



## مقاله پژوهشی

## بررسی رفتار رئولوژیکی وابسته به زمان (تیکسوتروپ) صمغ دانه مرو در حضور برخی نمک‌ها و قندها

علیرضا یوسفی<sup>۱\*</sup>، شهلا خدابخش‌اقدم<sup>۲</sup>، سید محمد علی رضوی<sup>۳</sup>، جواد توکلی<sup>۴</sup>، قادر حسین زاده<sup>۵</sup>

۱. دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بناب

۲. دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بناب

۳. استناد تمام، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

۴. استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی دانشگاه جهرم

۵. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بناب

(تاریخ دریافت: ۹۹/۶/۱۶، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۹/۷/۲۵، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۸/۱۲)

## چکیده

در این تحقیق، رفتار رئولوژیکی وابسته به زمان (تیکسوتروپ) محلول‌های صمغ دانه مرو در حضور نمک‌های کلرید سدیم و کلرید کلسیم در غلظت‌های مختلف (۰، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ mM) و همچنین قندهای گلوکز و ساکارز در غلظت‌های مختلف (۰، ۰.۲، ۰.۴، ۰.۶٪)، در سرعت‌های برش مختلف ( $10^{-1}$ ، ۲۵ و ۵۰) مورد بررسی قرار گرفت. محلول‌های صمغ دانه مرو در تمام شرایط مورد آزمایش رفتار تیکسوتروپ از خود نشان دادند. داده‌های بدست آمده از آزمون‌های رئولوژیکی به خوبی با مدل‌های سینتیک ساختار درجه دوم برای محلول‌های نمکی ( $R^2=0.918-0.987$  و  $RMSE=0.003-0.017$ ) و مدل ولتمن برای محلول‌های قندی ( $R^2=0.921-0.993$  و  $RMSE=0.003-0.020$ ) صمغ دانه مرو برازش یافتند. مقادیر سرعت شکست ساختار ( $k$ ) و میزان شکست ساختار ( $\eta_0/\eta_m$ ) بدست آمده برای محلول‌های صمغ دانه مرو در حضور نمک کلرید کلسیم به ترتیب بیشتر و کمتر از مقادیر بدست آمده در حضور نمک کلرید سدیم بود. در میان محلول‌های نمکی، محلول صمغ دانه مرو در حضور ۱۰ mM کلرید سدیم دارای بالاترین مقادیر تنش برشی اولیه و ضریب زمان شکست تیکسوتروپ بود. ضریب سفتی زنجیره ( $S$ ) صمغ دانه مرو در حضور یون دو ظرفیتی  $Ca^{2+}$  ( $12 \times 10^{-4} - 8 \times 10^{-4} M^{0.5}.Pa.s$ ) بیشتر از یون تک ظرفیتی  $Na^+$  ( $6 \times 10^{-4} - 8 \times 10^{-4} M^{0.5}.Pa.s$ ) تعیین شد. در مورد محلول‌های قندی صمغ دانه مرو، بالاترین مقدار  $k$  در حضور قند ساکارز مشاهده گردید و پارامتر میزان شکست ساختار با افزایش سرعت برش کاهش یافت. غلظت قندهای مورد آزمایش به ترتیب دارای اثر مستقیم و غیرمستقیم بر پارامترهای تنش برشی اولیه و ضریب زمان شکست تیکسوتروپ بود. نتایج این پژوهش به خوبی نشان داد که رفتار تیکسوتروپ صمغ دانه مرو به طور چشمگیری تحت تأثیر حضور یون‌ها و مولکول‌های قندی است، که این مساله در فرآیند تولید محصولات غذایی باید مورد توجه قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: صمغ دانه مرو، رئولوژی، رفتار تیکسوتروپ، مدل‌سازی

## ۱. مقدمه

رئولوژیکی تیکسوتروپ در سیستم‌های غذایی از جهت فهم رابطه بین ساختار و جریان و نیز ارتباط دادن پارامترهای فیزیکی با ارزیابی‌های حسی، اهمیت دارد [۱۷]. خصوصیات مربوط به رفتار تیکسوتروپ را می‌توان به وسیله پارامترهای مدل‌های رئولوژیکی خاص مانند ولتمن<sup>۲</sup> [۱۸] و سینتیک ساختار درجه دوم [۱۹] توضیح داد. وابسته به زمان بودن جریان یک ماده را می‌توان بر اساس آزمون‌های رئولوژیکی خاص و از روی یک سیکل پسماند<sup>۳</sup> ایجاد شده بررسی نمود، که مساحت پسماند ایجاد شده می‌تواند معیاری از میزان تیکسوتروپ بودن ماده را نشان دهد [۳، ۲۰، ۲۱].

قندها و نمک‌ها به طور گسترده‌ای در فرمولاسیون مواد غذایی به عنوان افزودنی استفاده می‌شوند و اثر مهمی بر بافت و طعم مواد غذایی گوناگون می‌گذارند. امروزه ثابت شده است که این افزودنی‌ها توانسته‌اند بر خصوصیات رئولوژیکی هیدروکلوئیدهای مختلف نیز اثرگذار باشند [۱۲، ۲۲-۲۷]. نتایج باک و یو [۲۸] نشان داد که برهمکنش بین هیدروکلوئیدهای زانتان و صمغ گوار در نسبت‌های مختلف تحت تأثیر حضور یون سدیم و همچنین قند ساکارز موجود در محلول قرار گرفت. حمیدآبادی شراهی و همکاران [۲۹] دریافتند که در حضور یون سدیم، ضریب قوام و شاخص رفتار جریان صمغ دانه خاکشیر به ترتیب کاهش و افزایش پیدا کرد. بررسی خصوصیات رئولوژیکی وابسته به زمان دیسپرسیون‌های نشاسته گندم در حضور گلوکز توسط ابو-جدیل و همکاران [۳۰] نشان داد که رفتار تیکسوتروپ این دیسپرسیون‌ها به خوبی به وسیله مدل ولتمن قابل توضیح است. آن‌ها گزارش کردند که اثر گلوکز بر پارامتر  $\eta_0/\eta_\infty$  که نشان دهنده میزان تیکسوتروپ بودن ماده است، در غلظت‌های بالاتر بیشتر بوده و پارامترهای تنش برشی اولیه (A) و ضریب زمان شکست تیکسوتروپ (B) نیز با افزایش سرعت برش کاهش یافتند. مائو و چن [۲۵] با مطالعه رفتار تیکسوتروپ محلول صمغ لوبیای افاقیا<sup>۴</sup> در حضور ساکارز دریافتند که پارامتر  $\eta_0/\eta_\infty$  مربوط به مدل سینتیک ساختار درجه دوم وابسته به دما نمی‌باشد. بر اساس بررسی منابع

تحقیقات نشان داده است که هیدروکلوئیدها می‌توانند خصوصیات رئولوژیکی سیستم‌های غذایی را بهبود دهند و از آن‌ها به عنوان اصلاح کننده بافت غذا، تثبیت کننده، تغلیظ کننده و امولسیفایر در صنایع غذایی استفاده می‌شود [۱، ۲]. یافتن منابع جدید پلی ساکاریدی با خواص عملکردی ویژه، همیشه مورد توجه محققین امر غذا و دارو قرار گرفته است، که در این بین، به دلیل دارا بودن منشا طبیعی، تمایل به خصوصیات عملکردی پلیمرهای مستخرج از دانه‌های گیاهی روزافزون بوده است [۳-۵]. گیاه مرو وحشی<sup>۱</sup> بومی منطقه مدیترانه شمالی است و امروزه در مناطق زیادی از جهان پراکنده شده و کشت می‌گردد. تحقیقات نشان داده است که دانه‌های مرو می‌تواند به عنوان یک منبع جدید برای استخراج هیدروکلوئید جهت کاربردهای غذایی و دارویی مورد استفاده واقع شود و تماماً دارای خواص ضد میکروبی و آنتی‌اکسیدانی نیز می‌باشد [۶، ۷]. روش بهینه استخراج برخی از خصوصیات فیزیکیوشیمیایی، عملکردی و رئولوژیکی صمغ دانه مرو مورد بررسی محققین واقع شده است [۱۴-۱۷]. صمغ دانه مرو یک پلیمر گالاکتومانانی با نسبت ۱/۷۸-۱/۹۳ به ۱، مانوز به گالاکتوز می‌باشد، که میانگین وزن مولکولی آن ۱/۵ میلیون دالتون بوده و دارای ۳۲/۲-۲۸/۲٪ ارونیک اسید است [۱۳]. نتایج بدست آمده از آزمون‌های رئولوژیکی برشی پایای (وابسته به سرعت برش و مستقل از زمان) محلول‌های صمغ دانه مرو رفتار تضعیف شونده با برش این صمغ را در غلظت‌ها و دماهای مختلف و همچنین در حضور دیگر مواد حل شونده در محلول، از خود نشان داده است [۹، ۱۲]. نتایج مطالعه محلول‌های رقیق صمغ دانه مرو نشان داده است که رفتار این محلول‌ها تحت تأثیر غلظت، دما و مواد حل شونده دیگر است [۷، ۱۰].

هیدروکلوئیدها ممکن است دارای خصوصیات رئولوژیکی وابسته به زمان نوع تیکسوتروپ باشند، که در این حالت مقدار ویسکوزیته در طی اعمال یک کرنش ثابت با گذشت زمان کاهش می‌یابد، و این مساله ناشی از شکست در حال پیشرفت ساختار با زمان است [۱۷-۱۵]. مطالعه خصوصیات

2. Weltman  
3. Hysteresis cycle  
4. Locust bean gum

1. *Salvia macrosiphon*

دمای اتاق ( $23 \pm 2$  °C) برای مدت ۵ روز خشک گردید. سپس، نمونه‌های صمغ دانه مرو به وسیله دستگاه آسیاب خانگی (تفال، مدل ۱۱۶۱ ساخت کشور فرانسه) دوبار آسیاب شده و بعد از الک شدن برای آنالیز آماده گردید. ترکیب شیمیایی پودر صمغ دانه مرو تهیه شده به صورت میانگین شامل ۶/۱۱٪ رطوبت، ۰/۲۴٪ چربی، ۸/۱۷٪ خاکستر، ۵/۴۶٪ پروتئین و ۸۰/۰۲٪ کربوهیدرات بود.

## ۲.۲. تهیه دیسپرسیون های صمغ دانه مرو

دیسپرسیون‌های ۰/۵٪ (w/w) صمغ دانه مرو در آب مقطر، محلول‌های نمکی حاوی یون‌های کلرید سدیم و کلرید کلسیم در غلظت‌های ۰، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ mM و محلول‌های قندی حاوی گلوکز و ساکارز در غلظت‌های (w/w) ۰/۰، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ تهیه گردید. بعد از تشکیل یک چاهک حین هم‌خوردن هر یک از محلول‌های بیان شده توسط همزن مغناطیسی، پودر صمغ دانه مرو تهیه شده به آرامی به دیواره چاهک تشکیل شده اضافه گردید تا از کلوخه‌ای شدن پودر جلوگیری شده و محلولی یکنواخت تهیه گردد. سپس، تمام دیسپرسیون‌های تهیه شده به وسیله یک همزن غلطکی با سرعت ثابت ۴۰۰ rpm برای ۱۰ min همزده شد. علاوه بر این مرحله از همزدن، محلول‌های تهیه شده برای مدت ۲۴ h با همان دور همزده شدند تا فرآیند هیدراته شدن صمغ دانه مرو به خوبی صورت گیرد.

## ۳.۲. آزمون‌های رئولوژیکی

برای بررسی رفتار تیکسوتروپ دیسپرسیون های صمغ دانه مرو، آزمون‌های رئولوژیکی مربوطه به وسیله یک رئومتر چرخشی کنترل تنش/ کرنش (مدل Physica MCR301، ساخت شرکت آنتون پار، کشور اتریش) مجهز به پروب استوانه‌های هم‌مرکز (CC27 و مدل ISO 3219) استفاده گردید. برای این منظور، مقدار کافی از هر یک از محلول‌های صمغ دانه مرو وارد چمبر سیلندرهای هم‌مرکز گردید. بعد از تنظیم دمای چمبر بر روی  $25$  °C، به نمونه‌ها اجازه داده شده تا ۱ دقیقه در این دما باقی بمانند. در انتها، محلول‌ها در همین دما و در کرنش‌های ثابت  $10$ ،  $25$  و  $50$   $s^{-1}$  همزده شدند. علاوه بر تعیین نمودارهای جریان محلول‌های صمغ

صورت گرفته، مشاهده گردید که رفتار تیکسوتروپ هیدروکلوئیدها همچنین به غلظت و سرعت برش نیز وابسته است [۱۷، ۳۱، ۳۲].

از آنجایی که هیچ پژوهشی مبنی بر مطالعه رفتار وابسته به زمان صمغ دانه مرو، به عنوان یک هیدروکلوئید نوظهور، در حضور نمک‌ها و قندهای مختلف صورت نگرفته است؛ بنابراین هدف از این پژوهش بررسی اثر اضافه کردن نمک‌های کلرید سدیم و کلرید کلسیم، و قندهای گلوکز و ساکارز بر رفتار تیکسوتروپ دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو بود. در این بین، پارامترهای رئولوژیکی وابسته به زمان محلول‌های صمغ دانه مرو به وسیله مدل‌های سینتیک ساختار درجه دوم و ولتمن توضیح داده شد. همچنین تأثیر قدرت یونی نمک‌های ذکر شده و نیز غلظت قندهای مورد مطالعه بر ویسکوزیته ظاهری صمغ دانه مرو مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲. مواد و روش‌ها

دانه‌های مرو استفاده شده در این پژوهش از یک عطاری محلی در بازار تبریز تهیه گردید. جهت حذف ناخالصی‌های همراه دانه، دانه‌های مرو به صورت دستی در آزمایشگاه تمیز شدند. اسید کلریدریک، هیدروکسید سدیم، نمک‌ها (کلرید سدیم و کلرید کلسیم) و قندها (گلوکز و ساکارز) با درجه آنالیزی از شرکت مرک<sup>۱</sup> آلمان تهیه گردید.

## ۱.۲. استخراج صمغ دانه مرو

روش استخراج صمغ دانه مرو استفاده شده در این تحقیق بر اساس روش بیان شده توسط بستان و همکاران [۸] انجام شد. بعد از اعمال شرایط بهینه استخراج (دمای  $25$  °C، نسبت آب به دانه ۵۱ به ۱ و pH برابر ۵/۵) برای مدت ۲۰ min، موسیلاژ دانه مرو با عبور از یک دستگاه استخراج کننده آزمایشگاهی (آبمیوه‌گیری پارس خزر مدل GC700P) از دانه‌های متورم شده جدا شد. جهت رسوب توده صمغ از نسبت ۳ به ۱ (v/v) اتانول ۹۶٪ به آب مقطر استفاده گردید. سپس توده پلیمری رسوب داده شده جمع‌آوری شده و در

1. Merck Co

که در این معادله  $\eta_0$  و  $\eta_\infty$  (Pa.s) به ترتیب ویسکوزیته اولیه در زمان صفر و ویسکوزیته نهایی در زمان بی‌نهایت می‌باشند. همچنین  $k$  ثابت سرعت شکست تیکسوتروپ و  $n$  درجه شکست می‌باشد که در اینجا درجه ۲ استفاده شد.

۲- مدل ولتمن<sup>۴</sup>

$$\tau = A + B \ln t \quad (۴)$$

که در این معادله،  $A$  (Pa) پارامتر تنش اولیه و  $B$  (Pa) ضریب زمان شکست تیکسوتروپ می‌باشد [۳۴].

### ۵.۲. تأثیر غلظت قند بر ویسکوزیته ظاهری

تأثیر غلظت قندهای به کار برده شده بر ویسکوزیته ظاهری دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو، در یک زمان اعمال کرنش کوتاه (۲۵ s) و یک زمان اعمال کرنش طولانی (۱۸۰ s) در کرنش  $s^{-1}$  ۲۵، به وسیله مدل‌های قانون توان (معادله ۵)، نمای (معادله ۶) و چند جمله‌ای (معادله ۷) تعیین گردید:

$$\eta = a_1 C^{b_1} \quad (۵)$$

$$\eta = a_2 e^{b_2 C} \quad (۶)$$

$$\eta = b_4 + b_3 C + a_3 C^2 \quad (۷)$$

که در این معادلات  $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, b_4$  ثابت‌های مدل هستند [۳۷].

### ۶.۲. تأثیر قدرت یونی بر ویسکوزیته ظاهری

مدینا-تورس و همکاران [۳۳] دریافتند که رابطه بین قدرت یونی که بر اساس غلظت و بار یون تعیین می‌شود و ویسکوزیته هیدروکلوئیدهای باردار، توسط رابطه زیر قابل بیان است:

$$\eta = \eta_\infty + SI^{-0.5} \quad (۸)$$

که در این معادله،  $\eta$  به عنوان ویسکوزیته ظاهری در زمان‌های اعمال کرنش کوتاه (۲۵ s) و طولانی (۵۰۰ s)، و  $\eta_\infty$  ویسکوزیته ظاهری در قدرت یونی بینهایت می‌باشد. همچنین، مقدار  $I$  (M) نشان دهنده قدرت یونی و  $S$  ( $M^{0.5} \cdot Pa \cdot s$ ) پارامتری است که به سفتی زنجیره پلیمری

دانه مرو به روش بیان شده، مقدار کرنش از  $s^{-1}$  ۱۰ تا ۲۵۰ در طی ۱۸۰ s افزایش و سپس در طی همین زمان از  $s^{-1}$  ۲۵۰ تا ۱۰ کاهش یافت تا میزان پسماند تعیین گردد [۳۴].

### ۴.۲. مدل‌سازی رئولوژیکی

شاخص رفتار جریان ( $n$ ) و ضریب قوام ( $k$ ) محلول‌های منتخب صمغ دانه مرو با برازش مدل استوالد-دوال<sup>۱</sup> (قانون توان) بر داده‌های تنش برشی-سرعت برش تعیین گردید (معادله ۱):

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (۱)$$

که در این معادله  $\tau$  و  $\dot{\gamma}$  به ترتیب تنش برشی (Pa) و سرعت برش ( $s^{-1}$ ) می‌باشند.

لوپ پسماند<sup>۲</sup> بر اساس مساحت بین منحنی‌های بدست آمده از داده‌های تنش-کرنش پیش‌رونده و پس‌رونده تعیین گردید. این مساحت با انتگرال‌گیری از منحنی‌های ذکر شده و یافتن اختلاف بین انتگرال منحنی پیش‌رونده با انتگرال منحنی پس‌رونده و در بازه کرنش اولیه ( $\dot{\gamma}_1$ ) و نهایی ( $\dot{\gamma}_2$ ) به صورت زیر محاسبه گردید:

$$\text{مساحت لوپ پسماند} = \int_{\dot{\gamma}_1}^{\dot{\gamma}_2} k_p \dot{\gamma}^{n_p} - \int_{\dot{\gamma}_1}^{\dot{\gamma}_2} k'_p \dot{\gamma}^{n'_p} \quad (۲)$$

که در این معادله  $k_p, k'_p, n_p, n'_p$  به ترتیب ضریب قوام و شاخص رفتار جریان بدست آمده از داده‌های منحنی‌های تنش-کرنش پیش‌رونده و پس‌رونده می‌باشد.

برای مدل‌سازی رئولوژیکی جریان وابسته به زمان، داده‌های تنش-زمان یا ویسکوزیته ظاهری-زمان بر اساس آزمون‌های رئولوژیکی بدست آمد. از دو مدل برای بیان رفتار رئولوژیکی وابسته به زمان (تیکسوتروپ) نمونه‌های مورد آزمایش استفاده گردید:

۱- مدل سینتیک ساختار درجه دوم<sup>۳</sup>:

$$\left[ \frac{(\eta - \eta_\infty)}{\eta_0 - \eta_\infty} \right]^{1-n} = (n-1)kt + 1 \quad (۳)$$

1. Ostwald-de Waele  
2. Hysteresis loop  
3. Second-order structural kinetic

4. Weltman model

شد، نشان داد که همه دیسپرسیون‌ها داری رفتار تیکسوتروپ بودند (شکل ۱). مقادیر بدست آمده برای مساحت لوپ پسماند مربوط به دیسپرسیون‌های تهیه شده در آب دیونیزه، نمک و قند به ترتیب  $1/52$ ،  $1/92$  و  $0/91$  بود. این نتایج نشان می‌دهد که رفتار تیکسوتروپ دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو در حضور قند به میزان  $26/32\%$  افزایش و در حضور نمک  $40/13\%$  کاهش یافته است. برخی محققین از این روش برای ارزیابی رفتار وابسته به زمان هیدروکلوئیدهای مختلف استفاده کرده‌اند [۳، ۲۵، ۳۴-۳۶]. تنها بر اساس مساحت لوپ پسماند نمی‌توان گستردگی شکست ساختار در طی زمان برای سیستم‌های ویسکوز را بیان نمود، بنابراین برای مطالعه رفتار تیکسوتروپ دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو از برخی مدل‌های رئولوژیکی استفاده گردید. مدل‌های سینتیک ساختار درجه دوم و ولتمن از مهمترین مدل‌هایی هستند که برای بیان رفتار تیکسوتروپ انواع محلول‌های هیدروکلوئیدی مورد استفاده قرار می‌گیرند و پارامترهای موجود در این مدل‌ها به خوبی می‌توانند خصوصیات رفتار جریان تضعیف شونده با زمان را برای این نوع محلول‌ها در شرایط مختلف مورد آزمایش تشریح نمایند [۳۴].

مربوط است [۷].

## ۷.۲. آنالیز آماری

آزمون‌های رئولوژیکی این تحقیق در دو تکرار انجام پذیرفت. بهترین مدل‌ها بر اساس بالاترین مقدار برای ضریب تبیین  $R^2$  و پائین‌ترین مقدار برای جذر میانگین مربعات خطاها  $RMSE$  بدست آمده از فرآیند مدلسازی با استفاده از جعبه ابزار Curve fitting نرم‌افزار MATLAB (نسخه R2013a) تعیین گردید. تفاوت‌های معنی‌دار بین پارامترهای رئولوژیکی بر اساس آنالیز واریانس (ANOVA) داده‌ها و در سطح خطای  $5\%$  گزارش گردید. برای تمام آنالیزهای آماری انجام شده در این تحقیق نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۱) به کار برده شد.

## ۳. نتایج و بحث

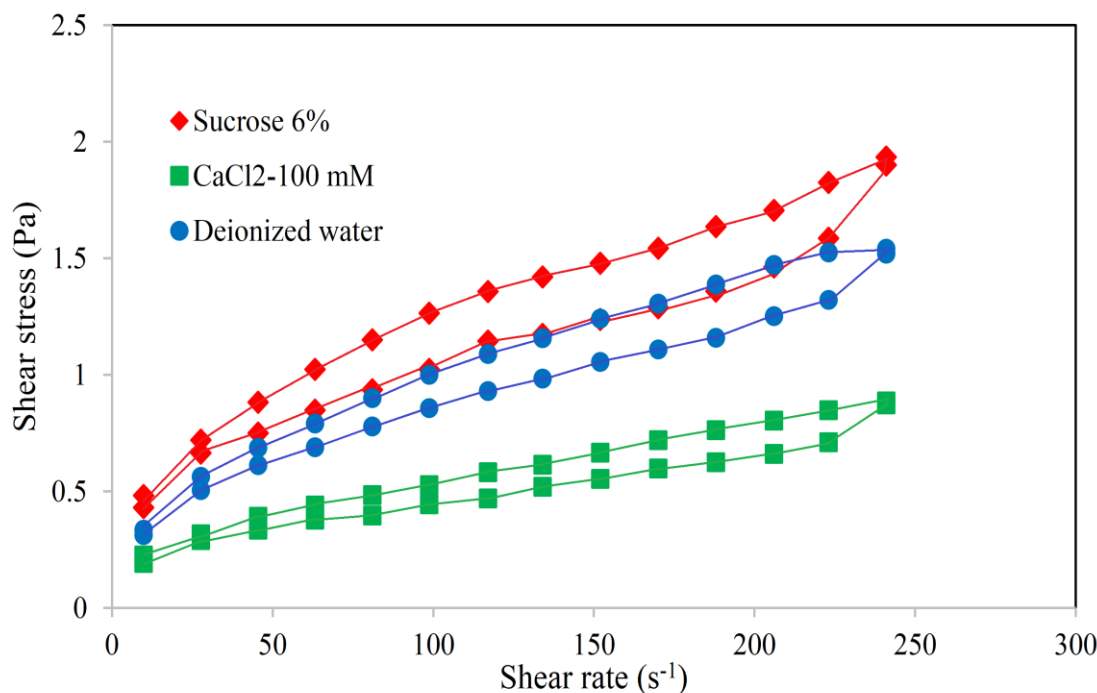
### ۱.۳. نمودارهای جریان و تیکسوتروپی

مقادیر بدست آمده برای پارامترهای رئولوژیکی مدل قانون توان (معادله ۱) مربوط به دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو در آب دیونیزه و همچنین در حضور نمک (کلرید کلسیم  $100\text{mM}$ ) و قند (ساکارز  $6\%$ ) در جدول (۱) نشان داده شده است. وجود لوپ پسماند که از روی تفاوت مقدار تنش برشی حین تغییر کرنش به صورت جلو رونده و پس رونده تعیین

جدول (۱) پارامترهای مدل قانون توان و مساحت لوپ پسماند بدست آمده برای صمغ دانه مرو در محلول‌های مختلف  
Table 1. Power law parameters of and hysteresis loop area calculated for sage seed gum (SSG) in different solutions

Sample نمونه	Forward جلورونده			Backward پس‌رونده			Hysteresis loop area ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) لوپ پسماند
	$k_p$ ( $\text{Pa s}^n$ )	$n_p$	$R^2$	$k'_p$ ( $\text{Pa s}^n$ )	$n'_p$	$R^2$	
SSG in deionized water در آب دیونیزه	0.104	0.492	0.998	0.008	0.511	0.981	1.52
SSG in $\text{CaCl}_2$ (100 mM) در کلرید کلسیم (۱۰۰ میلی مولار)	0.006	0.493	0.987	0.004	0.520	0.966	0.91
SSG in sucrose (2%) در ساکارز (۲ درصد)	0.163	0.443	0.994	0.114	0.485	0.972	1.92

1. Determination coefficient
2. Root mean square error



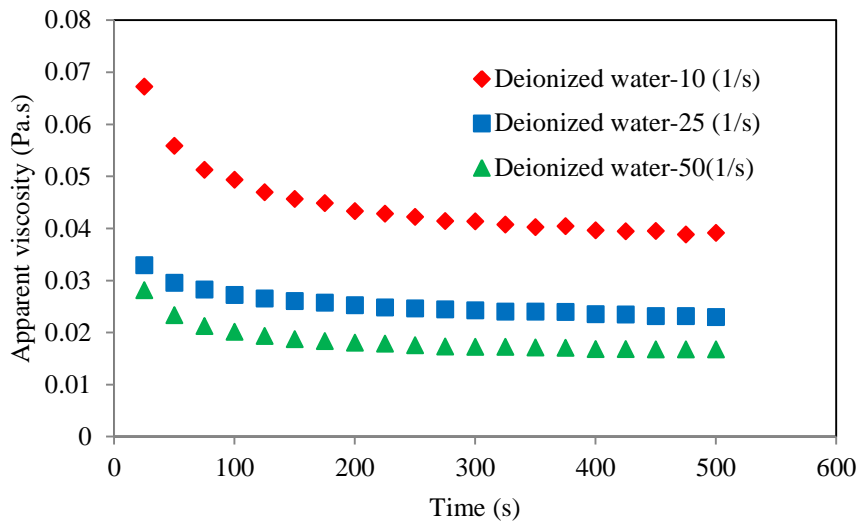
شکل (۱) تأثیر ساکارز (۶٪) و کلرید کلسیم (۱۰۰ mM) بر روی لوپ پسماند نمودار جریان صمغ دانه مرو (۰/۵٪ w/w) **Fig 1.** Influence of sucrose (6%) and  $\text{CaCl}_2$  (100 mM) on hysteresis loop of the flow curves of sage seed gum (SSG) (0.5%, w/w)

۱۳/۷۳، ۲۲/۷۵ و ۲۷/۹۰٪ بود. رفتار تیکسوتروپ محلول پلیمری با شکست پی در پی و یا تجدید آرایش شبکه‌های پلیمری تشکیل یافته در اثر اجتماع زنجیره‌های پلیمری، تحت تنش برشی مرتبط می‌باشد [۳۸]. زمان مشاهده شده برای کاهش ناگهانی ویسکوزیته ظاهری و رسیدن به حالت پایدار در کرنش  $10 \text{ s}^{-1}$  (حدود  $400 \text{ s}$ ) بسیار بیشتر از این زمان در کرنش‌های بالاتر بود، که این مساله نشان دهنده تأثیر مهم کرنش بر روی سرعت شکست ساختار می‌باشد. شکل (۳) نمودار جریان دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو را در کرنش‌های مختلف و در حضور نمک‌های کلرید سدیم و کلرید کلسیم نشان می‌دهد. بدون در نظر گرفتن نوع نمک، محلول‌های صمغ دانه مرو در تمام کرنش‌های مورد آزمایش دارای رفتار تیکسوتروپ بودند.

### ۳.۲. تأثیر نمک

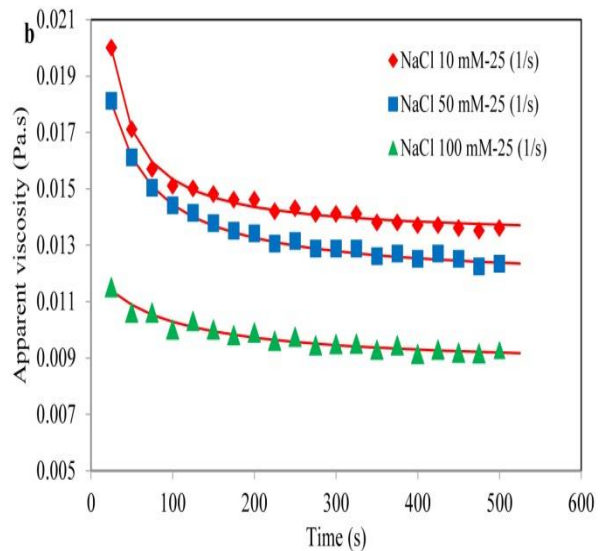
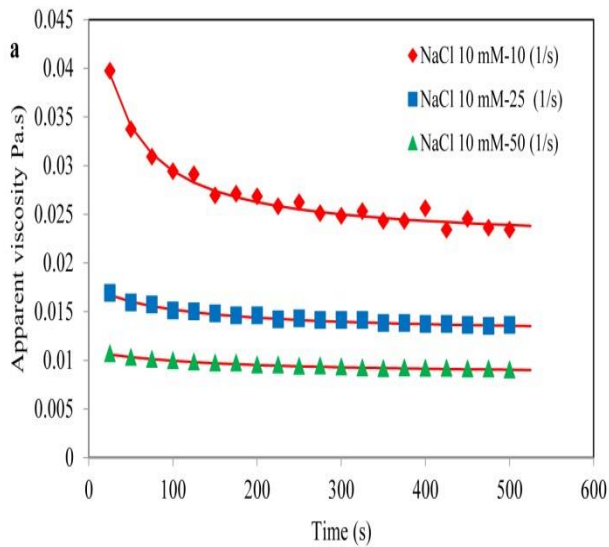
نمودار جریان مربوط به رفتار تیکسوتروپ دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو در آب دیونیزه در کرنش‌های  $10 \text{ s}^{-1}$ ،  $25$  و  $50$  در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ویسکوزیته ظاهری با افزایش زمان اعمال کرنش به صورت پیوسته کاهش می‌یابد و تقریباً بعد از  $400 \text{ s}$  به حالت پایدار می‌رسد. این مساله نشان می‌دهد که پیکربندی<sup>۱</sup> پلیمر در محلول با اعمال کرنش تغییر یافته است. نتایج مشابهی برای صمغ دانه شاهی [۱۶، ۳۷]، آلژینات سدیم [۳۱]، صمغ دانه بالنگو [۳] گزارش شده است. این رفتار تضعیف شونده<sup>۲</sup> با زمان نشان داد که دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو دارای رفتار تیکسوتروپ بودند. در کرنش  $10 \text{ s}^{-1}$ ، افزایش زمان اعمال کرنش از  $50 \text{ s}$  به  $100$ ،  $200$  و  $400$ ، به ترتیب سبب کاهش  $11/64$ ،  $22/40$  و  $29/03$  درصدی در ویسکوزیته ظاهری دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو گردید. در کرنش بالاتر ( $50 \text{ s}^{-1}$ ) مقدار این کاهش به ترتیب

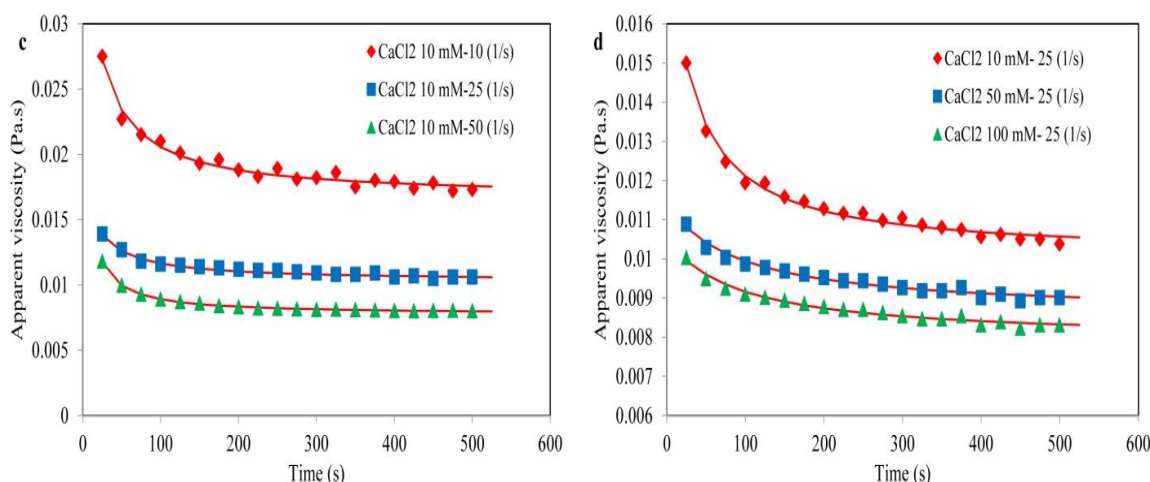
1. Configuration  
2. Thinning behavior



شکل (۲) ویسکوزیته ظاهری محلول‌های صمغ دانه مرو در آب دیونیزه در کرنش‌های مختلف (۱۰، ۲۵ و ۵۰ s<sup>-1</sup>) به صورت تابعی از زمان  
**Fig 2.** Apparent viscosity of sage seed gum (SSG) solutions in deionized water at different shear rates (10, 25 and 50 s<sup>-1</sup>) as function of shearing time.

در کرنش  $s^{-1}$  ۲۵، با افزایش زمان اعمال کرنش از ۵۰ s به ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰، به ترتیب ۰/۵/۰۳٪، ۸/۱۷٪ و ۱۳/۸۴٪ کاهش در ویسکوزیته ظاهری نمونه‌های شامل نمک کلرید سدیم (۱۰ mM) و ۹/۹۵٪، ۱۴/۹۳٪ و ۲۰/۳۶٪ کاهش در ویسکوزیته ظاهری نمونه‌های شامل نمک کلرید کلسیم (۱۰ mM) مشاهده گردید. به عبارتی دیگر، در یک زمان اعمال کرنش ثابت (۲۰۰ s) و در کرنش  $s^{-1}$  ۲۵، افزایش غلظت نمک از ۰ تا ۱۰۰ mM سبب کاهش ۶۰/۷۵ و ۶۵/۱۵ درصدی ویسکوزیته ظاهری به ترتیب در حضور کلرید سدیم و کلرید کلسیم گردید.





شکل (۳) ویسکوزیته ظاهری محلول‌های صمغ دانه مرو به صورت تابعی از زمان در حضور (a) کلرید سدیم با غلظت ۱۰ mM و در کرنش‌های مختلف، (b) کلرید سدیم در غلظت‌های مختلف و در کرنش  $25 \text{ s}^{-1}$ ، (c) کلرید کلسیم با غلظت ۱۰ mM و در کرنش‌های مختلف، (d) کلرید کلسیم در غلظت‌های مختلف و در کرنش  $25 \text{ s}^{-1}$ ، داده‌های آزمایشگاهی که توسط مدل سینتیک ساختار دوم برازش داده شده‌اند.

**Fig 3.** Apparent viscosity of sage seed gum (SSG) solutions as a function of shearing time in the presence of NaCl (a) with concentration of 10 mM at different shear rates, (b) with different concentrations at shear rate of  $25 \text{ s}^{-1}$ ; and in the presence of  $\text{CaCl}_2$  (c) with concentration of 10 mM at different shear rates, (d) with different concentrations at shear rate of  $25 \text{ s}^{-1}$ , (experimental values and fits to the SOSK model).

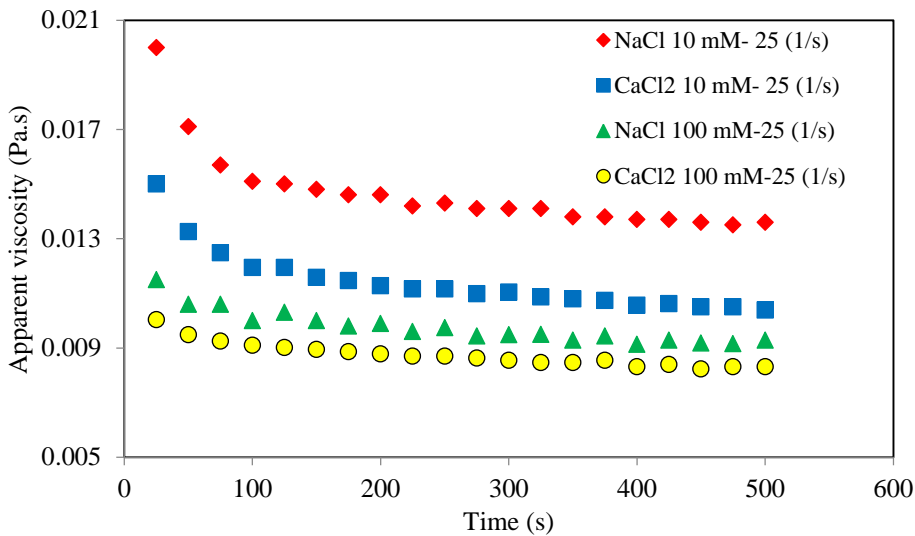
الکتروویسکوز سوم<sup>۲</sup> (اثر دافعه الکترواستاتیکی بین مولکولی) می‌گردد. پس در این حالت پلی‌ساکارید صمغ دانه مرو منقبض شده و ویسکوزیته کاهش می‌یابد.

### ۳.۳. تأثیر قند

در تمام کرنش‌های مورد آزمایش، رفتار تیکسوتروپ دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو در حضور قندهای گلوکز و ساکارز (شکل ۵) مشاهده گردید. در کرنش  $25 \text{ s}^{-1}$  و بعد از ۵۰ s، به ترتیب حدود ۱۱/۴۲٪ و ۲۱/۱۴٪ افزایش در ویسکوزیته ظاهری در حضور قندهای گلوکز و ساکارز (۲٪، w/w) مشاهده گردید. در مقایسه با دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو در آب دیونیزه، نتایج نشان داد که در حضور قندهای گلوکز و ساکارز ویسکوزیته ظاهری افزایش یافت و همچنین افزایش غلظت قندها سبب افزایش ویسکوزیته ظاهری گردید. به عنوان مثال افزایش غلظت قند گلوکز از ۰ به ۲، ۴ و ۶٪، به ترتیب سبب افزایش ۱۱/۴۲، ۱۹/۲۷ و ۴۰/۷۳ درصدی در ویسکوزیته ظاهری پس از ۵۰ s اعمال کرنش  $25 \text{ s}^{-1}$  گردید (شکل ۵).

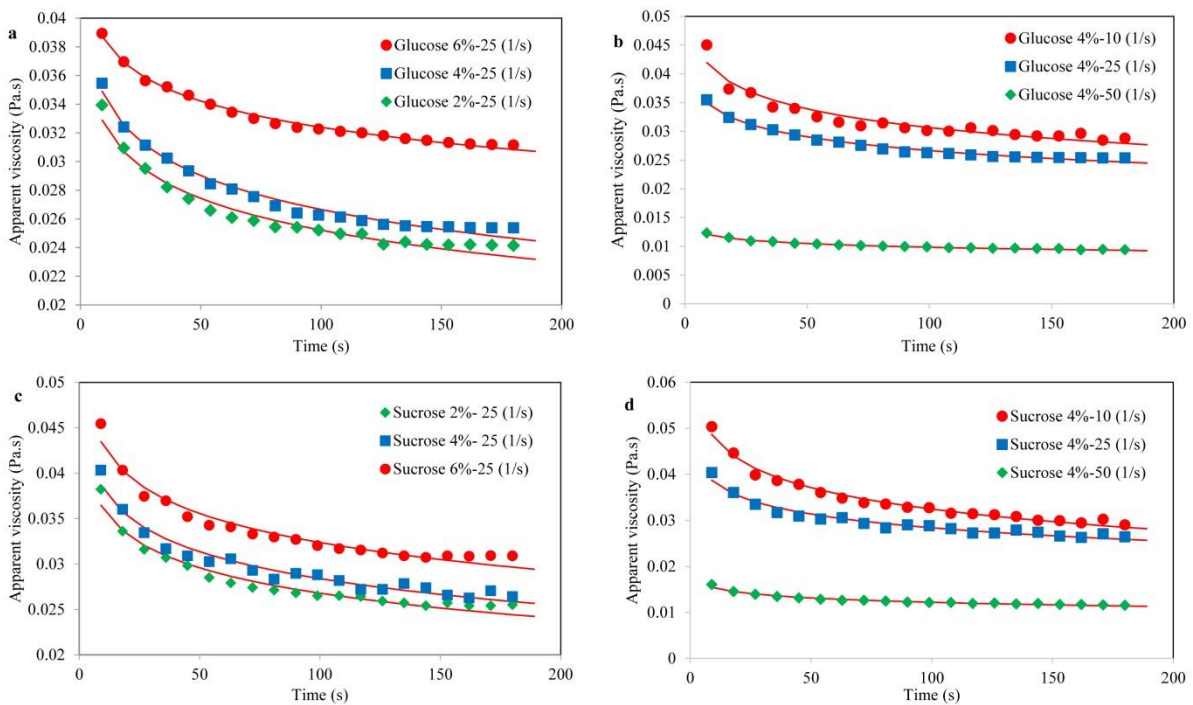
همانطور که در شکل (۴) قابل مشاهده است، در تمام کرنش‌ها و غلظت‌های نمک‌های مورد آزمایش، تأثیر کاتیون‌های دوظرفیتی کلسیم ( $\text{Ca}^{2+}$ ) بر روی کاهش میزان ویسکوزیته ظاهری دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو بیشتر از کاتیون‌های تک ظرفیتی سدیم ( $\text{Na}^+$ ) بود. نتایج مشابهی در مورد تأثیر نمک‌های تک و دو ظرفیتی بر روی خصوصیات وابسته به تنش برشی<sup>۱</sup> و همچنین محلول‌های رقیق صمغ دانه مرو [۷، ۱۰، ۱۲]، خصوصیات رئولوژیکی صمغ *Opuntia ficus-indica* [۳۳]، و خصوصیات محلول رقیق صمغ دانه بالنگو [۲۶] گزارش شده است. بر عکس، تفاوت خاصی در مورد تأثیر نمک‌های کلرید سدیم و کلسیم بر روی ویسکوزیته ظاهری صمغ دانه شاهی مشاهده نشده است [۲۲]. بیان شده است که کاتیون‌ها در محلول‌ها بر روی نیروهای دفع کننده و جذب کننده بین مولکولی تأثیرگذارند، بنابراین قدرت ژل و ویسکوزیته بهینه هیدروکلوئید می‌تواند در یک نسبت خاص از کاتیون‌ها و غلظت پلیمر بدست آید [۳۹]. نویسندگان معتقدند که در حضور نمک، محو شدن بارهای گروه‌های هیدروکسیل (OH) پلیمر صمغ دانه مرو افزایش می‌یابد که این مساله به نوبه خود سبب کاهش اثر





شکل (۴) ویسکوزیته ظاهری صمغ دانه مرو در حضور کاتیون تک ظرفیتی کلرید سدیم و کاتیون دوظرفیتی کلرید کلسیم در غلظت‌های ۱۰ و ۱۰۰ mM

Fig 4. Apparent viscosity of sage seed gum (SSG) in the presence of mono (NaCl) and divalent (CaCl<sub>2</sub>) cations at concentrations of 10 and 100 mM.

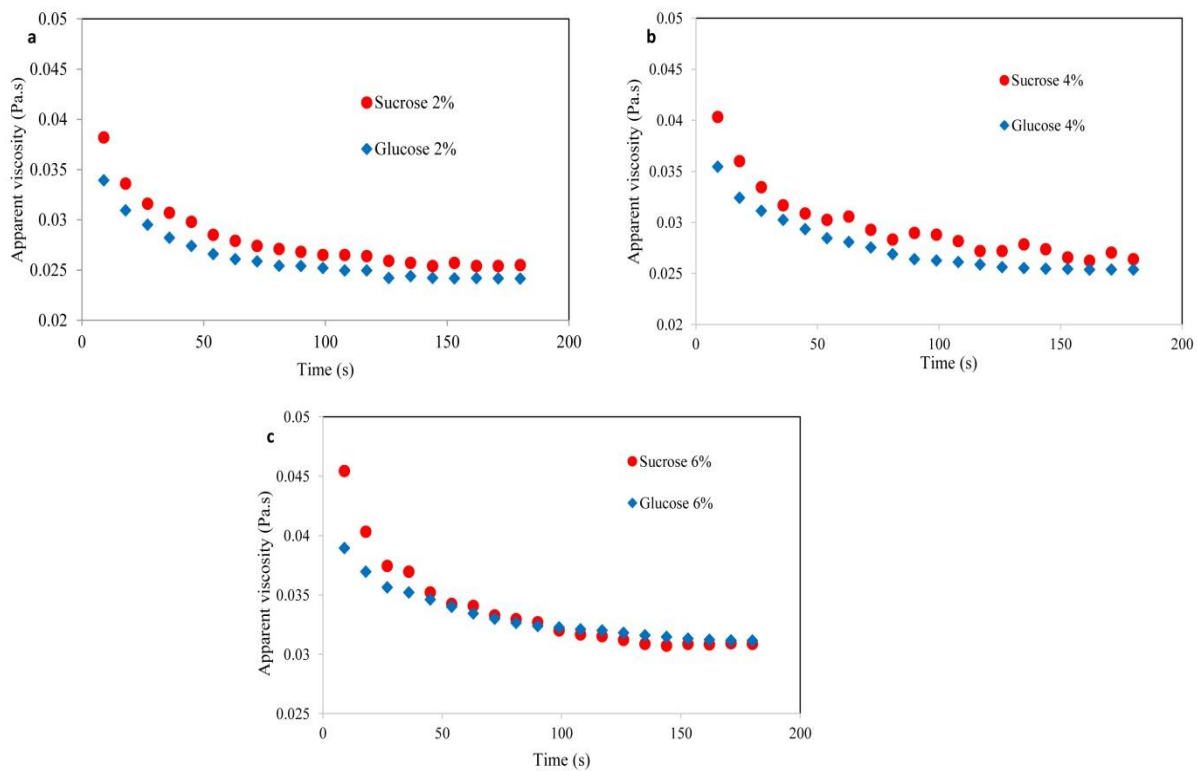


شکل (۵) ویسکوزیته ظاهری محلول‌های صمغ دانه مرو به صورت تابعی از زمان در حضور (a) گلوکز با غلظت‌های مختلف و در کرنش ۲۵ s<sup>-1</sup>، (b) گلوکز با غلظت ۴٪ و در کرنش‌های مختلف، (c) ساکارز با غلظت‌های مختلف و در کرنش ۲۵ s<sup>-1</sup>، (d) ساکارز با غلظت ۴٪ و در کرنش‌های مختلف، داده‌های آزمایشگاهی که توسط مدل ولتمن برازش داده شده‌اند.

Fig 5. Apparent viscosity of sage seed gum (SSG) solutions as a function of shearing time in the presence of glucose (a) with different concentrations at shear rate of 25 s<sup>-1</sup>, (b) with concentration of 4% at different shear rates; in the presence of sucrose (c) with different concentrations at shear rate of 25 s<sup>-1</sup> and (d) with concentration of 4% at different shear rates (experimental values and fits to the Weissenberg-Rabinowitsch model).

تهیه دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو با افزودن مولکول‌های قندی به آن افزایش می‌یابد که در این بین تأثیر قند ساکارز بیشتر بود. مشابه با نتایج بدست آمده در این تحقیق، ازدمیر و صادیکلو [۴۱] گزارش کرده‌اند که مولکول‌های قندی با وزن بالاتر به طور موثرتری باعث افزایش ویسکوزیته محلول‌های کاراگینان می‌شوند. برخی از محققین نیز افزایش ویسکوزیته محلول‌های بیوپلیمری را در حضور قندهای گلوکز [۱۲، ۲۷]، ساکارز [۲۲، ۴۴-۴۲] و لاکتوز [۲۲، ۲۳، ۲۷] بیان نموده‌اند.

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌گردد، تأثیر قند دی‌ساکاریدی ساکارز در افزایش ویسکوزیته ظاهری دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو بارزتر از اثر قند مونوساکاریدی گلوکز و از لحاظ آماری این اختلاف معنی‌دار بود ( $P < 0.05$ ). مازرکویچ و همکاران [۴۰] دریافتند که ویسکوزیته محلول‌های دکستران در حضور مولکول‌های قندی و با افزایش غلظت قند افزایش می‌یابد، که به نظر آن‌ها این مساله به دلیل تغییر در فعالیت آبی محلول می‌باشد تا برهمکنش بین مولکول‌های قندی با زنجیره‌های پلیمر. این موضوع به این معناست که کیفیت حلال برای



شکل (۶) تأثیر قندهای مختلف در غلظت‌های (a) ۲٪، (b) ۴٪ و (c) ۶٪ بر روی ویسکوزیته ظاهری صمغ دانه مرو در کرنش  $25 \text{ s}^{-1}$

Fig 6. Effect of sugars at concentrations of (a) 2%, (b) 4% and (c) 6% on apparent viscosity of sage seed gum (SSG) at shear rate of  $25 \text{ s}^{-1}$ .

مدلسازی گردید. مقادیر بالای ضریب تبیین، بعلاوه مقادیر پائین جذر میانگین مربعات خطا ( $R^2=0.918-0.987$ ) و  $\text{RMSE}=0.003-0.017$  بدست آمده از فرایند مدلسازی رئولوژیکی دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو در حضور یون‌های نمکی به وسیله مدل سینتیک ساختار درجه دوم نسبت به مدل ولتمن سبب شد تا نتایج این مدل در این قسمت مورد

#### ۴.۳. مدلسازی رئولوژیکی

##### ۴.۳.۱. مدلسازی برای محلول‌های نمکی صمغ دانه مرو

داده‌های بدست آمده برای رفتار جریان وابسته به زمان دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو به وسیله مدل سینتیک ساختار درجه دوم (معادله ۳) و مدل ولتمن (معادله ۴)

برش افزایش یافت، درحالی که در مورد دیسپرسیون‌های صمغ دانه بالنگو وابستگی به سرعت برش مشاهده نشد. نتایج نشان داد که در یک غلظت و سرعت برش ثابت، مقدار پارامتر  $k$  بدست آمده برای دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو در حضور یون‌های دو ظرفیتی کلسیم بزرگتر از مقدار آن در حضور یون‌های تک ظرفیتی سدیم بود (حدود ۳۰-۲۰٪ در غلظت ۱۰۰ mM نمک‌ها). همچنین غلظت نمک‌ها اثر مستقیمی بر سرعت شکست دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو داشت و این میزان تا ۵۰٪ افزایش نشان داد. پارامتر مقدار شکست ساختار ( $\eta_0/\eta_\infty$ ) نیز تحت تأثیر نوع نمک، غلظت نمک و مقدار کرنش اعمال شده بر دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو قرار داشت (جدول ۲).

بحث قرار گیرد. تأثیر یون‌های کلرید سدیم و کلسیم در غلظت‌های مختلف بر پارامترهای مدل سینتیک ساختار درجه دوم در جدول (۲) نشان داده شده است. به طور خلاصه، پارامتر  $k$  معیاری از سرعت شکست تیکسوتروپیک می‌باشد و پارامتر نسبت ویسکوزیته ظاهری اولیه به ویسکوزیته ظاهری حالت پایدار ( $\eta_0/\eta_\infty$ ) می‌تواند به عنوان شاخصی برای میزان شکست ساختار در نظر گرفته شود. فارغ از تأثیر نوع نمک مورد آزمایش، میزان پارامتر  $k$  با افزایش سرعت برش از  $10 \text{ s}^{-1}$  به ۵۰ افزایش یافت. برای مثال، این پارامتر به میزان ۳۳/۳۳٪ و ۳۸/۴۶٪ به ترتیب برای دیسپرسیون‌های حاوی ۵۰ mM نمک کلرید سدیم و کلرید کلسیم افزایش نشان داد. رضوی و کاراژیان [۳] بیان کردند که پارامتر  $k$  برای محلول‌های ثعلب با افزایش سرعت

جدول (۲) پارامترهای مدل سینتیک ساختار درجه دوم برای محلول‌های نمکی صمغ دانه مرو

Table 2. The parameters of second-order structural kinetic model for sage seed gum (SSG) in the salt solutions

Salt type/concentration نوع نمک/غلظت	Shear rate ( $\text{s}^{-1}$ ) سرعت برش	$k$ ( $\text{s}^{-1}$ )	$\eta_0/\eta_\infty$	$R^2$ ضریب تبیین	RMSE جذر میانگین مربعات خطا
Control sample نمونه کنترل	10	0.013	1.93	0.976	0.011
	25	0.014	1.64	0.977	0.010
	50	0.016	1.59	0.986	0.017
NaCl 10 mM کلرید سدیم ۱۰ میلی مولار	10	0.012	1.80	0.964	0.008
	25	0.014	1.67	0.975	0.004
	50	0.019	1.48	0.987	0.008
NaCl 50 mM کلرید سدیم ۵۰ میلی مولار	10	0.012	1.74	0.967	0.011
	25	0.013	1.72	0.966	0.009
	50	0.016	1.35	0.971	0.006
NaCl 100 mM کلرید سدیم ۱۰۰ میلی مولار	10	0.014	1.63	0.918	0.007
	25	0.016	1.51	0.941	0.004
	50	0.020	1.43	0.980	0.008
CaCl <sub>2</sub> 10 mM کلرید کلسیم ۱۰ میلی مولار	10	0.013	1.84	0.951	0.006
	25	0.014	1.79	0.964	0.005
	50	0.020	1.72	0.984	0.006
CaCl <sub>2</sub> 50 mM کلرید کلسیم ۵۰ میلی مولار	10	0.013	1.55	0.978	0.004
	25	0.015	1.51	0.966	0.009
	50	0.018	1.22	0.963	0.003
CaCl <sub>2</sub> 100 mM کلرید کلسیم ۱۰۰ میلی مولار	10	0.017	1.34	0.956	0.009
	25	0.021	1.27	0.987	0.010
	50	0.024	1.18	0.955	0.011

تا نتایج این مدل در این قسمت مورد بررسی قرار گیرد. نتایج بدست آمده برای مدل ولتمن در شرایط مختلف که نشان می‌دهد دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو در حضور مولکول‌های قند دارای رفتار تیکسوتروپ می‌باشند، در جدول (۳) نشان داده شده است. در مورد پارامتر تنش برشی اولیه (A) نتایج نشان داد که نوع و غلظت قندها دارای اثر معنی‌داری بر این پارامتر بودند ( $P < 0.05$ )، در حالی که در مورد پارامتر ضریب زمان شکست تیکسوتروپ (B) چنین اثر معنی‌داری مشاهده نشد ( $P > 0.05$ ). با افزایش کرنش میزان پارامتر A و B دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو در حضور قندها به ترتیب افزایش و کاهش یافت. ابو-جدیل و همکاران [۳۰] دریافتند که برای دیسپرسیون‌های نشاسته گندم هر دوی این پارامترها با افزایش کرنش کاهش یافتند. نتایج نشان داد که برای محلول‌های حاوی ۰.۴٪ قند گلوکز و ساکارز به ترتیب حدود ۳۵/۲۵٪ و ۴۵/۹۰٪ افزایش در پارامتر A و ۱۳/۲۱٪ و ۱۲/۶۸٪ کاهش در پارامتر B با افزایش سرعت برش از  $10^{-1}$  s<sup>-1</sup> به ۵۰ مشاهده گردید. نتایج مشابهی برای دیسپرسیون‌های نشاسته گندم در حضور گلوکز گزارش گردیده است [۳۰]. در کرنش  $25 \text{ s}^{-1}$ ، افزایش غلظت مولکول‌های قندی گلوکز و ساکارز از ۲ به ۶٪ به ترتیب ۱۱/۳۱٪ و ۱۶/۹۴٪ افزایش در پارامتر A و ۱۶/۴۶٪ و ۷/۴۴٪ کاهش در پارامتر B را سبب گردید. ابو-جدیل و همکاران [۳۰] بیان کردند که با افزایش غلظت گلوکز از ۰ به ۶٪، پارامترهای A و B مربوط به دیسپرسیون‌های نشاسته گندم کاهش یافتند. نتایج نشان داد که بالاترین مقادیر برای پارامترهای A و B مدل ولتمن، برای دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو در حضور ساکارز بدست آمد. در غلظت ۰.۴٪ و در کرنش  $25 \text{ s}^{-1}$ ، مقادیر پارامترهای A و B دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو حاوی ساکارز به ترتیب ۱۳/۵۰٪ و ۲۵/۸۸٪ بیشتر از دیسپرسیون‌های حاوی گلوکز بود. صالحی و همکاران [۲۷] گزارش دادند که در حضور ساکارز شاخص سودوپلاستیسیته محلول صمغ دانه بالنگو افزایش و در حضور گلوکز این شاخص کاهش یافت.

با افزایش کرنش از  $10 \text{ s}^{-1}$  تا ۵۰، این پارامتر برای نمونه کنترل (دیسپرسیون صمغ دانه مرو در آب دیونیزه) حدود ۱۷/۶۲٪ کاهش نشان داد. در یک غلظت و سرعت برش ثابت، نتایج نشان داد که میزان شکست ساختار ( $\eta_0/\eta_\infty$ ) برای دیسپرسیون‌های حاوی نمک کلرید کلسیم به طور معنی‌داری کمتر از دیسپرسیون‌های حاوی نمک کلرید سدیم بود ( $P < 0.05$ ). این موضوع بدین معنی است که تفاوت مقادیر  $\eta_0$  و  $\eta_\infty$  در حضور یون دوظرفیتی کلسیم کمتر از این میزان در حضور یون تک ظرفیتی سدیم است [۴۵، ۱۷]. همچنین نتایج نشان داد که مقدار پارامتر  $\eta_0/\eta_\infty$  برای نمونه‌های دیسپرسیون صمغ دانه مرو با افزایش غلظت نمک‌های مورد آزمایش کاهش یافت. برای مثال، در کرنش  $25 \text{ s}^{-1}$ ، با افزایش غلظت نمک از ۱۰ mM به ۱۰۰، مقدار پارامتر  $\eta_0/\eta_\infty$  برای دیسپرسیون‌های در حضور یون کلسیم از مقدار ۱/۷۹ به مقدار ۱/۲۷ کاهش یافت. نتیجه یک مطالعه بر روی دیسپرسیون‌های صمغ دانه *A. homolocarpum* نشان داده است که مقدار پارامتر  $\eta_0/\eta_\infty$  با افزایش کرنش کاهش یافته است، در حالی که این پارامتر تحت تأثیر غلظت و دمای مورد آزمایش قرار نگرفته است [۳۴]. تحقیقات زیادی تأثیر بیشتر نمک‌ها در غلظت‌های بالاتر را بر روی پارامترهای رئولوژیکی محلول‌های هیدروکلوئیدی در نواحی مختلف رئولوژیکی از خود نشان داده‌اند [۷، ۱۲، ۲۲، ۲۷، ۴۵].

### ۲.۴.۳. مدلسازی برای محلول‌های قندی صمغ دانه مرو

داده‌های بدست آمده برای رفتار جریان وابسته به زمان دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو در محلول‌های قندی به وسیله مدل سینتیک ساختار درجه دوم (معادله ۳) و مدل ولتمن (معادله ۴) مدلسازی گردید. مقادیر بالای ضریب تبیین، بعلاوه مقادیر پائین جذر میانگین مربعات خطا ( $R^2 = 0.921 - 0.993$  و  $RMSE = 0.003 - 0.020$ ) بدست آمده از فرایند مدلسازی رئولوژیکی این محلول‌ها توسط مدل ولتمن نسبت به مدل سینتیک ساختار درجه دوم سبب شد

جدول (۳) پارامترهای مدل ولتمن برای محلول های قندی صمغ دانه مرو

Table 3. The parameters of Weltman model for sage seed gum (SSG) in the sugar solutions

Sugar type/concentration نوع قند/غلظت	Shear rate (s <sup>-1</sup> ) سرعت برش	A (Pa)	-B (Pa)	R <sup>2</sup> ضریب تبیین	RMSE جذر میانگین مربعات خطا
Glucose 2% گلوکز ۲٪	10	0.788	0.084	0.976	0.011
	25	0.999	0.079	0.969	0.011
	50	1.063	0.048	0.985	0.007
Glucose 4% گلوکز ۴٪	10	0.522	0.053	0.927	0.010
	25	1.059	0.085	0.983	0.009
	50	0.706	0.046	0.987	0.004
Glucose 6% گلوکز ۶٪	10	0.445	0.073	0.961	0.006
	25	1.112	0.066	0.993	0.004
	50	0.658	0.021	0.984	0.003
Sucrose 2% ساکارز ۲٪	10	0.913	0.103	0.954	0.017
	25	1.145	0.121	0.976	0.013
	50	1.538	0.093	0.972	0.019
Sucrose 4% ساکارز ۴٪	10	0.634	0.071	0.982	0.007
	25	1.202	0.107	0.961	0.018
	50	0.925	0.062	0.974	0.009
Sucrose 6% ساکارز ۶٪	10	0.760	0.078	0.921	0.020
	25	1.339	0.112	0.961	0.019
	50	0.998	0.064	0.988	0.003

ساکارز نسبت به قند موساکاریدی گلوکز بیشتر است. نتایج مشابهی در جدول (۴) برای پارامترهای b3 و b4 مدل درجه ۲ قابل مشاهده است. نتایج مشابهی در مورد کارایی بالای مدل نمایی در بیان وابستگی به غلظت صمغ دانه *Lepidium sativum* [۳۷]، کاراگینان، پکتین، ژلاتین، نشاسته و زانتان [۴۶] و صمغ دانه شاهی [۲۲] بدست آمده است.

#### ۴.۴.۳. وابستگی ویسکوزیته ظاهری به قدرت یونی

وابستگی خطی ویسکوزیته ظاهری در زمان کوتاه (۲۵ s) و زمان طولانی (۵۰۰ s) اعمال کرنش، مطابق با معادله (۸)، در برابر عکس جذر قدرت یونی برای دیسپرسیون های صمغ دانه مرو حاوی یون های سدیم و کلسیم در شکل (۷) نشان داده شده است. بر اساس معادله ذکر شده، پارامتر سفتی (S) و ویسکوزیته ظاهری در قدرت یونی بی نهایت ( $\eta_{\infty}$ ) قابل پیش بینی می باشد.

#### ۳.۴.۳. وابستگی ویسکوزیته ظاهری به غلظت قند

ثابت های مدل های رگرسیونی به کار برده شده (معادلات ۵-۷) برای بیان وابستگی ویسکوزیته ظاهری دیسپرسیون های صمغ دانه مرو به غلظت قندهای مورد آزمایش در دو زمان اعمال کرنش ۲۵ و ۱۸۰ ثانیه ای در کرنش s<sup>-1</sup> ۲۵ در جدول (۴) نشان داده شده است. بر اساس مقادیر ضریب تبیین محاسبه شده برای مدل ها، نتایج نشان داد که مدل های نمایی ( $R^2=0.978-0.992$ ) و درجه ۲ ( $R^2=0.980-0.995$ ) دارای کارایی بالایی در نشان دادن این وابستگی می باشند. بر اساس نتایج، تغییر خاصی در پارامتر a مدل ها مشاهده نگردید. در هر دو زمان اعمال کرنش بیان شده، پارامتر b2 برای دیسپرسیون های صمغ دانه مرو در حضور ساکارز بیشتر از این مقدار در حضور گلوکز بود. این موضوع بدین معنی است که وابستگی به غلظت دیسپرسیون های صمغ دانه مرو در حضور قند دی ساکاریدی

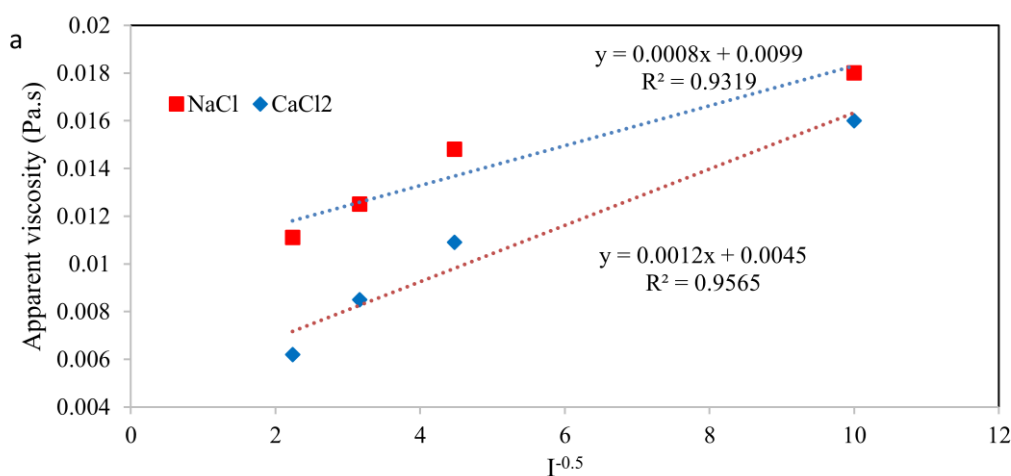
جدول (۴) ضرایب وابستگی به غلظت برای ویسکوزیته‌های محلول‌های صمغ دانه مرو بدست آمده در کرنش  $25 \text{ s}^{-1}$

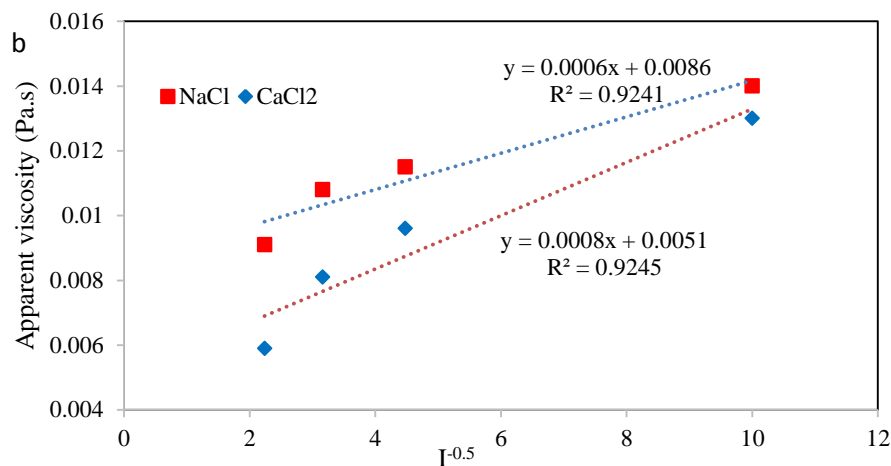
Table 4. Concentration dependence coefficients for viscosities of sage seed gum (SSG) solutions measured at the shear rate of  $25 \text{ s}^{-1}$

Power law model					
مدل قانون توان					
Sugar	Shearing time (s)	$a_1$	$b_1$	$R^2$	
قند	زمان اعمال کرنش				
Glucose	25	0.023	0.267	0.874	
گلوکز	180	0.019	0.277	0.911	
Sucrose	25	0.024	0.282	0.885	
ساکارز	180	0.019	0.297	0.873	
Exponential model					
مدل نمایی					
Sugar	Shearing time (s)	$a_2$	$b_2$	$R^2$	
قند	زمان اعمال کرنش				
Glucose	25	0.026	0.055	0.988	
گلوکز	180	0.021	0.056	0.978	
Sucrose	25	0.026	0.061	0.992	
ساکارز	180	0.022	0.064	0.984	
Quadratic model					
مدل درجه دو					
Sugar	Shearing time (s)	$a_3$	$b_3$	$b_4$	$R^2$
قند	زمان اعمال کرنش				
Glucose	25	0.0001	0.0007	0.026	0.995
گلوکز	180	4E-5	0.0010	0.021	0.980
Sucrose	25	0.0001	0.0012	0.027	0.993
ساکارز	180	8E-5	0.0013	0.022	0.989

سدیم به ترتیب  $9/9 \times 10^{-4}$  و  $8/6 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$  و برای نمونه های حاوی یون کلسیم به ترتیب  $5/1 \times 10^{-4}$  و  $4/5 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$  تعیین شد. بر اساس نتایج، پارامتر سفتی در حضور یون کلسیم بین  $50\%$  -  $30\%$  بیشتر از در حضور یون سدیم بود، در حالی که مقدار پارامتر  $\eta_{\infty}$  در حضور یون کلسیم بین  $55\%$  -  $40\%$  کمتر از مقدار بدست آمده در حضور یون سدیم گردید.

همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است، مقادیر پارامتر  $K$  پیش‌بینی شده در زمان کوتاه و طولانی اعمال کرنش برای دیسپرسیون‌های حاوی کلرید سدیم به ترتیب  $8 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$  و  $6 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$  برای دیسپرسیون‌های حاوی کلرید کلسیم به ترتیب  $12 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$  و  $8 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$  بود. همچنین مقادیر بدست آمده برای پارامتر  $\eta_{\infty}$  در زمان‌های اعمال کرنش کوتاه و طولانی برای نمونه‌های حاوی





شکل (۷) ویسکوزیته ظاهری صمغ دانه مرو به صورت تابعی از معکوس جذر قدرت یونی در زمان اعمال کرنش ۲۵ s (a) و ۱۸۰ s (b) در کرنش ۲۵ s<sup>-1</sup>.  
**Fig 7.** Apparent viscosity of sage seed gum (SSG) as a function of the inverse square root of ionic strength at shearing time of (a) 25 s and (b) 180 s at shear rate of 25 s<sup>-1</sup>.

نتایج بدست آمده از مدلسازی رئولوژیکی نشان داد که پارامترهای رئولوژیکی مربوط به محلول‌های نمکی و قندی صمغ دانه مرو بدست آمده توسط هر دو مدل تحت تأثیر نوع و غلظت این افزودنی‌ها بوده است. این امر نشان می‌دهد که رفتار رئولوژیکی وابسته به زمان سیستم‌های غذایی حاوی صمغ دانه مرو می‌تواند با استفاده از افزودنی‌هایی مانند برخی یون‌های نمکی و مولکول‌های قندی در غلظت مناسب تنظیم شده تا در نتیجه آن محصولی با کیفیت و رفتار جریان مناسب طراحی شود.

#### ۴. نتیجه گیری

در این مطالعه از مدل‌های رئولوژیکی سینتیک ساختار درجه دوم و ولتمن به دلیل کارایی بالاتر به ترتیب برای ارزیابی کمی رفتار تیکسوتروپ دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو در حضور برخی نمک‌ها و قندها استفاده گردید. نتایج نشان داد که اثر کاهشی یون‌های دو ظرفیتی کلسیم بر روی ویسکوزیته ظاهری دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو بیشتر از یون‌های تک ظرفیتی سدیم بود. بر اساس نتایج بدست آمده، تأثیر قند ساکارز در افزایش ویسکوزیته ظاهری دیسپرسیون‌های صمغ دانه مرو بیشتر از قند گلوکز بود.

#### منابع

- [1] Phillips, G. O., & Williams, P. A. (2009). Handbook of hydrocolloids: Elsevier.
- [2] Yousefi, A. R., Razavi, S. M. A., & Norouzy, A. (2015). In vitro gastrointestinal digestibility of native, hydroxypropylated and cross-linked wheat starches. *Food Funct.*, 6(9), 3126-3134.
- [3] Razavi, S. M. A., & Karazhiyan, H. (2009). Flow properties and thixotropy of selected hydrocolloids: experimental and modeling studies. *Food Hydrocolloid.*, 23(3), 908-912.
- [4] Garcia-Ochoa, F., & Casas, J. (1992). Viscosity of locust bean (*Ceratonia siliqua*) gum solutions. *J. Sci. Food Agr.*, 59(1), 97-100.
- [5] Zhang, L. M., Zhou, J. F., & Hui, P. S. (2005). A comparative study on viscosity behavior of water-soluble chemically modified guar gum derivatives with different functional lateral groups. *J. Sci. Food Agr.*, 85(15), 2638-2644.
- [6] Yousefi, A. R., Zahedi, Y., Razavi, S. M. A., & Ghasemian, N. (2017). Influence of sage seed gum on some physicochemical and rheological properties of wheat starch. *Starch-Stärke*, 69(11-12), 1600356.
- [7] Yousefi, A., Razavi, S. M., & Aghdam, S. K. (2014). Influence of temperature, mono- and divalent cations on dilute solution properties of sage seed gum. *Int. J. Biol. Macromol.*, 67, 246-253.

- [8] Bostan, A., Razavi, S. M. A., & Farhoosh, R. (2010). Optimization of hydrocolloid extraction from wild sage seed (*Salvia macrosiphon*) using response surface. *Int. J. Food Prop.*, 13(6), 1380-1392.
- [9] Razavi, S. M. A., Taheri, H., & Quinchia, L. A. (2011). Steady shear flow properties of wild sage (*Salvia macrosiphon*) seed gum as a function of concentration and temperature. *Food Hydrocolloid.*, 25(3), 451-458.
- [10] Razavi, S. M., Moghaddam, T. M., Emadzadeh, B., & Salehi, F. (2012). Dilute solution properties of wild sage (*Salvia macrosiphon*) seed gum. *Food Hydrocolloid.*, 29(1), 205-210.
- [11] Razavi, S. M. A., Taheri, H., & Sanchez, R. (2013). Viscoelastic characterization of sage seed gum. *Int. J. Food Prop.*, 16(7), 1604-1619.
- [12] Yousefi, A. R., Eivazlou, R., & Razavi, S. M. A. (2016). Steady shear flow behavior of sage seed gum affected by various salts and sugars: Time-independent properties. *Int. J. Biol. Macromol.*, 91, 1018-1024.
- [13] Razavi, S. M. A., Alghooneh, A., Behrouzian, F., & Cui, S. W. (2016). Investigation of the interaction between sage seed gum and guar gum: Steady and dynamic shear rheology. *Food Hydrocolloid.*, 60, 67-76.
- [14] Razavi, S. M. A., Alghooneh, A., & Behrouzian, F. (2018). Thermo-rheology and thermodynamic analysis of binary biopolymer blend: A case study on sage seed gum-xanthan gum blends. *Food Hydrocolloid.*, 77, 307-321.
- [15] Durairaj, R., Ekere, N. N., & Salam, B. (2004). Thixotropy flow behaviour of solder and conductive adhesive pastes. *J. Mater. Sci-Mater. El.*, 15(10), 677-683.
- [16] Razmkhah, S., Razavi, S. M. A., & Mohammadifar, M. A. (2017). Dilute solution, flow behavior, thixotropy and viscoelastic characterization of cress seed (*Lepidium sativum*) gum fractions. *Food Hydrocolloid.*, 63, 404-413.
- [17] Yousefi, A. R., & Razavi, S. M. A. (2016). Steady shear flow behavior and thixotropy of wheat starch gel: Impact of chemical modification, concentration and saliva addition. *J. Food process. Eng.*, 39, 31-43.
- [18] Weltmann, R. N. (1943). Breakdown of thixotropic structure as function of time. *J. Appl. Phy.*, 14(7), 343-350.
- [19] Steffe, J. F. (1996). *Rheological methods in food process engineering*: Freeman press.
- [20] Carbonell, E., Costell, E., & Duran, L. (1991). Rheological behaviour of sheared jams. Relation with fruit content. *J. Texture Stud.*, 22(1), 33-43.
- [21] Thebaudin, J.-Y., Lefebvre, A.-C., & Doublier, J.-L. (1998). Rheology of starch pastes from starches of different origins: applications to starch-based sauces. *LWT-Food Sci. Technol.*, 31(4), 354-360.
- [22] Behrouzian, F., Razavi, S. M. A., & Karazhiyan, H. (2013). The effect of pH, salts and sugars on the rheological properties of cress seed (*Lepidium sativum*) gum. *Int. J. Food Sci. Tech.*, 48(12), 2506-2513.
- [23] Behrouzian, F., Razavi, S. M. A., & Karazhiyan, H. (2014). Intrinsic viscosity of cress (*Lepidium sativum*) seed gum: Effect of salts and sugars. *Food Hydrocolloid.*, 35, 100-105.
- [24] Hesarinejad, M. A., Razavi, S. M. A., & Koocheki, A. (2015). *Alyssum homolocarpum* seed gum: Dilute solution and some physicochemical properties. *Int. J. Biol. Macromol.*, 81, 418-426.
- [25] Mao, C.-F., & Chen, J.-C. (2006). Interchain association of locust bean gum in sucrose solutions: An interpretation based on thixotropic behavior. *Food Hydrocolloid.*, 20(5), 730-739.
- [26] Amini, A. M., & Razavi, S. M. A. (2012). Dilute solution properties of Balangu (*Lallemantia royleana*) seed gum: Effect of temperature, salt, and sugar. *Int. J. Biol. Macromol.*, 51(3), 235-243.
- [27] Salehi, F., Kashaninejad, M., & Behshad, V. (2014). Effect of sugars and salts on rheological properties of Balangu seed (*Lallemantia royleana*) gum. *Int. J. Biol. Macromol.*, 67, 16-21.
- [28] Bak, J. H., & Yoo, B. (2018). Intrinsic viscosity of binary gum mixtures with xanthan gum and guar gum: Effect of NaCl, sucrose, and pH. *Int. J. Biol. Macromol.*, 111, 77-81.
- [29] Sherahi, M. H., Shadaei, M., Ghobadi, E., Zhandari, F., Rastgou, Z., & Hashemi, S. M. B. (2018). Effect of temperature, ion type and ionic strength on dynamic viscoelastic, steady-state and dilute-solution properties of *Descurainia sophia* seed gum. *Food Hydrocolloid.*, 79, 81-89.
- [30] Abu-Jdayil, B., Azzam, M., & Al-Malah, K. (2001). Effect of glucose and storage time on the viscosity of wheat starch dispersions. *Carbohydr. Polym.*, 46(3), 207-215.
- [31] Ma, J., Lin, Y., Chen, X., Zhao, B., & Zhang, J. (2014). Flow behavior, thixotropy and dynamical viscoelasticity of sodium alginate aqueous solutions. *Food Hydrocolloid.*, 38, 119-128.
- [32] 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 Hydrocolloid.*, 25(3), 293-298.
- [33] Medina-Torres, L., Brito-De La Fuente, E., Torrestiana-Sanchez, B., & Kathain, R. (2000). Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). *Food Hydrocolloid.*, 14(5), 417-424.



- [34] Koocheki, A., & Razavi, S. M. A. (2009). Effect of concentration and temperature on flow properties of *Alyssum homolocarpum* seed gum solutions: assessment of time dependency and thixotropy. *Food Biophys.*, 4(4), 353-364.
- [35] Zhang, L. M., Kong, T., & Hui, P. S. (2007). Semi-dilute solutions of hydroxypropyl guar gum: Viscosity behaviour and thixotropic properties. *J. Sci. Food Agr.*, 87(4), 684-688.
- [36] Ghannam, M. T., & Esmail, M. N. (1997). Rheological properties of carboxymethyl cellulose. *J. Appl. Polym. Sci.*, 64(2), 289-301.
- [37] 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 Hydrocolloid.*, 23(8), 2062-2068.
- [38] Wei, Y., Wang, C., & Wu, J. (2001). Flow properties of fruit fillings. *Food Res. Int.*, 34(5), 377-381.
- [39] Lin, H.-Y., & Lai, L.-S. (2009). Isolation and viscometric characterization of hydrocolloids from mulberry (*Morus alba* L.) leaves. *Food Hydrocolloid.*, 23(3), 840-848.
- [40] Mazurkiewicz, J., Rębilas, K., & Tomasik, P. (2006). Dextran—low-molecular saccharide sweetener interactions in aqueous solutions. *Food Hydrocolloid.*, 20(1), 21-23.
- [41] Ozdemir, M., & Sadikoglu, H. (1998). Characterization of rheological properties of systems containing sugar substitutes and carrageenan. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 33(5), 439-444.
- [42] Koocheki, A., Mortazavi, S. M. A., Shahidi, F., Razavi, S. M., & Taherian, A. (2009). Rheological properties of mucilage extracted from *Alyssum homolocarpum* seed as a new source of thickening agent. *J. Food Eng.*, 91(3), 490-496.
- [43] Wang, B., Wang, L.-J., Li, D., Özkan, N., Li, S.-J., & Mao, Z.-H. (2009). Rheological properties of waxy maize starch and xanthan gum mixtures in the presence of sucrose. *Carbohydr. Polym.*, 77(3), 472-481.
- [44] Yang, Z., Yang, H., & Yang, H. (2018). Effects of sucrose addition on the rheology and microstructure of  $\kappa$ -carrageenan gel. *Food Hydrocolloid.*, 75, 164-173.
- [45] Nguyen, Q. D., Jensen, C. T., & Kristensen, P. G. (1998). Experimental and modelling studies of the flow properties of maize and waxy maize starch pastes. *Chem. Eng. J.*, 70(2), 165-171.
- [46] Marcotte, M., Hoshahili, A. R. T., & Ramaswamy, H. (2001). Rheological properties of selected hydrocolloids as a function of concentration and temperature. *Food Res. Int.*, 34(8), 695-703.

*Research Article***Time-dependent (thixotropic) rheological behavior of sage seed gum in the presence of some salts and sugars**

Alireza Yousefi<sup>1\*</sup>, Shahla Khodabakhshaghdam<sup>2</sup>, Seyed Mohammad Ali Razavi<sup>3</sup>, Javad Tavakoli<sup>4</sup>, Ghader Hosseinzadeh<sup>5</sup>

1. Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Bonab
2. Ph.D. Graduate, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Bonab
3. Full Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
4. Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Jahrom University
5. Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Bonab

**Abstract**

In this study, the time-dependent (thixotropic) rheological behavior of sage seed gum (SSG) dispersions in the presence of NaCl and CaCl<sub>2</sub> salts (0, 10, 50 and 100 mM), and glucose and sucrose sugars (0%, 2%, 4% and 6%) at different shear rates (10-50 s<sup>-1</sup>) was investigated. SSG dispersions exhibited a thixotropic behavior at all the conditions examined. The data obtained from rheological measurements were fitted well to the second-order structural kinetic (SOSK) model for salt solutions ( $R^2 = 0.918-0.987$ ,  $RMSE = 0.003-0.017$ ) and Weltman model for sugar solutions ( $R^2 = 0.921-0.993$ ,  $RMSE = 0.003-0.020$ ). The structural breakdown rate ( $k$ ) and the structural breakdown extent ( $\eta_0/\eta_\infty$ ) values obtained for SSG in CaCl<sub>2</sub> solutions were greater and lower than those of NaCl, respectively. Among the salt solutions, the SSG dispersions containing 10 mM NaCl have the greatest initial shear stress ( $A$ ) and time coefficient of thixotropic breakdown ( $B$ ) values. The chain stiffness ( $S$ ) value in the presence of Ca<sup>2+</sup> ( $8 \times 10^{-4} - 12 \times 10^{-4} \text{ M}^{0.5} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$ ) was greater than that of Na<sup>+</sup> ( $6 \times 10^{-4} - 8 \times 10^{-4} \text{ M}^{0.5} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$ ). For sugar solutions of SSG, the greatest value of  $k$  was obtained for sucrose and the  $\eta_0/\eta_\infty$  parameter diminished with increasing shear rate. Sugar concentration had a direct and indirect relationships with  $A$  and  $B$  parameters, respectively. The results of current study revealed that the thixotropic behaviour of SSG solutions is remarkably influenced by the salts and the sugars, so this issue can be considered in food product processing.

**Keywords:** Sage seed gum, Rheology, Thixotropic behavior, Modeling

---

\* Corresponding author: a\_yousefi@ubonab.ac.ir