهی منجر به ویسکوزیته‌ی پایدار این صمغ طی حرارت‌دهی می‌گردد. این افزایش ویسکوزیته پس از اعمال تیمار حرارتی نشانگر یک بازآرایی بین مولکولی برگشت‌ناپذیر در صمغ دانه‌ی شاهی توسط تیمار حرارتی است. پس از انجماد، ویسکوزیته‌ی هر دو صمغ افزایش یافت که این افزایش جزئی ویسکوزیته صمغ دانه‌ی شاهی و صمغ گزانتان 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 ویسکوزیته‌ی محلول‌ها را پس از انجماد افزایش می‌دهند. اما مقادیر شاخص رفتار جریان که بیانگر رفتار ضعیف شونده با برش است پس از فرآیندهای گرم کردن و انجماد ثابت بود.

جدول ۴- پارامترهای رئولوژیکی مدل کاسون برای محلول های صمغ دانه‌ی شاهی و صمغ گزانتان در شرایط گرم کردن مختلف

صمغ گزانتان			صمغ دانه‌ی شاهی			تیمارها
R^2	η_C (Pa.s)	τ_{0C} (Pa)	R^2	η_C (Pa.s)	τ_{0C} (Pa)	
۰/۹۹۶	^a ۰/۰۷۰	^a ۱۵/۱۱	۰/۹۹۸	^a ۰/۰۸۷	^c ۱/۷۰	شاهد
۰/۹۷۲	^{ab} ۰/۰۵۹	^b ۱۳/۴۲	۰/۹۹۸	^a ۰/۰۹۷	^c ۲/۲۱	تیمار ۱ (۶۰-۳۰ دقیقه)
۰/۹۳۸	^{ab} ۰/۰۵۹	^c ۱۱/۰۳	۰/۸۹۹	^a ۰/۰۹۸	^b ۲/۲۱	تیمار ۲ (۸۰-۲۳ دقیقه)
۰/۹۳۳	^b ۰/۰۵۲	^c ۱۱/۱۵	۰/۹۸۷	^a ۰/۰۹۸	^b ۲/۲۷	تیمار ۳ (۱۰۰-۱۸ دقیقه)
۰/۹۷۹	^b ۰/۰۴۸	^d ۸/۷۵	۰/۸۹۹	^a ۰/۰۹۹	^a ۲/۵۷	تیمار ۴ (۱۲۱-۱۵ دقیقه)

جدول ۵- پارامترهای رئولوژیکی مدل مستقل از زمان برای محلول های صمغ دانه‌ی شاهی و صمغ گزانتان تحت شرایط انجمادی مختلف

صمغ گزانتان			صمغ دانه‌ی شاهی			مدل های رئولوژیکی مستقل از زمان
انجماد ۲ (۱۵h/-۳۰°C)	انجماد ۱ (۲۴h/-۱۸°C)	شاهد (۲۵°C)	انجماد ۲ (۱۵h/-۳۰°C)	انجماد ۱ (۲۴h/-۱۸°C)	شاهد (۲۵°C)	
قانون توان						
^b ۹/۹۶	^a ۱۰/۶۷	^b ۹/۸۶	^a ۰/۶۶	^a ۰/۶۷	^a ۰/۶۵	k_p (Pa.s ⁿ)
^a ۰/۱۸	^a ۰/۱۷	^a ۰/۱۷	^a ۰/۴۶	^a ۰/۴۶	^a ۰/۴۴	n_p
۰/۹۸۷	۰/۹۹۰	۰/۹۸۷	۰/۹۸۰	۰/۹۷۷	۰/۹۸۵	R^2
بینگهام						
^a ۱۸/۹۹	^a ۱۹/۱۳	^a ۱۸/۱۶	^a ۳/۰۸	^a ۳/۱۱	^a ۲/۹۱	τ_{0B} (Pa)
^a ۰/۰۲۶	^a ۰/۰۲۶	^a ۰/۰۲۴	^a ۰/۰۱۵	^a ۰/۰۱۹	^a ۰/۰۱۷	η_B (Pa.s)
۰/۹۶۵	۰/۹۵۴	۰/۹۸۷	۰/۹۹۵	۰/۹۸۶	۰/۹۹۱	R^2
هرشل بالکی						
^a ۱۴/۷۴	^a ۱۴/۸۱	^a ۱۴/۴۴	^{ab} ۲/۶۸	^a ۲/۹۲	^b ۲/۳۸	τ_{0H} (Pa)
^a ۰/۷۹	^a ۰/۹۹	^a ۰/۶۷	^a ۰/۰۴	^a ۰/۰۵	^a ۰/۰۶	k_H (Pa.s ⁿ)
^a ۰/۴۹	^a ۰/۴۷	^a ۰/۵۰	^a ۰/۸۶	^a ۰/۸۶	^a ۰/۸۳	n_H
۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	R^2
کاسون						
^a ۱۵/۱۱	^a ۱۶/۲۹	^a ۱۵/۱۱	^a ۱/۸۵	^a ۱/۸۹	^a ۱/۷۰	τ_{0C} (Pa)
^a ۰/۰۷۴	^a ۰/۰۷۷	^a ۰/۰۷۰	^a ۰/۰۸۷	^a ۰/۰۹۴	^a ۰/۰۸۷	η_C (Pa.s)
۰/۹۹۸	۰/۹۹۵	۰/۹۹۶	۰/۹۹۷	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	R^2

- function of concentration and temperature. *Food Hydrocolloids*, 34, 695-703.
13. Rao, M. A., Keney, J. F. 1975. Flow properties of selected food gums. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 8: 142-148.
 14. Rao, M. A., Walter, R.H., and Cooley, H, J. 1981. Effect of heat treatment on the flow properties of aqueous guar gum and sodium carboxymethylcellulose (CMC) solutions. *Journal of Food Science*, 46: 896-899.
 15. Song, K. W., Kim, Y. S., and Chang, G. S. 2006. Rheology of concentrated xanthan gum solutions: steady shear flow behavior. *Fibers and Polymers*, 7(2): 129-138.
 16. Steffe, J. F. 1996. *Rheological Methods in Food Process Engineering*. 2nd ed. Michigan: Freeman Press.
 17. Sworn, G. 2000. Xanthan Gum. In: G.O. Phillips, & P. A. Williams (Eds.), *Handbook of Hydrocolloids*. (pp. 103-115). Cambridge: Woodhead Publishing.
 18. Tada, T., Matsumoto, T., and Masuda, T. 1998. Structure of molecular association of curdlan at dilute regime in alkaline aqueous systems. *Chemical Physics*, 228: 157-166.
 19. Taherian, A. R., Fustier, P., and Ramaswamy, H. S. 2007. Effects of added weighting agent and xanthan gum on stability and rheological properties of beverage cloud emulsions formulated using modified starch. *Journal of Food Process Engineering*, 30: 204-224.
 20. Williams, P. A., Phillips, G. O. 2000. Introduction to food hydrocolloids. In: G.O. Phillips, & P. A. Williams (Eds.), *Handbook of Hydrocolloids*. Cambridge: Woodhead Publishing.
 21. Williams, D. P., Sadar, L. N., and Lo, Y. M. 2009. Texture stability of hydrogel complex containing curdlan gum over multiple freeze-thaw cycles. *Journal of Food Processing and Preservation*, 33: 126-139.
 22. Yamazaki, E., Kurita, O., and Matsumura, Y. 2009. High viscosity of hydrocolloid from leaves of *Corchorus olitorius* L., *Food Hydrocolloids*, 23: 655-660.
 1. Chinnan, M. S., McWaters, K. H., and Rao, V. N. M. 1985. Rheological characterization of grain legume pastes and effect of hydration time and water level on apparent viscosity. *Journal of Food Science*, 50:1167-1171.
 2. Freitas, F., Alves, V. D., Carvalheira, M., Costa, N., Oliveira, R., and Reis, M. A. M. 2009. Emulsifying behavior and rheological properties of extracellular polysaccharide produced by *Pseudomonas oleovorans* grown on glycerol byproduct. *Carbohydrate Polymers*, 78 (3), 549-556.
 3. García-Ochoa, F., Casas, J. A. 1994. Apparent yield stress in xanthan gum solution at low concentration. *Chemical Engineering journal*, 53: B41-B46.
 4. Glicksman, M. 1982. *Food hydrocolloids*. VOL: 1-3, CRC press, Florida.
 5. Hegedušić, V., Herceg, Z., and Rimac, S. 2000. Rheological properties of carboxymethylcellulose and whey model solutions before and after freezing. *Food Technology and Biotechnology*, 38(1): 19-26.
 6. Hosseini-parvar, S. H., Matia-Merino, L., Goh, K. K. T., Razavi, S. M. A., and Mortazavi, 2010. Steady shear flow behavior of gum extracted from *Ocimum bacilicum* L. seed: Effect of concentration and temperature. *Journal of Food Engineering*, 101, 236-243.
 7. Imeson, A. 2010. *Food stabilizers, Thickeners and gelling agents*. Willey-Blackwell.
 8. Karazhiyan, H., Razavi, S. M. A., and Phillips, G. O. 2011. Extraction optimization of a hydrocolloid extract from cress seed (*Lepidium sativum*) using response surface methodology. *Food Hydrocolloids*, 25, 915-920.
 9. Karazhiyan, H., Razavi, S. M. A., Phillips, G. O., Fang, Y., Al-Assaf, S., Nishinari, K., and Farhoosh, R. 2009. Rheological properties of *Lepidium sativum* seed extract as a function of concentration, temperature and time. *Food Hydrocolloids*, 23, 2062-2068.
 10. Kök, M. S., Hill, S. E., and Mitchell, J. R. 1999. A comparison of the rheological behavior of crude and refined locust bean gum preparations during thermal processing. *Carbohydrate Polymers*, 38, 261-265.
 11. Lachke, A. 2004. Xanthan - a versatile gum. *Resonance*, 9:25-33.
 12. Marcotte, M., Taherian, A. R., and Ramaswamy, H. S. 2001. Rheological properties of selected hydrocolloids as a