



## بررسی ویژگی های فیزیکوشیمیایی و رئولوژیکی نانوکمپلکس تهیه شده از کازئینات سدیم و صمغ دانه بالنگو

رقیه عزتی<sup>۱</sup>، لیلا روزبه نصیرایی<sup>۱</sup>، سارا جعفریان<sup>۱</sup>، مسعود دزیانی<sup>۲</sup>، فاطمه شهدادی<sup>۳</sup>

۱- گروه صنایع غذایی، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران

۲- گروه صنایع غذایی، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران

۳- گروه صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

### اطلاعات مقاله

### چکیده

#### تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹

تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵

#### کلمات کلیدی:

نانوکمپلکس،

صمغ بالنگو،

کازئینات سدیم،

ویژگی های رئولوژیکی،

هموژنیزاسیون.

DOI: 10.48311/fsct.2026.116950.82884

\* مسئول مکاتبات:

هدف از این مطالعه تهیه و تعیین ویژگی های نانوکمپلکس بیوپلیمری حاوی کازئینات سدیم و صمغ دانه بالنگو بود. جهت تولید نانوکمپلکس از میزان ۰/۵ درصد کازئینات سدیم و ۰، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد صمغ بالنگو استفاده شد. سه نوع کمپلکس با درصد صمغ بالنگوی متفاوت تولید شده از نظر کدورت، اندازه ذرات، پتانسیل زتا و همچنین تنش برشی و ویسکوزیته و برآزش داده های رئولوژیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، کمپلکس کازئینات سدیم و ۰/۵ درصد صمغ بالنگو به عنوان کمپلکس برتر انتخاب گردید. علاوه بر آن تاثیر نوع هموژنیزاتور (تک مرحله ای، دو مرحله ای و ۲ بار عبور) و فشار هموژنیزاسیون (۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ بار) در pH های ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ بر میزان کدورت کمپلکس انجام شد. pH انتخاب شده ۳/۵ در نظر گرفته شد و نمونه در pH معادل ۳/۵، تحت تاثیر نوع و فشار هموژنیزاتور قرار گرفته و ویژگی های آن مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج، کمترین میزان کدورت (جذب) مربوط به نمونه کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ بالنگو تحت هموژنیزاسیون دوبر عبور و فشار ۵۰۰ بار (۰/۴۸) بود. بیشترین پتانسیل منفی زتا، مربوط به نمونه ای است که تحت هموژنیزاسیون دوبر عبور در فشار ۷۰۰ بار قرار گرفته (۳۵/۳۳- میلی ولت) بود. کمترین اندازه ذرات مربوط به نمونه ای است که تحت هموژنیزاسیون دوبر عبور در فشار ۷۰۰ بار (۳۹۶.۶۶ نانومتر) قرار گرفته است. در تمامی موارد مورد بررسی میزان  $R^2$  بالا و میزان RMSE پایین بود که این امر نشان دهنده رفتار سودوپلاستیک در نمونه های کمپلکس می باشد.

## ۱-مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از نانوذرات بیوپلیمری، در سیستم‌های غذایی و دارویی به عنوان عامل انکپسولاسیون (درون پوشانی) برای ترکیبات زیست فعال و غذا-داروها (مانند ویتامین‌ها، کاروتنوئیدها، اسیدهای چرب ضروری، فلاوونوئیدها، استرول‌ها و غیره) مورد توجه زیادی قرار گرفته است و در سیستم‌های رهایشی و دارورسانی برای انتقال هدف دار، کاربردهای زیادی پیدا کرده اند. نانو ذرات یا به تنهایی از طریق تجمع و به هم پیوستن زنجیرهای یک نوع بیوپلیمر (پروتئین یا پلی ساکارید) و یا از طریق کنترل اتصال و کمپلکس شده مولکول‌های پروتئین و پلی ساکارید تولید می گردند. نانو کمپلکس‌های پروتئین-پلی ساکارید، به علت حفاظت شیمیایی و کلئیدی بالاتر، نسبت به نانوذرات بیوپلیمری خالص توجه بیشتری را معطوف خود کرده اند [۱].

توجه به انواع سامانه‌های ریزپوشانی و یافتن ترکیبات جدید ارزان، قابل دسترس و موثر در این زمینه و ایجاد ترکیبات غذایی عملگر می‌تواند راهی برای دستیابی به تغذیه سالم‌تر و در نهایت تامین سلامت جامعه شود. استفاده از ترکیبات جدید برای دیواره که علاوه بر تحت تاثیر قرار دادن ویژگی‌های محصول، دارای خواص کاربردی، ارزان و در دسترس باشند در این تحقیق مورد توجه قرار خواهد گرفت. موسیلاژهای دانه ای و پلی ساکاریدهای گیاهی در این دسته قرار دارند. بالنگو با نام علمی *royleana* گیاهی لعابدار از تیره نعناعیان است که در مناطق مختلف جهان به خصوص کشورهای شرق میانه رشد می کند. دانه بالنگو به شکل بیضی کشیده می‌باشد که در آسیا و شمال اروپا امکان کشت و برداشت آن وجود دارد و در ایران عموماً از آن به‌عنوان تخم شربت‌ی یاد می‌شود. دانه بالنگو اگر در آب خیس شود، مایع چسبناک، کدر و بی‌مزه‌ای (موسیلاژ) ایجاد می‌کند. به علت تولید مقادیر بالای موسیلاژ، این دانه می‌تواند به‌عنوان یک منبع جدید هیدروکلئوئید در صنعت مواد غذایی برای اهداف مختلف به کار رود [۲]. صمغ دانه بالنگو شامل ۶۱/۷۴ درصد

کربوهیدرات، ۰/۸۷ درصد پروتئین، ۲۹ درصد فیبر خام و ۸/۳۳ درصد خاکستر است [۳]. کازئینات سدیم، نمک سدیم کازئین است که دارای طعم خوشایندی بوده و به دلیل قابلیت تشکیل پیوندهای وسیع هیدروژنی بین مولکولی، به راحتی می‌تواند محلول‌های آبدار تشکیل دهد. این ماده تا حد زیادی محلول بوده و خیلی سریع در یک مخلوط آبی پخش می‌شود و در حضور روغن و چربی نیز همگن می‌گردد. پوشش‌ها و فیلم‌های کازئینی به عنوان ماده میکروکپسوله‌کننده طعم، دارو، پوشش میوه‌جات و سبزیجات و پنیر استفاده می‌شوند. کازئینات سدیم به راحتی می‌تواند از یک محلول آبی فیلم تشکیل دهد. به دلیل ساختار کازئین و توالی اسیدآمینه، پیوندهای هیدروژنی، واکنش‌های الکتروستاتیکی و نیروهای هیدروفوبی، در تشکیل فیلم مؤثر می‌باشد [۴].

تشکیل کمپلکس‌های الکتروستاتیک بین کازئینات سدیم و صمغ‌هایی مانند بالنگو، امکان توسعه سیستم‌های دارورسانی پایدار را فراهم می‌کند. این کمپلکس‌ها به کپسوله کردن ترکیبات حساس کمک می‌کنند و خواص رئولوژیکی مطلوبی را برای ماتریس‌های لبنی فراهم می‌کنند [۵].

پژوهش‌ها نشان داده است که استفاده از بیوپلیمرهای طبیعی مانند سدیم آلژینات، کیتوزان، صمغ کتیرا، صمغ عربی و مالتودکسترین، بسته به نوع ترکیب هدف، ویژگی‌های ماتریس دیواره، روش فرآوری و شرایط محیطی، تأثیر چشمگیری بر بازده کپسوله‌سازی، پایداری ترکیب و رفتار رهایش دارند [۱]. در نهایت، اگرچه فناوری‌های نوین در افزایش بازده و پایداری ریزپوشانی موفق عمل کرده‌اند، اما چالش‌هایی نظیر ایمنی، حساسیت به شرایط محیطی و صنعتی‌سازی این فناوری‌ها همچنان وجود دارند نیاز به تحقیقات بیشتر در سطح کاربردی و کلینیکی احساس می‌شود. در این تحقیق، از روش هموزنیاسیون فشار بالا جهت تولید نانومولسیون استفاده شد؛ روشی که اگرچه در مطالعات متعددی برای نانو ساختارهای مختلف به کار رفته، اما تاکنون تأثیر آن بر سامانه حاوی کمپلکس صمغ بالنگو و پروتئین کازئینات سدیم بررسی نشده است. بنابراین هدف

## ۲-۲-۲- آماده سازی نانوکمپلکس بالنگو و کازئینات سدیم

با اندازه گیری پتانسیل زتای محلول های صمغ بالنگو و کازئینات سدیم به عنوان تابعی از pH در محدوده ۳-۸ = pH بهینه تشکیل هیدروژل تعیین شد. تنظیم pH با استفاده از محلول سود و اسید صورت گرفت (آذری کیا و همکاران، ۲۰۱۵). سپس کازئینات سدیم (۵/۰ درصد) و محلول بالنگو در نسبت های مختلف (۰، ۲۵/۰ و ۵/۰ درصد) با هم مخلوط شد و پس از تنظیم pH تا میزان بهینه برای تهیه نانوکمپلکس، مخلوط حاصل از هموژنایزر فشار (HST-15DA366، آلمان) بالا عبور داده شد. تاثیر میزان فشار در تشکیل نانوهیدروژل در دو سطح بررسی و اندازه ذرات، ویژگی های رئولوژیکی، پتانسیل زتا، پایداری و میزان کدورت آن اندازه گیری شد و پیوندهای شیمیایی تشکیل شده با استفاده از اسپکتروسکوپی انتقال فوریه مادون قرمز<sup>۱</sup> (FTIR) تعیین گردید.

## ۲-۲-۳- ارزیابی خواص فیزیکوشیمیایی

### ۱-سنجش کدورت

اختلاط کامل نمونه ها با استفاده از همزن سرعت بالا قبل از اندازه گیری صورت می گیرد. اندازه گیری کدورت مخلوط نانوکمپلکس با استفاده از دستگاه طیف سنج مرئی-فرابنفش (T85، ایران) به عنوان تابعی از pH در محدوده ۳-۸ انجام شد [۸].

### ۲-سنجش اندازه ذرات

توزیع اندازه ذرات و قطر متوسط آنها در دستگاه زتا سایزر (Nano-ZS شرکت Malvern، انگلیس) اندازه گیری شد [۹].

### ۳-اندازه گیری پتانسیل زتا

این پژوهش، بهینه سازی ساخت این کمپلکس و ارزیابی ویژگی های فیزیکوشیمیایی آن پیش و پس از اعمال فشار بالا بود.

## ۲-مواد و روش ها

مواد شیمیایی مورد استفاده در این پژوهش شامل کازئینات سدیم (شرکت Sigma، نیوزلند)، هیدروکسید سدیم (شرکت Merck، آلمان)، اسید کلریدریک (شرکت Merck، آلمان) بودند.

بالنگو شیرازی مورد استفاده در این پژوهش از فروشگاه های عطاری سنتی تبریز خریداری شد و پس از آسیاب شدن توسط آسیاب (Sanyo ساخت ژاپن) و عبور دادن از الک آزمایشگاهی با مش شماره ۶۰، پودر حاصل در کیسه های زیپ دار برای انجام آزمایش ها در جای خشک و خنک نگهداری شد.

## ۲-۲-۱- آماده سازی محلول بالنگو و کازئینات سدیم

به مقدار مورد نظر از پودر بالنگو به آب مقطر افزوده شد و مخلوط به منظور جذب آب و به وجود آمدن بافت یکنواخت به مدت ۱۲ ساعت توسط همزن مغناطیسی (IKA-MAG HS 7، آلمان) در ۴۰۰۰ دور در دقیقه همزد و پس از ۱۰ دقیقه حرارت دادن در حمام آب گرم (کمک به جذب آب) با دمای ۷۰ درجه سانتی گراد، به منظور تکمیل شدن فرایند جذب آب به مدت ۱۲ ساعت در دمای یخچال نگهداری گردید [۶].

پودر کازئینات سدیم نیز پس از توزین به آب مقطر اضافه و پس از ۳۰ دقیقه اختلاط توسط همزن مغناطیسی جهت اطمینان از انحلال و آبگیری کامل یک شب در دمای ۴ درجه نگهداری شد [۷].

موقعیت، شکل و شدت پیک‌های حاصل از منحنی FTIR جزئیاتی درباره ساختار مولکولی نمونه را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری طیف IR از دستگاه FTIR (Agilent technologies Cary 360، آمریکا) استفاده شد. مقدار اندکی از نمونه (به صورت جامد یا مایع بسته به نوع نمونه) روی عدسی دستگاه قرار گرفته و طیف حاصل در محدوده عدد موجی  $4000-400 \text{ cm}^{-1}$  با قدرت تفکیک  $4 \text{ cm}^{-1}$  در دستگاه FTIR بررسی شد [۱۰].

#### ۲-۲-۵- بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی

برای اندازه‌گیری تنش برشی و گرانیروی به صورت تابعی از سرعت برشی و تعیین نوع رفتار جریانی نمونه‌ها از دستگاه رئومتر (Anton Paar- Rheolab QC، آلمان) استفاده شد. برای تعیین و پیش‌بینی رفتار جریانی در شرایط مختلف میزان برآزش داده‌های به دست آمده از آزمون‌های عملی با مدل‌های نیوتنی<sup>۲</sup>، قانون توان<sup>۳</sup>، بینگهام<sup>۴</sup>، هرشل-بالکلی<sup>۵</sup>، کاسن<sup>۶</sup> و سیسکو<sup>۷</sup> ارزیابی شد. سپس، مناسب‌ترین مدل ریاضی بر اساس شاخص‌های ضریب تعیین  $R^2$ ، RMSE و  $\chi^2$  انتخاب و نهایتاً شاخص‌های رئولوژیکی برای هر یک از نمونه‌ها گزارش گردید [۶]. برآزش داده‌ها با نرم افزار متلب<sup>۸</sup> انجام گرفت.

به منظور تعیین پتانسیل زتای نمونه‌ها از دستگاه زتا سائزر (Nano-ZS شرکت Malvern، انگلیس) استفاده شد. روش کار در این دستگاه، اندازه‌گیری پتانسیل زتا با استفاده از الکتروفورز داپلر لیزری است. منظور از الکتروفورز همان حرکت ذره باردار تعلیق تحت تاثیر میدان الکتریکی اعمال شده است. لذا، چنانچه تعلیق کلوئیدی رقیق شده‌ای در معرض میدان الکتریکی قرار گیرد و هم‌زمان یک پرتو لیزر از نمونه عبور داده شود، ذره باردار و یون‌هایی مستقر در تعلیق، به سمت الکتروود دارای بار الکتریکی مخالف حرکت می‌کنند. به این ترتیب، با به دست آمدن سرعت ذره، تحرک الکتروفورزی قابل محاسبه خواهد بود. در نهایت بر اساس روابط تعریف شده برقراری ارتباط بین تحرک الکتروفورزی و پتانسیل زتا امکان‌پذیر می‌گردد. به منظور اندازه‌گیری میزان پتانسیل زتا، هر یک از نمونه‌ها در مرحله اول با استفاده از آب مقطر ۱۰۰ برابر رقیق شدند. سپس، نمونه‌ها توسط سرنگی داخل لوله موئین (سل) منتقل و لوله موئین در محل تعبیه شده در داخل دستگاه قرار گرفت. اندازه‌گیری پتانسیل زتا در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) و توان ۱۴۹ وات انجام شد. نهایتاً میزان پتانسیل زتا توسط خود دستگاه طبق روابط مربوط محاسبه و به صورت عدد خالص گزارش گردید [۶].

#### ۲-۲-۴- اسپکتروسکوپی FTIR

تبدیل فوریه مادون قرمز روشی است که به کمک آن می‌توان ساختار شیمیایی مولکول‌ها را شناسایی و بررسی کرد. رابطه (۱): مدل نیوتنی

$$\sigma = \eta \dot{\gamma}$$

$$\sigma = \text{تنش برشی (Pa)}, \eta = \text{گرانروی (Pa.s)}, \dot{\gamma} = \text{سرعت برشی (s}^{-1}\text{)}.$$

6- Casson

7- Sisco

8- Matlab

2 Newtonian

3- Power law

4- Bingham

5-- Herschel-Bulkley

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} + \sigma_0 \quad \text{رابطه (۲): مدل بینگهام}$$

$\sigma$  = تنش برشی (Pa)،  $\eta$  = گرانروی (Pa.s)،  $\dot{\gamma}$  = سرعت برشی ( $s^{-1}$ ) و  $\sigma_0$  = تنش تسلیم.

$$\sigma = k \dot{\gamma}^n \quad \text{رابطه (۳): مدل توان}$$

$\sigma$  = تنش برشی (Pa)،  $k$  = شاخص قوام (Pa.sn)،  $n$  = شاخص قانون توان و  $\dot{\gamma}$  = سرعت برشی ( $s^{-1}$ ).

رابطه (۴): مدل هرشل-بالکلی

$$\sigma = k \dot{\gamma}^n + \sigma_0$$

$\sigma$  = تنش برشی (Pa)،  $k$  = ضریب قوام (Pa.sn)،  $n$  = ثابت شبه پلاستیک بودن،  $\dot{\gamma}$  = سرعت برشی ( $s^{-1}$ ) و  $\sigma_0$  = تنش تسلیم (Pa).

$$\sqrt{\sigma} = \eta_p \sqrt{\dot{\gamma}} + \sqrt{\sigma_0} \quad \text{رابطه (۵): مدل کاسن}$$

$\sigma$  = تنش برشی (Pa)،  $\eta_p$  = گرانروی ظاهری (Pa.s)،  $\dot{\gamma}$  = سرعت برشی ( $s^{-1}$ ) و  $\sigma_0$  = تنش تسلیم (Pa).

رابطه (۶): مدل سیسکو

$$\sigma = k \dot{\gamma}^n + \eta_\infty \dot{\gamma}$$

$\sigma$  = تنش برشی (Pa)،  $k$  = شاخص قوام (Pa.sn)،  $n$  = شاخص قانون توان،  $\dot{\gamma}$  = سرعت برشی ( $s^{-1}$ ) و  $\eta_\infty$  = گرانروی بی نهایت (Pa).

### ۳- نتایج و بحث

تاثیر pH و غلظت صمغ بالنگو بر رفتار فازی محلول

کازئینات سدیم (۰/۵ درصد) در جدول ۱ نشان داده شده است.

۳-۱- تاثیر pH و غلظت صمغ بالنگو بر رفتار فازی محلول کازئینات سدیم (۰/۵ درصد)

**Table 1- Effect of pH and concentration of balangu gum on the phase behavior of sodium caseinate solution (0.5%)**

Balangu concentration	pH	phase behavior
0	3	Solution
0.25	3	Precipitation with clear solution
0.5	3	Precipitation with cloudy solution
0	4	Solution
0.25	4	Cloudy/milky solution
0.5	4	Cloudy/milky solution
0	5	Precipitation with clear solution
0.25	5	Cloudy/milky solution
0.5	5	Cloudy/milky solution
0	6	Solution
0.25	6	Solution

0.5	6	Solution
0	7	Solution
0.25	7	Solution
0.5	7	Solution
0	8	Solution
0.25	8	Solution
0.5	8	Solution

رسوب داده است. صمغ بالنگو دارای ماهیت پلی ساکاریدی می باشد و در pH معادل ۵ در مخلوط با کازئینات سدیم، یک کمپلکس محلول شیری رنگ ایجاد می کند. Jourdain و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ دکستران پرداختند و گزارش نمودند که رسوب ایجاد شده در pH های ۳/۵ الی ۵ در غلظت پایین پلی ساکارید مربوط به رسوب نرمال کازئینات سدیم در اطراف pH ایزوالکتریک پروتئین می باشد و رسوب ایجاد شده در pH های ۲ الی ۳/۵ نشان دهنده تشکیل کمپلکس نامحلول با توجه به وجود جاذبه قوی بین دو بسپار زیستی توسط بارهای مخالف می باشد [۱۳].

۲-۳- نتایج میانگین میزان کدورت نانوکمپلکس کازئینات سدیم (۰/۵ درصد) و صمغ بالنگو تحت تاثیر pH نتایج میانگین میزان کدورت نانوکمپلکس کازئینات سدیم (۰/۵ درصد) و صمغ بالنگو تحت تاثیر pH و غلظت صمغ بالنگو در جدول ۲ نشان داده شده است.

طبق نتایج جدول ۱، با افزایش pH رفتار فازی کمپلکس حاوی کازئینات سدیم و صمغ بالنگو، به سمت حلالیت بیشتر پیش می رود. در pH های اسیدی در تمامی کمپلکس ها، محلول تقریباً ابری شکل است و با افزودن صمغ بالنگو به کمپلکس، محلولی ابری شکل و شیری رنگ حاصل می شود. رسوب اصولاً در pH های ایزوالکتریک رخ می دهد، محدوده pH ایزوالکتریک کازئینات که پروتئین نامحلول می باشد بین ۴ تا ۵ است. در pH ایزوالکتریک به علت برابر شدن بارهای مثبت ( $\text{NH}_3^+$ ) و منفی ( $\text{COO}^-$ ) پروتئین و ایجاد جاذبه الکترواستاتیکی بین بارهای ناهمنام، تجمع و ایجاد رسوب مشاهده می گردد. در pH های بالاتر و پایین تر از نقطه ایزوالکتریک به ترتیب غالب بودن بارهای منفی و مثبت و وجود دافعه الکترواستاتیک مانع از نزدیک شدن ذرات پروتئینی به یکدیگر و در نتیجه محلول شفاف و بدون رسوب مشاهده می گردد [۱۱، ۱۲].

با توجه به نتایج، در pH معادل ۳ با افزایش میزان صمغ بالنگو، به میزان ۰/۲۵ درصد محلول ابری شکل و با افزودن صمغ بالنگوی بیشتر، رسوب ابری شکل ایجاد می شود. کازئینات سدیم بدون صمغ بالنگو نیز فقط در pH معادل ۵ به صورت رسوب در آمد که نزدیک به نقطه ایزوالکتریک،

Table 2 - Turbidity of sodium caseinate nanocomplex (0.5%) and balangu under the influence of pH and balangu gum concentration

Sample	T1	T2	T3
pH			
3	0.25±0.01 <sup>Fe</sup>	0.5±0.03 <sup>Dc</sup>	0.55±0.01 <sup>Bbc</sup>
4	0.30±0.02 <sup>EFde</sup>	0.65±0.02 <sup>ABab</sup>	0.70±0.02 <sup>Aa</sup>
5	0.50±0.02 <sup>Dc</sup>	0.5±0.03 <sup>Dc</sup>	0.55±0.03 <sup>CDbc</sup>
6	0.35±0.03 <sup>Ed</sup>	0.55±0.01 <sup>CDbc</sup>	0.60±0.02 <sup>Bb</sup>
7	0.30±0.01 <sup>EFde</sup>	0.5±0.03 <sup>Dc</sup>	0.55±0.01 <sup>CDbc</sup>
8	0.25±0.02 <sup>Fe</sup>	0.55±0.02 <sup>CDbc</sup>	0.60±0.01 <sup>Bb</sup>

T1: Sodium caseinate nanocomplex and 0% balangu gum, T2: Sodium caseinate nanocomplex and 0.25% balangu gum, T3: Sodium caseinate nanocomplex and 0.5% balangu gum

Different lowercase letters in each row indicate significant differences between samples with different balangu concentrations and different uppercase letters in each column indicate significant differences at different pHs ( $p \leq 0.05$ ).

وجود نیروهای جاذبه، نیروهای واندرالس و الکترواستاتیکی بیان کرد. همواره احتمال اتصال پروتئین به پلی ساکارید از طریق گروه های  $N^+R_3$  و  $CSO_3^-$  یا  $COO^-$  وجود دارد [۹]. فرض بر این است که کاهش کدورت نتیجه تجمع در مقیاس بزرگ و رسوب بعدی نمونه های کازئینات است. تجمع کازئینات سدیم ممکن است به دلیل کاهش دافعه الکترواستاتیک بین پروتئین ها در اطراف  $pI=4.6$  آنها رخ دهد. همچنین اسیدی شدن بیشتر می تواند بارهای مثبت بیشتری را روی کازئینات ایجاد کند که می تواند منجر به افزایش حلالیت پروتئین و در نتیجه کاهش کدورت سیستم شود [۱۶].

جذب کازئینات سدیم و صمغ بالنگو، پروفیلی متفاوت از کازئینات سدیم به طور مستقل نشان داد (نمونه T1)، که نشان می دهد بین پروتئین و پلی ساکارید تعامل وجود دارد. افزودن صمغ به محلول کازئینات سدیم باعث افزایش قابل توجهی در افزایش اولیه کدورت شد، که می تواند مربوط به ارتباط ضعیف کازئینات سدیم با صمغ بالنگو در سطوح pH بالاتر از طریق برهمکنش های آبگریز باشد [۱۷]. اگرچه در pH بالاتر، کازئینات سدیم به pI خود نرسیده است، اما مولکول های آن ممکن است دارای نقاط مثبت باشند در حالی که بار کلی روی مولکول های کازئینات منفی است [۱۸].

با توجه به نتایج، pH بهینه برای نانوکمپلکس کازئینات سدیم و صمغ بالنگو، ۳/۵ در نظر گرفته شد و میزان جذب در pH معادل ۳/۵ برای بررسی میزان کدورت اندازه گیری گردید. نتایج مقایسه میانگین های میزان کدورت کمپلکس در جدول ۳ نشان داده شده است.

اندازه گیری کدورت جهت بررسی تاثیر تغییر نسبت پروتئین-پلی ساکارید بر تشکیل کمپلکس و یافتن pH بهینه تشکیل کمپلکس، صورت پذیرفت. هرگونه تغییر قابل توجه در جذب باید با تغییر خواص نوری سیستم، ظاهر کواسرواها<sup>۱</sup> یا تجمعات را آشکار کند

اندازه گیری های کدورت سنجی به طور گسترده برای نظارت بر فرآیند پیچیده کواسرواسیون در سیستم های مختلف پروتئین-پلی ساکارید به کار گرفته شده اند [۱۴]. با توجه نتایج جدول ۲ بین میزان کدورت نانوکمپلکس کازئینات سدیم و صمغ بالنگو با در نظر گرفتن غلظت صمغ مورد استفاده در کمپلکس، اختلاف معنادار وجود دارد ( $p < 0.05$ ) و با افزایش غلظت صمغ بالنگو در کمپلکس صرف نظر از میزان pH، کدورت کمپلکس بیشتر می شود به گونه ای که بیشترین کدورت در هر pH مربوط به کمپلکس حاوی ۰/۵ درصد صمغ بالنگو است. با توجه به میزان pH، نمونه بدون صمغ بالنگو، بیشترین کدورت را در pH معادل ۵ و کمترین کدورت را در pH معادل ۳ داشت و بیشترین کدورت در کمپلکس حاوی ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد صمغ بالنگو مربوط به pH معادل ۴ بود. بنابراین با توجه به pH های مورد بررسی در هر نمونه با درصد مختلف صمغ بالنگو که به عنوان یک سیستم حاوی پلی ساکارید است، با افزایش pH میزان کدورت افزایش می یابد. در نمونه T1، کمپلکس کازئینات سدیم بدون صمغ بالنگو، در pH معادل ۸ دارای کمترین کدورت می باشد. با توجه به اینکه ابتدا در کمپلکس های مورد بررسی، کدورت با افزایش pH، افزایش و مجددا کاهش یافت می توان نتیجه گرفت که حلالیت کازئینات سدیم تابع pH است [۱۵].

میزان کدورت بر اساس میزان جذب به دست آمده است و حداکثر جذب را می توان مربوط به تجمع ذرات ناشی از

**Table 3-Turbidity of sodium caseinate nanocomplex (0.5%) and balangu gum at pH 3.5**

Treatment	Turbidity
T1	0.55±0.02 <sup>c</sup>
T2	0.60±0.05 <sup>b</sup>
T3	0.66±0.03 <sup>a</sup>

T1: Sodium caseinate nanocomplex and 0% balangu gum, T2: Sodium caseinate nanocomplex and 0.25% balangu gum, T3: Sodium caseinate nanocomplex and 0.5% balangu gum

برهمکنش‌های الکترواستاتیک جذاب بین کازئینات سدیم و صمغ بالنگو رخ داده است.

۳-۳- اندازه ذرات نانوکمپلکس کازئینات سدیم (۰/۵ درصد) و صمغ بالنگو  
میزان اندازه ذرات نانوکمپلکس کازئینات سدیم (۰/۵ درصد) و صمغ بالنگو در جدول ۴ نشان داده شده است.

با توجه به نتایج جدول ۳ بین میزان کدورت (جذب) کازئینات سدیم (نمونه T1) و نمونه‌های حاوی ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد صمغ بالنگو اختلاف معنادار وجود دارد ( $p < 0.05$ ). بیشترین جذب و کدورت مربوط به نمونه حاوی ۰/۵ درصد صمغ بالنگو می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که برخی

**Table 4- Particle size of sodium caseinate nanocomplex (0.5%) and balangu gum at pH 3.5**

Treatment	Particle size (nm)
T1	1.00±0.05 <sup>a</sup>
T2	0.90±0.02 <sup>b</sup>
T3	0.95±0.03 <sup>c</sup>

T1: Sodium caseinate nanocomplex and 0% balangu gum, T2: Sodium caseinate nanocomplex and 0.25% balangu gum, T3: Sodium caseinate nanocomplex and 0.5% balangu gum

ذرات پروتئین نامحلول کاهش می‌یابد. این پدیده توضیح می‌دهد که چرا ذرات در pH معادل ۳/۵ کوچکتر هستند. کوچکترین ذرات در کمپلکس حاوی ۰/۲۵ درصد صمغ بالنگو مشاهده شده است. کاهش اندازه ذرات کمپلکس ممکن است به دلیل انقباض مولکول باشد که وقتی کازئینات سدیم با گروه‌های کربوکسیلیک پلی‌ساکارید برهمکنش می‌کند، کمتر منبسط می‌شود و منجر به کاهش دافعه بین مولکولی می‌شود [۱۴]. واضح است که اندازه ذرات کمپلکس‌های کازئینات سدیم و صمغ بالنگو، به شدت تحت تأثیر حضور صمغ قرار گرفته است. علاوه بر این، این نتایج نشان می‌دهد که در این pH حضور کازئینات سدیم منجر به تشکیل نانوذرات می‌شود که حتی از ذرات کازئینات سدیم خالی نیز کوچکتر هستند. کوچک شدن اندازه ذرات با افزودن ۰/۲۵ درصد صمغ بالنگو به دلیل برهمکنش‌های قوی بین کازئینات سدیم و پلی‌ساکارید است که منجر به ساختاری نسبتاً فشرده می‌شد. اندازه ذرات با افزایش غلظت

با توجه به نتایج جدول ۴، بین اندازه ذرات کازئینات سدیم (نمونه T1) و نمونه‌های حاوی ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد صمغ بالنگو از نظر آماری اختلاف معنادار وجود دارد ( $p < 0.05$ ). بیشترین اندازه ذرات مربوط به نمونه حاوی کازئینات سدیم و کمترین اندازه ذرات مربوط به نمونه حاوی ۰/۲۵ درصد صمغ بالنگو است. هر چه میزان تجمعات بیشتر باشد، اندازه ذرات بزرگ‌تر خواهند بود اگر چه تجمعات به میزان pH نیز مربوط است، اما pH بهینه در این تحقیق ۳/۵ در نظر گرفته شده است و این pH کمتر از نقطه ایزوالکتریک کازئینات سدیم است؛ بنابراین با توجه به نقطه ایزوالکتریک کازئینات سدیم که معادل ۴/۶ است، از نقطه ایزوالکتریک خود دور بوده و تجمعات کمتری دارد زیرا کاهش بیشتر pH باعث ایجاد بارهای مثبت بیشتر روی کازئینات می‌شود و به دلیل نیروهای دافعه، تجمعات بزرگ به تجمعات کوچکتر تبدیل می‌شوند. در نتیجه، حلالیت پروتئین افزایش یافته و تعداد

### ۳-۴- میزان پتانسیل زتا نانوکمپلکس کازئینات سدیم (۰/۵ درصد) و صمغ بالنگو

میزان پتانسیل زتا نانوکمپلکس کازئینات سدیم (۰/۵ درصد) و صمغ بالنگو در جدول ۵ نشان داده شده است.

صمغ بالنگو به رشد خود ادامه داد. این نتیجه را می توان با کاهش دافعه الکترواستاتیک بین نانوذرات توضیح داد [۱۹]. نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق Gotji و همکاران در سال ۲۰۱۴ نیز مطابقت دارد در تحقیق این محققان کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ کتیرا تولید شد و با افزودن صمغ، اندازه ذرات کمپلکس کاهش یافت [۱۴]. Karim و همکاران (۲۰۲۴) نیز میزان اندازه ذرات کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ درخت هلو را تقریباً ۲/۱۷ نانومتر گزارش دادند [۲۰].

**Table 5- Zeta potential of sodium caseinate nanocomplex (0.5%) and balangu gum at pH 3.5**

Treatment	Zeta potential (mV)
T1	6.66 <sup>a</sup>
T2	-5.33 <sup>b</sup>
T3	-7.33 <sup>c</sup>

T1: Sodium caseinate nanocomplex and 0% balangu gum, T2: Sodium caseinate nanocomplex and 0.25% balangu gum, T3: Sodium caseinate nanocomplex and 0.5% balangu gum

منفی پتانسیل زتا افزایش پیدا کرد که می توان علت آن را به پوشش دهی مناسب کازئینات نسبت داد. در این حالت، نیروی دافعه منفی سطح ذرات افزایش پیدا کرده و در نهایت میزان منفی پتانسیل زتا افزایش پیدا می کند. نتایج تحقیق حاضر با نتایج اکرمی و همکاران، مطابقت دارد در تحقیق این پژوهشگران، کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ عربی تهیه شد [۲۱].

همان طور که در جدول آمده است، اثر pH بر پتانسیل زتا همانند اندازه ذرات وابستگی بسیاری به غلظت صمغ نشان می دهد؛ با کاهش pH (۳/۵) به علت پروتونه شدن گروه های اسید کربوکسیلیک موجود در اسیدهای ارونیک ساختار صمغ از میزان بار منفی آن کاسته می گردد [۶]. همان طور که پیش تر بیان شد تشکیل کمپلکس بین بسپارهای دارای بار مخالف صورت می پذیرد لذا؛ با توجه به نتایج حاصل از اندازه گیری پتانسیل زتا و وجود تفاوت در بار سطحی دو بسپار زیستی مورد استفاده در pH های خاص، در صورت انتخاب شرایط مناسب از نظر pH و نسبت دو بسپار امکان تشکیل کمپلکس بدون تشکیل رسوب وجود خواهد داشت. از آنجایی که بار خالص بسپارهای زیستی به عنوان نشانه ای از برهم کنش

برای مشخص شدن نحوه عمل نیروهای دافعه الکترواستاتیک در کمپلکس صمغ و کازئینات سدیم و میزان پایداری کمپلکس حاصل، از نتایج پتانسیل زتا استفاده شد. پتانسیل زتا یا الکتروسیستیک، اختلاف پتانسیل بین لایه یونی متحرک و لایه غیر متحرک می باشد و بهترین شاخص برای تعیین وضعیت الکتریکی سطحی دیسپرسیون هاست، زیرا نشان دهنده میزان تجمع بار در لایه غیر متحرک و شدت جذب یون های مخالف به سطح ذره است [۲۱]. عوامل مختلفی از جمله pH، قدرت یونی، نوع و غلظت بیوپلیمرهای مورد استفاده، نسبت بین آنها بر روی میزان بار سطحی و پتانسیل زتای کمپلکس مؤثر است.

طبق نتایج جدول ۵، بین میزان پتانسیل زتای نمونه های کمپلکس از نظر آماری اختلاف معنادار وجود دارد ( $p < 0.05$ ). با افزایش میزان صمغ بالنگو در کمپلکس، پتانسیل زتای نمونه ها هر چند منفی اما افزایش می یابد. به گونه ای که نمونه حاوی ۰/۵ درصد صمغ بالنگو، دارای میزان پتانسیل زتای منفی بیشتری نسبت به دو نمونه دیگر است. در غلظت یکسان کازئینات، با افزایش میزان صمغ مقدار

مختلف مورد ارزیابی قرار دادند و نشان دادند که افزایش نسبت صمغ عربی به کازئینات، موجب کاهش pH خنثی شدن (نقطه ایزو الکتریک) کمپلکس می شود [۱۶]

Rashid و همکاران، کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ هلو را مورد بررسی قرار دادند و میزان پتانسیل زتای کمپلکس حاوی ادرصد صمغ را ۲۱/۳۶- میلی ولت گزارش دادند [۲۴]. Karim و همکاران (۲۰۲۴) نیز میزان پتانسیل زتای کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ درخت هلو را ۱۷/۸۴- گزارش دادند [۲۰].

۳-۵- ویژگی های رئولوژیکی نانوکمپلکس کازئینات سدیم (۰/۵ درصد) و صمغ بالنگو

۳-۵-۱- نتایج میزان تنش برشی نانوکمپلکس کازئینات سدیم (۰/۵ درصد) و صمغ بالنگو در برابر سرعت برش  
نتایج میزان تنش برشی (pa) نانوکمپلکس کازئینات سدیم (۰/۵ درصد) و صمغ بالنگو با سرعت برش های مختلف (1/s) در جدول ۶ و شکل ۱ آمده است.

الکترواستاتیک بین آنها می باشد بار خالص کمپلکسها می تواند در تعیین مکانیسم موثر در پایداری مفید باشد [۹]. اندازه گیری پتانسیل زتا امکان پیش بینی پایداری انباری دیسپرسیون کلوئیدی را مقدور می سازد. مقادیر بالای پتانسیل زتا، چه مثبت و چه منفی، برای اطمینان از پایداری و عدم تجمع ذرات مورد نیاز است. از نظر تئوری هر چه پتانسیل زتا بالاتر باشد، برهم کنش بهتری بین ترکیبات باردار صورت خواهد پذیرفت [۲۲]. در حضور کازئینات به عنوان ماده پروتئینی، با توجه به کمتر بودن مقدار پروتئین مقدار عددی پتانسیل زتا بالاتر می باشد. با افزایش غلظت صمغ مقدار پتانسیل زتا افزایش یافت و با توجه به این که مقادیر بالای پتانسیل زتا چه مثبت و چه منفی برای ایجاد پایداری مورد نیاز می باشد [۲۳]، می توان نتیجه گرفت که پایداری سیستم کمپلکس نیز افزایش و دوفاز شدن و ایجاد رسوب کاهش خواهد یافت و یا مشاهده نمی گردد

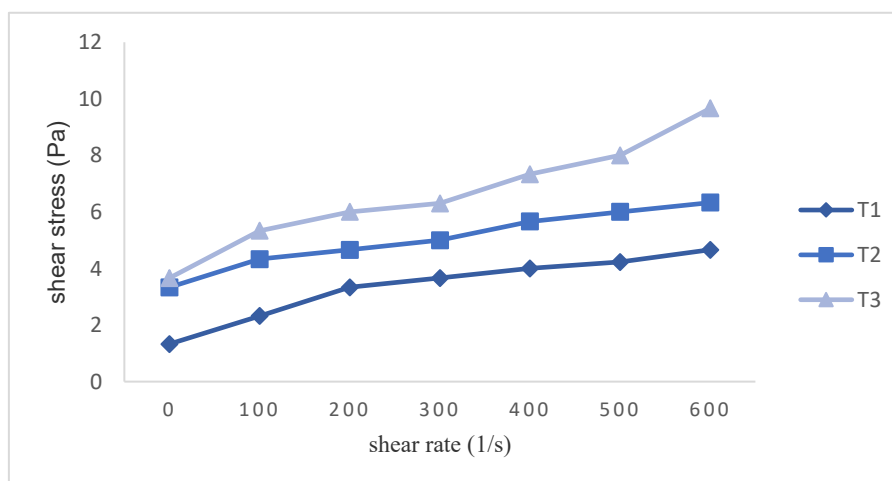
در تحقیقی Ye و همکاران، پتانسیل زتای نانوکمپلکس کازئینات سدیم و صمغ عربی بدون هسته را در pH های

Table 6- Shear stress (Pa) of sodium caseinate nanocomplex (0.5%) and balangu gum at different shear rates (1/S)

Sample	T1	T2	T3
Shear rate			
0	1.33±0.2 <sup>Kb</sup>	3.33±0.1 <sup>Ga</sup>	3.66±0.3 <sup>Ba</sup>
100	2.33±0.3 <sup>Hc</sup>	4.33±0.2 <sup>Fb</sup>	5.33±0.3 <sup>Ea</sup>
200	3.33±0.1 <sup>Gc</sup>	4.66±0.4 <sup>Fb</sup>	6.10±0.5 <sup>Da</sup>
300	3.66±0.2 <sup>Gc</sup>	5.10±0.3 <sup>Eb</sup>	6.33±0.2 <sup>Da</sup>
400	4.10±0.5 <sup>Fc</sup>	5.66±0.5 <sup>Eb</sup>	7.33±0.2 <sup>Ca</sup>
500	4.33±0.2 <sup>Fc</sup>	6.10±0.2 <sup>Db</sup>	8.10±0.1 <sup>Ba</sup>
600	4.66±0.5 <sup>Fc</sup>	6.33±0.1 <sup>Db</sup>	9.60±0.2 <sup>Aa</sup>

T1: Sodium caseinate nanocomplex and 0% balangu gum, T2: Sodium caseinate nanocomplex and 0.25% balangu gum, T3: Sodium caseinate nanocomplex and 0.5% balangu gum

Different lowercase letters in each row indicate significant differences between samples with different balangu concentrations and different uppercase letters in each column indicate significant differences at different shear rates ( $p \leq 0.05$ ).



**Figure-1 Shear stress of sodium caseinate nanocomplex (0.5%) and balangu gum at different shear rates**

(1/s)، بین Pa ۱/۳۳ تا ۴/۶۶ می باشد و در نمونه حاوی

۰/۲۵ صمغ بالنگو بین Pa ۳/۳۳ تا ۶/۳۳ و در نمونه حاوی

۰/۵ درصد صمغ بالنگو بین Pa ۳/۶۶ تا ۹/۶۶ می باشد.

۳-۵-۲- ویسکوزیته نانوکمپلکس کازئینات سدیم (۰/۵)

درصد) و صمغ بالنگو در سرعت های برش مختلف

میزان ویسکوزیته نانوکمپلکس کازئینات سدیم (۰/۵ درصد)

و صمغ بالنگو در سرعت های برش مختلف در جدول ۷ و

شکل ۲ نشان داده شده است.

مطابق نتایج جدول ۶ و شکل ۱ بین میزان تنش برشی

نمونه های کمپلکس با هر سرعت برشی وارد شده اختلاف

معنادار وجود دارد ( $p < 0.05$ ). با افزایش میزان صمغ

بالنگو، میزان تنش برشی افزایش یافت به گونه ای که در هر

سرعت برشی اعمال شده، نمونه کازئینات سدیم دارای

کمترین تنش برشی و نمونه حاوی صمغ بالنگوی بیشتر (۰/۵

درصد) دارای بیشترین تنش برشی بود. میزان تنش برشی در

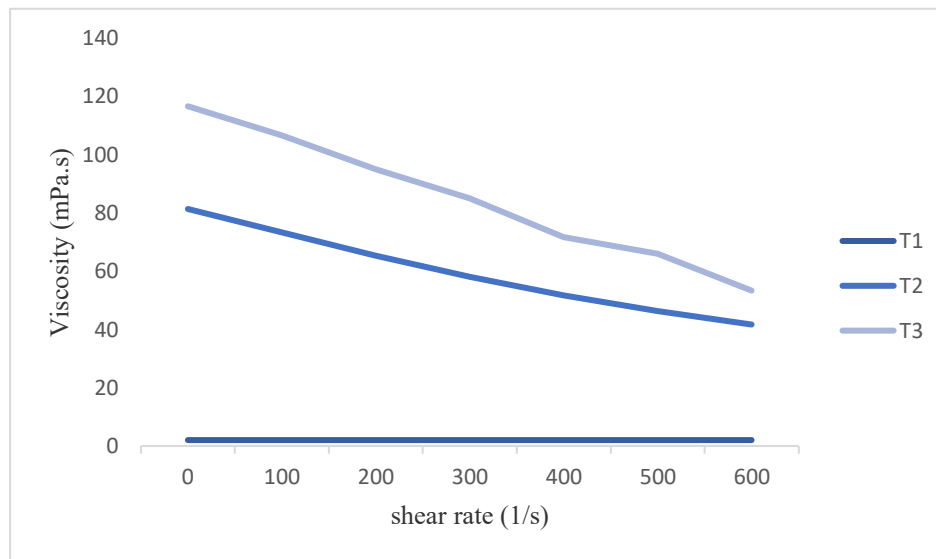
نمونه کازئینات سدیم با اعمال سرعت برشی ۰ تا ۶۰۰

**Table 7- Viscosity (mPa.s) of sodium caseinate nanocomplex and balangu gum at different shear rates**

Sample	T1	T2	T3
Shear rate			
0	2.00±0.2 <sup>Gc</sup>	81.33±1.2 <sup>Cb</sup>	116.15±4.1 <sup>Aa</sup>
100	2.00±0.5 <sup>Gc</sup>	73.33±1.5 <sup>Db</sup>	106.67±3.2 <sup>ABa</sup>
200	2.00±0.1 <sup>Gc</sup>	65.33±2.2 <sup>Db</sup>	95.50±1.6 <sup>BCa</sup>
300	2.00±0.3 <sup>Gc</sup>	58.64±1.3 <sup>DEb</sup>	85.50±1.9 <sup>Ca</sup>
400	2.00±0.2 <sup>Gc</sup>	51.66±1.3 <sup>Eb</sup>	71.20±2.2 <sup>Da</sup>
500	2.00±0.4 <sup>Gc</sup>	46.33±2.1 <sup>EFb</sup>	66.10±2.3 <sup>Da</sup>
600	2.00±0.2 <sup>Gc</sup>	41.66±1.5 <sup>Fb</sup>	53.33±3.1 <sup>Ea</sup>

T1: Sodium caseinate nanocomplex and 0% balangu gum, T2: Sodium caseinate nanocomplex and 0.25% balangu gum, T3: Sodium caseinate nanocomplex and 0.5% balangu gum

Different lowercase letters in each row indicate significant differences between samples with different balangu concentrations and different uppercase letters in each column indicate significant differences at different shear rates ( $p \leq 0.05$ ).



**Figure 2-** Viscosity (mPa.s) of sodium caseinate nanocomplex (0.5%) and balangu gum at different shear rates

پیدا می‌کند که می‌توان این مقدار افت اولیه را به کاهش اصطکاک در اثر همسیر شدن ذرات فاز پراکنده و غلبه نیروی برشی بر نیروی براونی نسبت داد [۲۵]. حضور صمغ بالنگو می‌تواند با ایجاد نیروهای دافعه ناشی از ممانعت فضایی و دافعه الکترواستاتیک، موجب جلوگیری از لخته شدن ذرات کازئیناتی شده و از افزایش شدید ویسکوزیته جلوگیری نماید. همچنین با افزایش غلظت صمغ از ۰/۲۵ به ۰/۵ درصد، میزان ویسکوزیته محلول‌های کمپلکس افزایش یافته است. اگر در سیستمی تغییر حالت از رقیق به نیمه رقیق وجود داشته باشد، می‌توان افزایش ویسکوزیته را به درگیری و گیر افتادن زنجیرها نسبت داد ولی چون در این سیستم، به علت رقیق بودن تغییر حالت وجود ندارد نمی‌توان افزایش ویسکوزیته را به آن نسبت داد بلکه احتمال دارد افزایش ویسکوزیته، ناشی از افزایش تعداد ذرات کمپلکس و در نتیجه، افزایش اصطکاک باشد. همچنین احتمال دیگر، افزایش توده شدن ذرات در اثر اندوهش ناشی از تشکیل پل یا تهی شدن است. در کسر حجمی ثابت ذرات، مقادیر ویسکوزیته سیستم کلئوئیدی به اندازه ذرات، توزیع اندازه ذرات، اندوهش (فلاکولاسیون) و حضور لایه سورفاکتانت ضخیم دور ذرات بستگی دارد. ذرات کوچکتر با توزیع اندازه کمتر، ویسکوزیته بیشتری ایجاد می‌نمایند و همچنین

مطابق جدول ۷ مشاهده می‌شود که در نمونه T1 (نمونه حاوی کازئینات سدیم) بین میزان ویسکوزیته در سرعت برشی‌های مختلف، اختلاف معناداری وجود ندارد ( $p > 0.05$ ). در نمونه T2 و T3، با افزایش سرعت برشی، میزان ویسکوزیته کمتر می‌شود. با افزایش میزان صمغ بالنگو، میزان ویسکوزیته افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در هر سرعت برشی اعمال شده، نمونه کازئینات سدیم دارای کمترین ویسکوزیته و نمونه حاوی صمغ بالنگوی بیشتر (۰/۵ درصد) دارای بیشترین ویسکوزیته می‌باشد. میزان ویسکوزیته در نمونه حاوی ۰/۲۵ صمغ بالنگو بین ۸۱/۳۳ تا ۴۴/۶۶ میلی پاسکال ثانیه و در نمونه حاوی ۰/۵ درصد صمغ بالنگو بین ۱۱۶/۶۷ تا ۵۳/۳۳ میلی پاسکال ثانیه می‌باشد.

بین تنش برشی و سرعت برشی در کمپلکس صمغ بالنگو و کازئینات سدیم رابطه نسبتاً خطی وجود دارد و این رفتار نشان می‌دهد که محلول‌ها دارای رفتار نزدیک به نیوتنی هستند. در این سیالات، شیب خط نمودار تنش برشی-سرعت برشی، ویسکوزیته را نشان می‌دهد، بطوریکه با افزایش ویسکوزیته محلول، شیب منحنی نیز افزایش می‌یابد. طبق نتایج جدول در سرعت‌های برشی پایین، نمونه‌ها دارای رفتار روان شوندگی با برش (سودوپلاستیک) از خود نشان می‌دهند و با افزایش سرعت برشی، میزان ویسکوزیته کاهش

امولسیون‌هایی با قطرات کوچکتر، ویسکوزیته بالاتری نسبت به امولسیون‌های با قطرات بزرگتر دارند [۲۶].

### ۳-۶- تاثیر غلظت صمغ بالنگو بر میزان برآزش داده‌های رئولوژیکی کمپلکس با مدل‌های ریاضی

به‌منظور دست‌یابی به مدل ریاضی مطلوب و قابل استفاده برای بررسی رفتار جریانی کمپلکس‌های حاصل، داده‌های به‌دست آمده از آزمون رئولوژیکی با مدل‌های نیوتنی، قانون توان، بینگهام، هرشل بالکلی و سیسکو مورد بررسی قرار گرفتند. ضریب تعیین<sup>۱</sup>، ریشه دوم خطای میانگین از استاندارد<sup>۲</sup> و خطای مجموع مربعات<sup>۳</sup> به‌دست آمده برای هر یک از مدل‌ها در جدول ۸ آورده شده است. اساساً بالا بودن ضریب تعیین و پایین بودن RMSE و SSE بر مناسب‌تر بودن میزان برآزش داده‌های تجربی با مدل جهت بررسی‌های رئولوژیکی دلالت دارند. لازم به‌ذکر است از ارائه داده‌های مربوط به مدل‌هایی که در آنها تنش تسلیم منفی و یا شاخص توان بزرگ‌تر از یک بوده است صرف‌نظر گردیده است.

تاثیر غلظت صمغ بالنگو بر میزان برآزش داده‌های

رئولوژیکی کمپلکس با مدل‌های ریاضی در جدول ۸ نشان داده شده است.

اندویش ذرات به علت گیر انداختن احلال، موجب افزایش ویسکوزیته می‌گردد [۲۱]. نوروزی و همکاران از صمغ بالنگو در فرمولاسیون ماست استفاده نمودند و بیان کردند با افزایش میزان مصرف صمغ بالنگو در فرمولاسیون، ویسکوزیته ظاهر افزایش می‌یابد [۲۵].

برقرای پیوند بین آب و صمغ بالنگو باعث بالا رفتن ویسکوزیته می‌شود و به این علت است که با افزایش میزان صمغ بالنگو در کمپلکس، میزان ویسکوزیته افزایش می‌یابد. افزایش صمغ بالنگو باعث تقویت سیستم پروتئینی (کازئینات) می‌شود در واقع ماهیت پلی ساکاریدی صمغ بالنگو باعث جذب آب بالا و افزایش ویسکوزیته می‌گردد و مقاومت در برابر نیرو را افزایش می‌دهد به این علت است که نمونه‌های دارای صمغ بیشتر، ویسکوزیته بالاتر داشته و پس از اعمال نیروی برشی نیز، ویسکوزیته بالاتری دارند [۲۵].

نجف نجفی و فاضلی در تحقیق خود، کند کردن حرکت بروانی ذرات روغن در امولسیون را دلیل کاهش اندازه ذرات امولسیون با افزایش ویسکوزیته عنوان کردند. همچنین بیان کردند که عکس این قضیه نیز صادق است، به طوریکه

**Table 8- Effect of Balangu gum concentration on the fit of nanocomplex rheological data with mathematical models**

Treatments	Indices	Mathematical Models				
		Newtonian	Bingham	Power	Herschel-Bulkley	Sisko
T1	RMSE	0.0886	-	-	-	-
	$r^2$	0.998	-	-	-	-
	SSE	0.0035	-	-	-	-
T2	RMSE	0.1885	0.7151	0.1885	0.0461	0.9211
	$r^2$	0.988	0.983	0.982	0.939	0.982
	SSE	1.143	1.365	1.549	0.2137	1.640
T3	RMSE	0.8456	10.196	0.1143	0.1052	0.1081
	$r^2$	0.847	0.991	0.996	0.993	0.997
	SSE	6.52	1.930	0.6539	0.5452	0.6091

نیوتنی بیشترین ضریب مربوط به  $r^2$  و کمترین ضریب در قانون نیوتنی مربوط به SSE بود. در نمونه حاوی ۰/۲۵

همان‌طور که از نتایج جدول ۸ مشاهده می‌گردد برای نمونه‌های حاوی کازئینات سدیم و صمغ بالنگو در قانون

3- SSE: Sum of Squares Error

1-R2

2- RMSE: Root Mean Standard Error

سدیم (۰/۵ درصد) نشان می‌دهد که کمپلکس حاوی کازئینات سدیم، رفتار نیوتنی نشان داد. افزایش غلظت صمغ بالنگو در این نوع کمپلکس‌ها سبب تغییر رفتار به غیر نیوتنی و از نوع هرشل بالکلی گردید. با توجه به اینکه شکل ساختاری پروتئین در شرایط اسیدی، پیوندهای بین مولکولی و ویژگی‌های ترمودینامیکی پروتئین نوع برهم‌کنش بین ذرات و رفتار رئولوژیکی سیستم را تعیین می‌کند در نتیجه چنین رفتاری مشاهده شد [۲۷].

**۳-۷-تأثیر غلظت صمغ بالنگو بر ویسکوزیته ظاهری و متغیرهای قانون‌های نیوتنی و هرشل بالکلی**  
شاخص‌های مربوط به مدل‌های رفتار جریانی مشخص شده، در جدول ۹ آورده شده است. در این جدول ویسکوزیته ظاهری نمونه‌های کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ بالنگو در سرعت برشی ۱۰۰ بر ثانیه و دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد نیز نشان داده شده است.

درصد صمغ بالنگو، در قانون نیوتنی، بیشترین ضریب مربوط به SSE و کمترین مربوط به RMSE، در قانون بینگهام بیشترین ضریب مربوط به SSE و کمترین ضریب مربوط به RMSE، در قانون توان، بیشترین ضریب مربوط به RSME، در قانون هرشل بالکلی، بیشترین ضریب مربوط به SSE و کمترین مربوط به RMSE و در قانون سیسکو نیز به همین منوال بود. در کمپلکس حاوی ۰/۵ درصد صمغ بالنگو، در قانون نیوتنی، بیشترین ضریب مربوط به SSE و کمترین مربوط به RMSE، در قانون بینگهام کمترین ضریب مربوط به SSE و بیشترین ضریب مربوط به RMSE و، در قانون توان، کمترین ضریب مربوط به SSE و بیشترین ضریب مربوط به RSME، در قانون هرشل بالکلی، بیشترین ضریب مربوط به  $r^2$  و کمترین مربوط به RMSE و در قانون سیسکو نیز به همین منوال بود.

نتایج حاصل از برازش در مدل‌های قانون توان، هرشل بالکلی و سیسکو در نمونه حاوی ۰ درصد صمغ بالنگو و کازئینات

**Table 9 - Effect of Balangu gum concentration on apparent viscosity and variables of Newtonian and Herschel-Bulkley 's model**

Treatments	Apparent viscosity (mPa.s)	Consistency coefficient (k)	Power index (n)	Yield stress $\sigma_0$ (mPa)
T1	5.12	-	-	-
T2	17.90	0.0018	0.9366	1.351
T3	31.45	0.1056	0.7222	2.123

قابلیت جذب آب توسط پلی ساکاریدهای صمغ بالنگو، می‌توان گفت جذب آب بیشتر به واسطه افزایش غلظت نیز سبب افزایش در ویسکوزیته خواهد شد. اصولاً غلظت از جمله متغیرهایی است که افزایش یا کاهش آن سبب تغییر در میزان ویسکوزیته می‌گردد.

افزایش ویسکوزیته کمپلکس‌ها با افزایش غلظت صمغ را می‌توان به ایجاد شبکه‌ای که دارای ساختار است، نسبت داد. به این ترتیب، نقش احتمالی واکنش‌های بین و داخل ملکولی و هم‌پوشانی پلی ساکاریدهای صمغ بالنگو در افزایش ویسکوزیته مشخص می‌گردد و شاید بتوان گفت که احتمالاً

همان‌گونه که از جدول ۹ مشاهده می‌گردد، افزایش غلظت صمغ بالنگو به کازئینات سدیم، موجب افزایش ویسکوزیته شده است. در پژوهش‌های دیگران نیز به افزایش ویسکوزیته انواع کمپلکس‌ها در اثر افزودن هیدروکلوئیدهای مختلف اشاره شده است [۲۸].

افزایش ویسکوزیته را می‌توان به تشکیل پیوندهای الکترواستاتیکی و ایجاد شبکه مربوط دانست. با افزایش غلظت، احتمال تشکیل پیوندهای بیشتر و شبکه قوی‌تر وجود دارد که در نتیجه با محصور شدن بیشتر آب در شبکه ویسکوزیته افزایش خواهد یافت [۲۹]. همچنین با توجه به

### ۳-۸- نتایج طیف سنجی فروسرخ (FTIR) کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ بالنگو

طیف نگاره فروسرخ، تشخیص گروه های شیمیایی اصلی در پلی ساکاریدها و پروتئین ها و تغییر و تشکیل برهم کنش های جدید را میسر می سازد چون عدد موجی و شدت پیوندها و گروه ها برای هر پلی ساکارید و پروتئینی اختصاصی است [۱۰]. با توجه به اینکه گروه های عاملی و پیوندهای مختلف، دارای جذب در عددهای موجی (فرکانس های) معینی هستند، ایجاد برهمکنش های جدید و تغییر در ساختار مواد، سبب تغییر در عدد های موجی جذبی می شود؛ بنابراین طیف سنجی فروسرخ، ابزاری مناسب در تشخیص و نمایش تغییرات ساختاری در مواد می باشد. در این پژوهش، آنالیز طیف سنجی فروسرخ، به منظور شناسایی گروه های عاملی در کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ بالنگو (به میزان مساوی ۰/۵ درصد) استفاده گردیده است. نمودار استخراجی در شکل ۳ نشان داده شده است.

وقوع این واکنش ها ناشی از وجود شاخه های جانبی در ساختار صمغ می باشد [۶]. ویسکوزیته یکی از مهم ترین پارامترها را در آماده سازی کمپلکس بسپارهای زیستی معرفی می کند. در پژوهش Ghasemi و همکاران (۲۰۱۷a) کمترین ویسکوزیته در pH های بالاتر (۶ و ۹) و بیشترین ویسکوزیته به ترتیب بالاتر و پایین تر از pH ۳ بوده است. در pH ۶ کنسانتره پروتئین آب پنیر و پکتین قادر به تشکیل کمپلکس های هم محلول بودند که قادرند آب بیشتری را در خود نگه داشته و در نتیجه ویسکوزیته را افزایش دهند. در pH ۹ دافعه بین دو بسپار بیشتر بوده و در نتیجه با حفظ آب کمتر ویسکوزیته کاهش می یابد. هرچه احتمال شکل گیری کمپلکس بالاتر باشد ویسکوزیته و پایداری کمتر خواهد بود. بنابراین یک رابطه غیرمستقیم بین تشکیل کمپلکس و پایداری ویسکوزیته وجود دارد. به عبارت دیگر زمانی که احتمال تشکیل کمپلکس کم است پتانسیل زتای بسپارهای زیستی مورد استفاده، مشابه و بالا بوده که منجر به ایجاد نیروی رانشی و پایداری ویسکوزیته بالاتر ذرات نانوکمپلکس خواهد شد [۲۹].

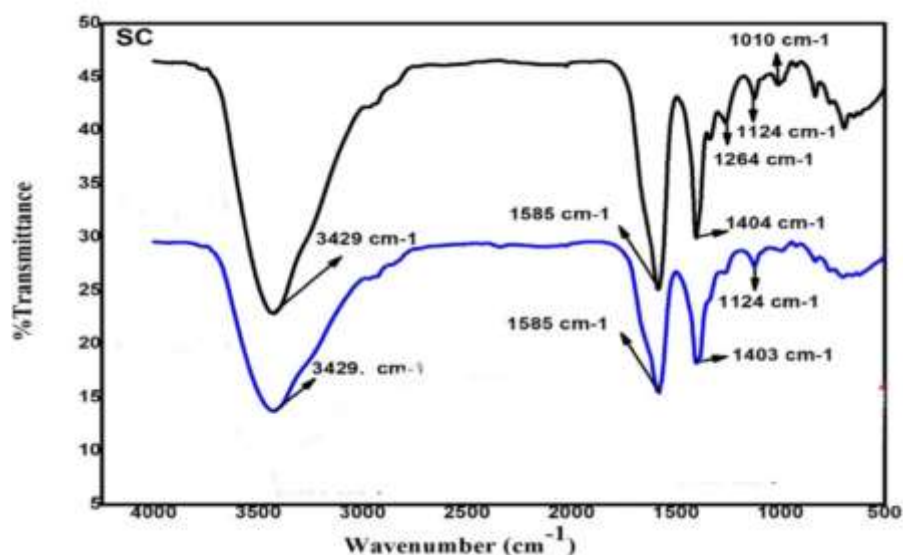


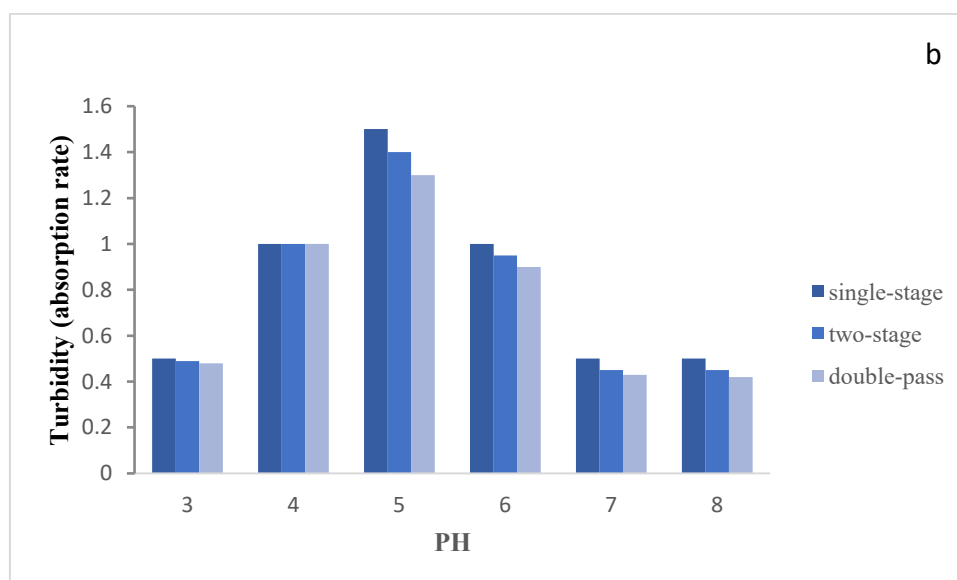
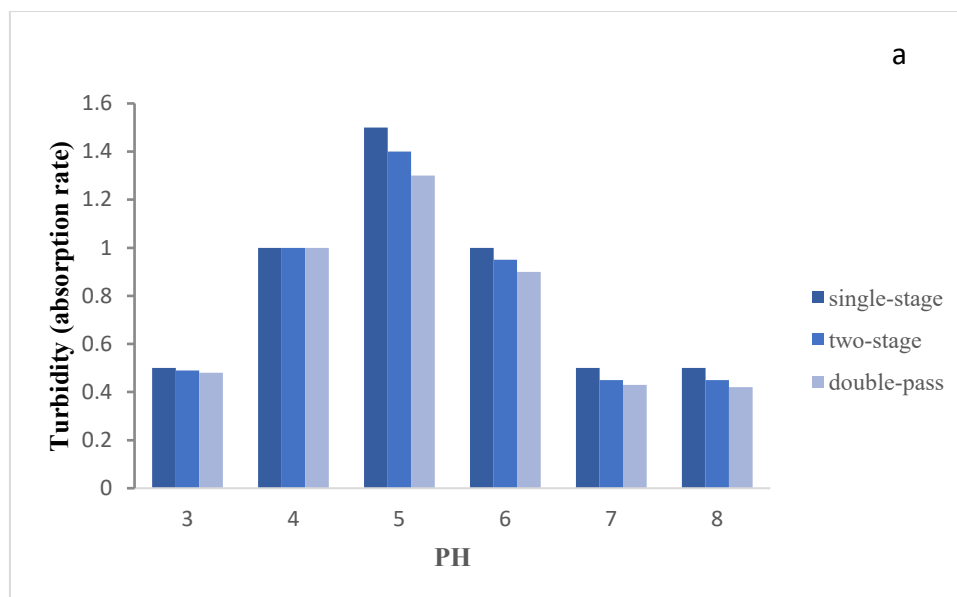
Figure 3 - The graph obtained from the FTIR infrared spectrogram, the blue lines are related to sodium caseinate and the black lines are related to the caseinate and gum balangu complex (0.5%).

صمغ بالنگو در طول موج ۹۹۰ تا  $1150\text{ cm}^{-1}$  جذب نشان می‌دهد که مربوط به کشش باندهای O-C و C-O است و مشاهده باند در طول موج  $1600\text{ cm}^{-1}$  مربوط به وجود گروه‌های کربوکسیلیک آزاد است. همانگونه که بیان شد این پیک‌ها در صمغ و در کازئینات که ماهیت پروتئینی دارد متفاوت هستند و در کمپلکس بین این دو (پروتئین و پلی ساکارید) باندهای ایجاد شده، گروه‌های عاملی دیگری را نشان می‌دهد.

سردردیان و همکاران FTIR صمغ بالنگو را بررسی کرده و به بیان نمودند که جذب در طول موج ۱۶۰۰ و  $1700\text{ cm}^{-1}$  به ترتیب مربوط به کشش متقارن و نامتقارن C=O حضور اسید ارونیک است. جذب در طول موج ۱۶۰۰ تا  $1700\text{ cm}^{-1}$  و  $1600-1500\text{ cm}^{-1}$  به ترتیب به امید اول (گروه C=O و CN) و امید دوم (به طور عمده NH) بر می‌گردد. جذب کشش OH به علت پیوندهای هیدروژنی بین و درون ملکولی است که باعث ایجاد ناحیه گسترده‌ای از جذب بین  $3000$  تا  $3500\text{ cm}^{-1}$  می‌شود و ویژگی‌های متعددی را از جمله گروه‌های هیدروکسیل آزاد که در نمونه‌ها در فاز بخار رخ می‌دهد و باند O-H را نشان می‌دهد، بروز می‌دهد [۳۲].

۳-۹-تاثیر نوع و فشار هموژنیزاسیون بر میزان کدورت کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ بالنگو در pH مختلف  
تاثیر نوع هموژنیزاسیون بر میزان کدورت کمپلکس کازئینات سدیم (۰/۵ درصد) و صمغ بالنگو (۰/۵ درصد) در pH متفاوت در شکل ۴ نشان داده شده است.

در نمودار حاصل از FTIR. کازئینات سدیم پیک‌هایی در طول موج‌های ۳۴۲۹، ۱۵۸۵، ۱۴۰۴، ۱۲۶۴، ۱۱۲۴ و ۱۰۱۰  $\text{cm}^{-1}$  مشاهده گردید. در کمپلکس حاوی ۰/۵ درصد کازئینات سدیم و ۰/۵ درصد صمغ بالنگو، نیز پیک‌هایی در طول موج‌های ۳۴۲۹، ۱۵۸۵، ۱۴۰۳ و  $1124\text{ cm}^{-1}$  مشاهده شد. طیف‌های کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ بالنگو به دلیل همپوشانی O-H آزاد و متصل از پلی ساکاریدها با گروه‌های N-H از پروتئین، پهنای باند را در ناحیه طیفی  $3000-3500\text{ cm}^{-1}$  نشان داد. صمغ بالنگو شامل ترکیبات همی سلولزی، ماکرومولکول‌های پروتئینی و قندهایی است که گروه‌های عاملی  $\text{NH}_2$ ،  $\text{COOH}$  و  $\text{OH}$  را فراهم می‌کنند. افزودن صمغ به کمپلکس پروتئینی کازئینات به تشکیل گروه‌های عاملی بیشتر برای تشکیل پیوندهای H بین مولکولی با پروتئین کمک می‌کند و در نتیجه باند  $\text{OH}$  پهن‌تری ایجاد شد. با توجه به ماهیت آبدوست صمغ بالنگو، محتوای رطوبت بالا نیز مسئول باند  $\text{OH}$  پهن‌تر است [۳۰]. با افزودن صمغ به کازئینات سدیم پیک  $\text{OH}$  از ۳۴۲۹  $\text{cm}^{-1}$  به  $3430\text{ cm}^{-1}$  تغییر کرد که با برهمکنش قوی بین پروتئین و صمغ مرتبط است. کاهش شدت سایر باندها در  $11264\text{ cm}^{-1}$ ،  $1334\text{ cm}^{-1}$  و  $1000-700\text{ cm}^{-1}$  به دلیل افزودن صمغ بالنگو (۰/۵ درصد) بود که منجر به اصلاح ساختاری در کازئینات سدیم شد و قویاً برهمکنش بین مولکولی و صمغ را نشان می‌دهد. علاوه بر این، یک باند پهن‌تر در  $1403\text{ cm}^{-1}$  با ترکیب صمغ بالنگو می‌تواند با افزایش گروه کربوکسیلات از پروتئین و اسید اورونیک موجود در ساختار صمغ مرتبط باشد [۳۱].



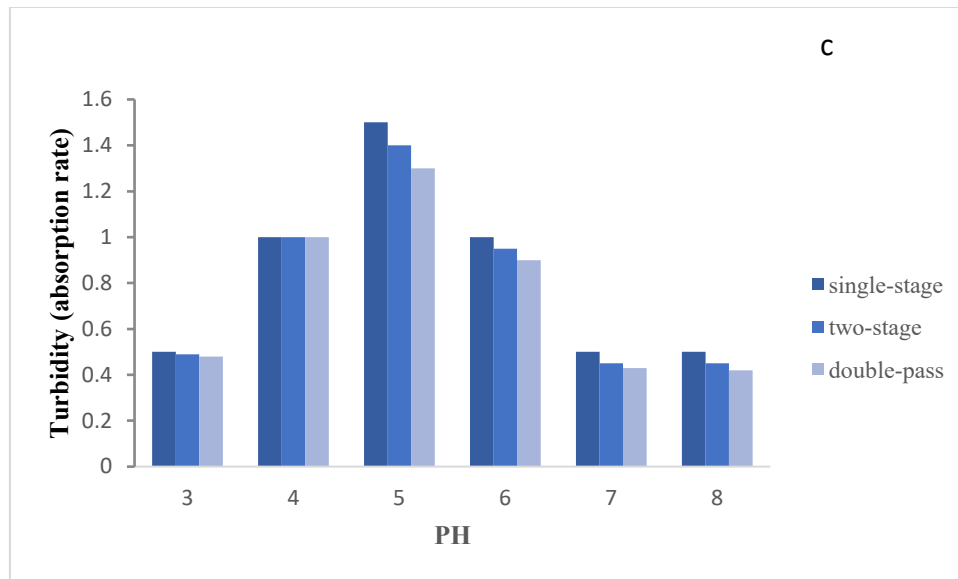


Figure 4 - Effect of type and amount of pressure [300(a), 500 (b) and 700 (b) bar] of homogenization on the turbidity (absorption) of sodium caseinate and balangu gum complex

۳-۱۰- تاثیر فشار و نوع هموژنیزاسیون بر کدورت کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ بالنگو در pH معادل ۳/۵

با توجه به نتایج به دست آمده، تولید کمپلکس با میزان ۰/۵ درصد کازئینات سدیم و ۰/۵ درصد صمغ بالنگو، نتایج بهتری را نسبت به کمپلکس حاوی مقادیر ۰ و ۰/۲۵ درصد صمغ بالنگو، کسب نمودند. لذا تاثیر فشار هموژنیزاسیون و نوع هموژنیزاسیون (یک مرحله‌ای، دو مرحله‌ای و دوبار عبور) بر خواص کمپلکس مورد آزمون قرار گرفت. جدول ۱۰، نتایج تاثیر فشار و نوع هموژنیزاسیون بر کدورت کمپلکس کازئینات سدیم (۰/۵ درصد) و صمغ بالنگو (۰/۵ درصد) در pH معادل ۳/۵ را نشان می‌دهد.

مطابق نمودارهای شکل ۴، در تمامی pH های مورد بررسی ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ کمترین میزان کدورت (جذب) مربوط به pH معادل ۳ می‌باشد و پس از آن pH معادل ۷ و ۸ بیشترین میزان کدورت (جذب) در تمامی ۳ فشار مورد بررسی (۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ بار) و در هر سه نوع هموژنیزاسیون (یک مرحله‌ای، دو مرحله‌ای و دوبار عبور) در pH معادل ۵ و پس از آن در pH معادل ۶ مشاهده گردید. با توجه به نمودارهای حاصل، میزان کدورت در هر pH مورد بررسی و در هر فشار هموژنیزاسیون، مربوط به نمونه کمپلکس تحت هموژنیزاسیون تک مرحله‌ای و کمترین میزان کدورت مربوط به نمونه تحت هموژنیزاسیون ۲ بار عبور می‌باشد. به عبارتی می‌توان گفت کمترین میزان کدورت (جذب) مربوط به نمونه کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ بالنگو تحت هموژنیزاسیون دوبار عبور و فشار ۵۰۰ بار در pH معادل ۳ می‌باشد.

Table 10- Turbidity (absorption rate) of sodium caseinate complex (0.5%) and gum balangu (0.5%) at pH 3.5 and different pressures and types of homogenization

Pressure (bar)	300	500	700
Type of Homogenization			
Single-stage	0.86±0.2 <sup>Aa</sup>	0.70±0.5 <sup>Ba</sup>	0.55±0.1 <sup>Ca</sup>
Two-stage	0.73±0.1 <sup>Aab</sup>	0.65±0.2 <sup>Bab</sup>	0.51±0.09 <sup>Cab</sup>

Double-pass	0.70±0.3 <sup>Ab</sup>	0.60±0.1 <sup>Bab</sup>	0.48±0.3 <sup>Cab</sup>
-------------	------------------------	-------------------------	-------------------------

Different uppercase letters in each row indicate significant differences between amount of pressures and different lowercase letters in each column indicate significant differences at different type of homogenization ( $p \leq 0.05$ ).

کمترین میزان کدورت مربوط به نمونه‌ای است که تحت هموژنیزاسیون دوبار عبور قرار گرفته است. با در نظر گرفتن فشار هموژنیزاسیون، می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش میزان فشار در هر نوع از هموژنیزاسیون‌های مورد بررسی، میزان کدورت و جذب کاهش می‌یابد و این میزان کاهش معنادار است ( $p < 0.05$ ). بنابراین کمترین کدورت مربوط به نمونه‌ای است که تحت هموژنیزاسیون دو بار عبور در فشار ۷۰۰ بار قرار گرفته است.

### ۳-۱۱- نتایج تاثیر فشار و نوع هموژنیزاسیون بر اندازه ذرات کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ بالنگو در pH معادل ۳/۵

جدول ۱۱، نتایج تاثیر فشار و نوع هموژنیزاسیون بر اندازه ذرات کمپلکس کازئینات سدیم (۰/۵ درصد) و صمغ بالنگو (۰/۵ درصد) در pH معادل ۳/۵ را نشان می‌دهد.

طبق نتایج جدول ۱۰ نوع هموژنیزاسیون و فشار هموژنیزاسیون بر روی میزان جذب و کدورت کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ بالنگو از نظر آماری در برخی نمونه‌ها اختلاف معناداری دارد ( $p < 0.05$ ). در فشار ۳۰۰ بار بین میزان کدورت نمونه‌های کمپلکس تحت هموژنیزاسیون یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای از نظر آماری اختلاف معنادار وجود ندارد همچنین بین میزان کدورت نمونه تحت هموژنیزاسیون دو مرحله‌ای و دوبار عبور نیز اختلاف معنادار نیست. در فشار ۵۰۰ بار نیز بین میزان کدورت نمونه‌ها کمپلکس اختلاف معنادار وجود ندارد ( $p > 0.05$ ) و در فشار ۷۰۰ بار نیز بین میزان کدورت نمونه‌های کمپلکس تحت هموژنیزاسیون یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای از نظر آماری اختلاف معنادار وجود ندارد همچنین بین میزان کدورت نمونه تحت هموژنیزاسیون دو مرحله‌ای و دوبار عبور نیز اختلاف معنادار نیست. با توجه به نوع هموژنیزاسیون، در هموژنیزاسیون یک مرحله‌ای، نمونه دارای کدورت و جذب بالاتری است و

**Table 11- particle size (nm) of sodium caseinate complex (0.5%) and gum balangu (0.5%) at pH 3.5 and different pressures and types of homogenizations**

Pressure (bar)	300	500	700
Type of Homogenization			
Single-stage	611.66±5.1 <sup>Aa</sup>	540.10±5.2 <sup>Ba</sup>	450.50±5.5 <sup>Ca</sup>
Two-stage	601.66±2.7 <sup>Aab</sup>	520.15±4.3 <sup>Bb</sup>	433.33±3.2 <sup>Cab</sup>
Double-pass	583.33±2.2 <sup>Ac</sup>	498.33±4.1 <sup>Bc</sup>	396.66±2.6 <sup>Cc</sup>

Different uppercase letters in each row indicate significant differences between amount of pressures and different lowercase letters in each column indicate significant differences at different type of homogenization ( $p \leq 0.05$ ).

باشد. در فشار ۵۰۰ بار نیز بین میزان اندازه ذرات تحت هموژنیزاسیون یک مرحله‌ای و نمونه تحت هموژنیزاسیون دو مرحله‌ای و همچنین بین اندازه ذرات نمونه تحت هموژنیزاسیون دو مرحله‌ای و نمونه تحت هموژنیزاسیون دوبار عبور اختلاف معنادار وجود دارد و در این فشار نیز کمترین میزان اندازه ذرات مربوط به نمونه تحت

طبق نتایج جدول ۱۱، در فشار ۳۰۰ بار بین میزان اندازه ذرات نمونه‌ها کمپلکس تحت هموژنیزاسیون‌های مختلف، اختلاف معنادار وجود دارد ( $p < 0.05$ ). در فشار هموژنیزاسیون ۳۰۰ بار، بیشترین اندازه ذرات مربوط به نمونه تحت هموژنیزاسیون یک مرحله‌ای و کمترین اندازه ذرات مربوط به نمونه تحت هموژنیزاسیون دوبار عبور می

پتانسیل زتا، بار سطحی خالص ریزپوشینه‌ها را نشان می‌دهد. افزایش پتانسیل زتا، تثبیت سیستم‌های کلونیدی را با توجه به افزایش نیروهای دافعه الکترواستاتیکی افزایش می‌دهد (حسین نیا و همکاران، ۱۳۹۸). بالا بودن پتانسیل زتای ذرات امولسیون موجب بالا رفتن نیروی دافعه الکترواستاتیک و در نتیجه افزایش پایداری فیزیکی سیستم می‌گردد. عوامل متعددی از جمله قدرت یونی، نوع و غلظت ماکرو مولکول‌های پلی ساکاریدی، نسبت بین آنها، pH و غیره بر روی میزان بار سطحی، تحرک الکتروفوریک و پتانسیل زتا تأثیر می‌گذارد [۱۰].

جدول ۱۲، نتایج تأثیر فشار و نوع هموژنیزاسیون بر پتانسیل زتا کمپلکس کازئینات سدیم (۰/۵ درصد) و صمغ بالنگو (۰/۵ درصد) در pH معادل ۳/۵ را نشان می‌دهد.

هموژنیزاسیون دوبار عبور و بیشترین مقدار مربوط به نمونه تحت هموژنیزاسیون یک مرحله‌ای می‌باشد. در فشار ۷۰۰ بار بین میزان اندازه ذرات نمونه تحت هموژنیزاسیون تک مرحله‌ای و نمونه تحت هموژنیزاسیون دو مرحله‌ای اختلاف معنادار وجود ندارد ( $p > 0.05$ ) ولی این اختلاف بین این نمونه‌ها و نمونه تحت هموژنیزاسیون دوبار عبور معنادار است ( $p < 0.05$ ). با توجه به نوع هموژنیزاسیون، با افزایش فشار در تمامی هموژنیزاسیون‌های مورد بررسی، میزان اندازه ذرات کمتر می‌شود و بین میزان اندازه ذرات در نمونه‌ها تحت هر هموژنیزاسیونی، در فشارهای مختلف، اختلاف معنادار وجود دارد ( $p < 0.05$ ). کمترین اندازه ذرات مربوط به نمونه‌ای است که تحت هموژنیزاسیون دوبار عبور در فشار ۷۰۰ بار قرار گرفته است.

۳-۱۲- نتایج تأثیر فشار و نوع هموژنیزاسیون بر اندازه پتانسیل زتا کازئینات سدیم و صمغ بالنگو در pH معادل

۳/۵

**Table 12- Zeta potential (mv) of sodium caseinate complex (0.5%) and gum balangu (0.5%) at pH 3.5 and different pressures and types of homogenizations**

Pressure (bar)	300	500	700
Type of Homogenization			
Single-stage	-19.66 <sup>Ab</sup>	-24.33 <sup>Ba</sup>	-30.00 <sup>Cb</sup>
Two-stage	-15.33 <sup>Aa</sup>	-24.66 <sup>Ba</sup>	-24.66 <sup>Ba</sup>
Double-pass	-24.66 <sup>Ac</sup>	-27.64 <sup>Aa</sup>	-35.33 <sup>Bc</sup>

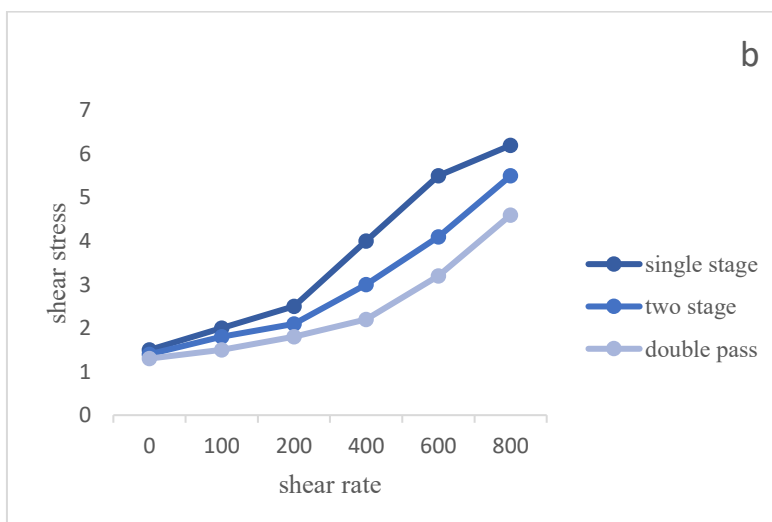
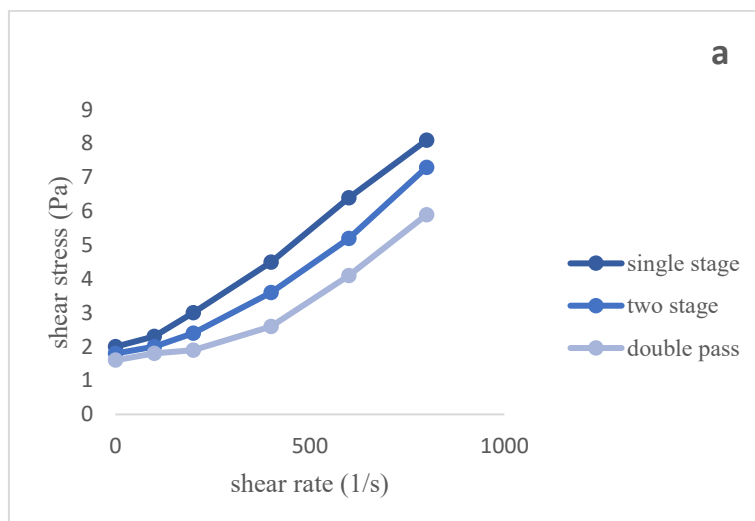
Different uppercase letters in each row indicate significant differences between amounts of pressures and different lowercase letters in each column indicate significant differences at different type of homogenization ( $p \leq 0.05$ ).

اختلاف معنی داری وجود نداشت و در این فشار نیز بیشترین میزان اندازه پتانسیل منفی زتا مربوط به نمونه تحت هموژنیزاسیون دوبار عبور و کمترین مقدار مربوط به نمونه تحت هموژنیزاسیون یک مرحله‌ای بود. در فشار ۷۰۰ بار بین میزان پتانسیل منفی زتای نمونه تحت هموژنیزاسیون تک مرحله‌ای و نمونه تحت هموژنیزاسیون دو مرحله‌ای و نمونه تحت هموژنیزاسیون دوبار عبور اختلاف معنادار وجود داشت ( $p < 0.05$ ). با توجه به نوع هموژنیزاسیون، با افزایش فشار در تمامی هموژنیزاسیون‌های مورد بررسی، میزان پتانسیل منفی زتا بیشتر شد. بیشترین پتانسیل منفی زتا،

مطابق داده‌های جدول ۱۲، در فشار ۳۰۰ بار بین میزان پتانسیل زتای نمونه‌های کمپلکس تحت هموژنیزاسیون‌های مختلف، تفاوت معنی دار وجود دارد ( $p < 0.05$ ). در فشار هموژنیزاسیون ۳۰۰ بار، بیشترین پتانسیل منفی زتا مربوط به نمونه تحت هموژنیزاسیون دوبار عبور و کمترین آن مربوط به نمونه تحت هموژنیزاسیون دو مرحله‌ای بود. در فشار ۵۰۰ بار نیز بین میزان پتانسیل زتای منفی تحت هموژنیزاسیون یک مرحله‌ای و نمونه تحت هموژنیزاسیون دو مرحله‌ای و نمونه تحت هموژنیزاسیون دوبار عبور

۳-۱۳- تاثیر نوع و فشار هموژنیزاسیون بر میزان تغییرات تنش برشی در کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ بالنگو  
تاثیر نوع و فشار هموژنیزاسیون (۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ بار) بر میزان تغییرات تنش برشی (pa) در کمپلکس کازئینات سدیم (۰/۵ درصد) و صمغ بالنگو (۰/۵ درصد) در سرعت برش متفاوت در شکل ۵ نشان داده شده است.

مربوط به نمونه‌ای است که تحت هموژنیزاسیون دوبار عبور در فشار ۷۰۰ بار قرار گرفته بود. افزایش وزن مولکولی نانوکمپلکس باعث منفی‌تر شدن پتانسیل زتا نیز در امولسیون‌ها می‌گردد. از آنجایی که pH ایزوالکتریک کازئینات سدیم تقریباً معادل ۵ است و pH محلول‌ها ۳/۵ در نظر گرفته شده است از این رو پتانسیل زتا منفی می‌شود.



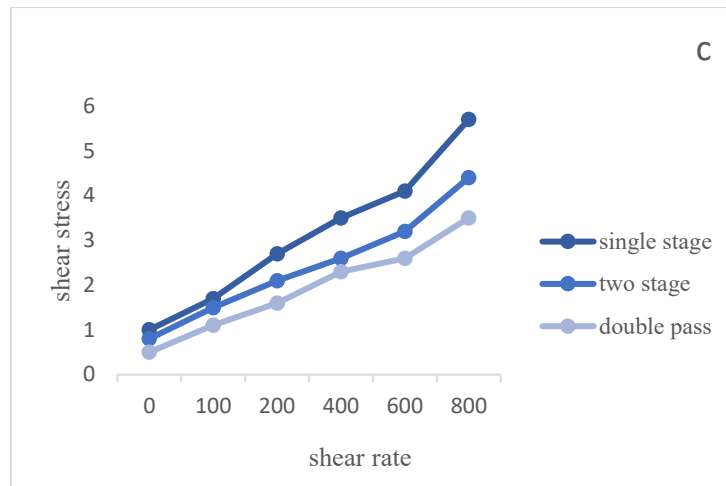


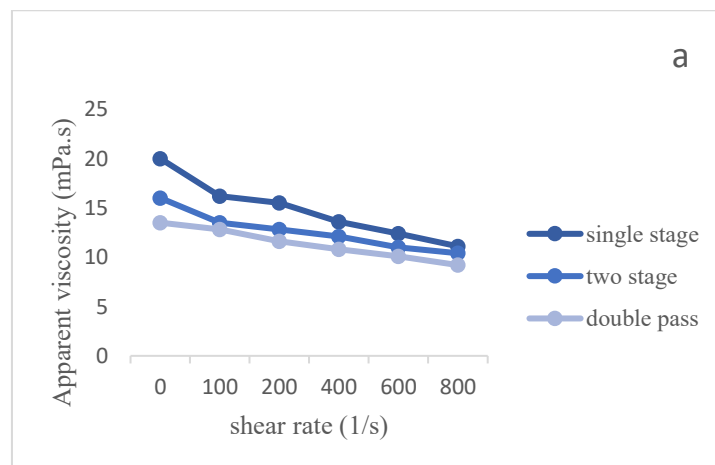
Figure 5 - Effect of type and pressure [300(a), 500(b) and 700 (c) bar] of homogenization on the shear stress of sodium caseinate and gum balangu complex at different shear rates

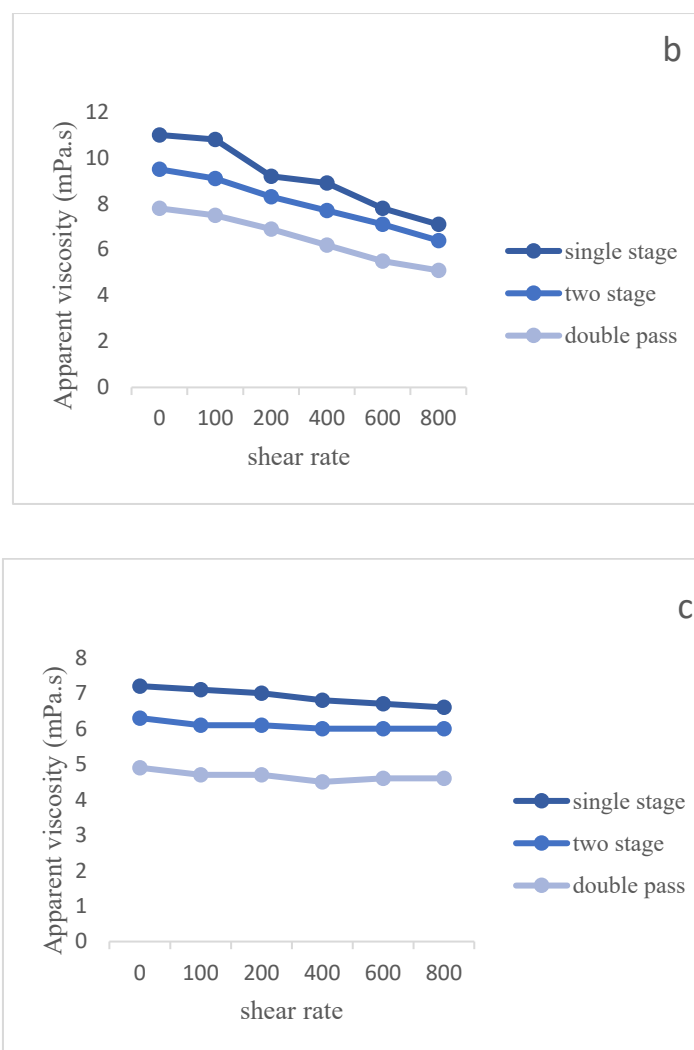
سرعت‌های برشی متفاوت، کمتر شد یعنی کمترین تنش برشی، در نوع هموژنیزاسیون ۲ بار عبور در فشار ۷۰۰ بار مشاهده گردید.

۳-۱۴-تاثیر نوع و فشار هموژنیزاسیون بر میزان ویسکوزیته ظاهری کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ بالنگو

تاثیر نوع و فشار (۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ بار) هموژنیزاسیون بر میزان ویسکوزیته ظاهری (میلی پاسکال ثانیه) کمپلکس کازئینات سدیم (۰/۵ درصد) و صمغ بالنگو (۰/۵ درصد) در سرعت برش متفاوت در شکل ۶ نشان داده شده است.

مطابق داده های شکل ۵، در هر ۳ فشار هموژنیزاسیون ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ بار، با افزایش سرعت برشی، تنش برشی نیز بیشتر شد و بیشترین تنش برشی در هر ۳ نوع هموژنیزاسیون یک مرحله‌ای، دو مرحله‌ای و دوبار عبور مربوط به نمونه‌های کمپلکسی بود که تحت تنش برشی ۸۰۰ 1/s قرار گرفته بودند. در واقع می‌توان یک رابطه خطی بین میزان سرعت برشی و تنش برش به دست آورد. کمترین میزان تنش برشی نیز در هر سه فشار ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ بار مربوط به نمونه کمپلکس تحت هیچ سرعت برشی می‌باشد. در هر سرعت برشی، بیشترین تنش مربوط به نمونه تحت هموژنیزاسیون یک مرحله‌ای و کمترین مقدار مربوط به نمونه تحت هموژنیزاسیون دوبار عبور بود. علاوه بر آن با افزایش فشار هموژنیزاسیون، میزان تغییرات تنش برشی نسبت به





**Figure 6 - Effect of type and pressure [300(a), 500(b) and 700 (c) bar] of homogenization on the apparent viscosity of sodium caseinate and gum balangu complex at different shear rates**

نیز مربوط به فشار ۷۰۰ بار است که کمترین تنش برشی در مقابل سرعت برش را داشت. ویسکوزیته یکی از مهم ترین پارامترها در آماده سازی کمپلکس بسپارهای زیستی معرفی گردید. در پژوهش قاسمی و همکاران (۲۰۱۷a) کمترین ویسکوزیته در pH های اسیدی گزارش گردید. در pH های بالاتر (۶ و ۹) ویسکوزیته به ترتیب بالاتر و پایین تر از pH ۳ بوده است. هرچه احتمال شکل گیری کمپلکس بالاتر باشد ویسکوزیته و پایداری کمتر خواهد بود. بنابراین یک رابطه غیرمستقیم بین تشکیل کمپلکس و پایداری/ویسکوزیته وجود دارد. به عبارت دیگر زمانی که احتمال تشکیل کمپلکس کم است پتانسیل زتای بسپارهای زیستی مورد استفاده، مشابه و بالا بوده که منجر به ایجاد نیروی رانشی و پایداری/ویسکوزیته

طبق نتایج شکل ۶، در فشار ۳۰۰ بار، با افزایش سرعت برشی، ویسکوزیته کمتر شد. در فشار ۵۰۰ بار بین ویسکوزیته نمونه کمپلکس تحت سرعت برش ۱۰۰، ۰ و در ۷۰۰ بار تحت سرعت برشی ۱۰۰، ۰ و ۲۰۰ به ویژه در نمونه تحت هموژنیزاسیون ۲ بار عبور اختلافی مشاهده نشد. در بقیه سرعت های برش مورد بررسی در هر نمونه با افزایش سرعت برشی، ویسکوزیته نیز کاهش یافت. در نمونه ها تحت هموژنیزاسیون تک مرحله ای در هر سرعت برشی مورد بررسی و در هر فشار مورد استفاده، نمونه های کمپلکس دارای ویسکوزیته کمتری نسبت به نمونه های کمپلکس تحت هموژنیزاسیون ۲ بار عبور و دو مرحله ای دارا بودند و نمونه تحت هموژنیزاسیون ۲ بار عبور دارای میزان ویسکوزیته بیشتری نسبت به سایر نمونه ها بودند. بیشترین ویسکوزیته

افزایش ویسکوزیته از بزرگ شدن ذرات امولسیون روغن در آب جلوگیری می‌کند [۳۳].

**۳-۱۵-تاثیر نوع و میزان فشار هموژنیزاسیون بر برازش داده‌های رئولوژیکی نمونه کمپلکس با مدل‌های ریاضی**  
تاثیر نوع و میزان فشار هموژنیزاسیون بر برازش داده‌های رئولوژیکی نمونه کمپلکس با مدل‌های ریاضی ۱۳ نشان داده شده است.

بالاتر ذرات نانوکمپلکس خواهد شد [۲۹]. طبق نتایج حاصل، نمونه‌های مورد بررسی رفتار رقیق شونده با برش (سودوپلاستیک) از خود نشان دادند زیرا با افزایش سرعت برشی، میزان ویسکوزیته کاهش یافت و تنش برشی افزایش داشت. طریقتی و همکاران، بیان کردند، صمغ‌ها به دلیل ایجاد ویسکوزیته بالا و افزایش گرانشی فاز پیوسته و کاهش حرکت ذرات روغن توانایی لازم برای پایدارسازی امولسیون‌های روغن در آب تثبیت شده با پروتئین آب پنیر را دارد و صمغ دانه مرو با کند کردن حرکات ذرات در اثر

**Table 13- Effect of type and amount of homogenization pressure on fitting rheological data of complex sample with mathematical models**

Pressure (bar)	Type	Indices	Newtonian	Bingham	Power	Herschel-Bulkley	Sisko
300	Single-stage	RMSE	0.4626	0.1125	0.0713	0.0678	0.0721
		$r^2$	0.925	0.985	0.988	0.989	0.995
		SSE	12.27	0.88	0.405	0.36	0.311
	Two-stage	RMSE	0.3896	0.1296	0.0559	-	-
		$r^2$	0.961	0.995	0.998	-	-
		SSE	7.452	1.039	0.213	-	-
	Double-pass	RMSE	0.3119	0.086	0.0525	0.0531	0.0721
		$r^2$	0.982	0.994	0.996	0.995	0.996
		SSE	4.853	0.1143	0.1564	0.1619	0.311
500	Single-stage	RMSE	0.0825	0.0627	0.0252	0.0262	0.0264
		$r^2$	0.995	0.996	0.995	0.998	0.998
		SSE	0.382	0.225	0.036	0.0425	0.0421
	Two-stage	RMSE	0.0922	0.0225	0.0129	0.0465	-
		$r^2$	0.996	0.997	0.999	0.999	-
		SSE	0.492	0.0348	0.012	0.1249	-
	Double-pass	RMSE	0.0087	0.0119	0.0132	0.0140	-
		$r^2$	0.998	0.988	0.996	0.994	-
		SSE	0.0043	0.0083	0.0103	0.0114	-
Single-stage	RMSE	0.053	0.0255	0.0151	-	-	
	$r^2$	0.998	0.996	0.998	-	-	
	SSE	0.1657	0.0377	0.0137	-	-	

700	Two-stage	RMSE	0.0091	0.0095	-	-	-
		$r^2$	0.994	0.995	-	-	-
		SSE	0.0022	0.061	-	-	-
	Double-pass	RMSE	0.0061	0.0135	-	-	-
		$r^2$	0.993	0.997	-	-	-
		SSE	0.249	0.0251	-	-	-

نیک نام و همکاران، به بررسی خواص رئولوژیکی پایا و دینامیک امولسیون های حاوی صمغ دانه بارهنگ استخراج شده با پیش تیمار فراصوت پرداختند، طبق نتایج این محققان، همه مدل های مورد بررسی دارای میزان  $I^2$  (۹۷/۰ - ۱) بالا RMSE پایین (۶/۰۸۵ - ۰/۰۰۶۶) بودند. براساس قانون توان، همه امولسیون های مورد بررسی رفتار روان شوندگی با برش را از خود نشان دادند که این امر را می توان از مقادیر شاخص جریان استنباط کرد که در همه نمونه ها این مقدار کمتر از ۱ بود. همچنین در نتایج ایشان، با افزایش مقدار صمغ از ۰/۳ به ۱/۰٪ وزنی - حجمی، مقادیر شاخص جریان از ۰/۸۱۰ به ۰/۶۶۱ کاهش یافت. در مطالعه این محققان، با افزایش مقدار صمغ از ۰/۳ به ۱/۰٪ وزنی - حجمی، مقادیر ضریب قوام افزایش داشت که مقادیر ضریب قوام بالاتر می تواند با وزن مولکولی در ارتباط باشد، چون مقادیر وزن مولکولی نقش بسیار مهمی در ویسکوزیته محلول های صمغ و امولسیون های حاوی آنها دارد [۳۵]. نتایج پژوهش های پیشین توسط Naji-Tabasi (۲۰۱۶)، نشان داد که برای برازش داده های تنش برشی - سرعت برشی امولسیون های حاوی صمغ دانه ریحان، مدل هرشل بالکلی به دلیل R معادل ۰/۹۹ و RMSE کمتر از ۰/۴۲، مناسبترین مدل بود [۳۶]. سماواتی و همکاران تنش برشی - سرعت برشی امولسیون های حاوی صمغ تراگاکانت را مورد بررسی قرار دادند و قانون توان را به عنوان مناسبترین مدل جهت برازش انتخاب کردند [۳۷]. طبق نتایج برازش داده های تنش برشی - سرعت برشی در تحقیق حاضر نشان داد که مدل هرشل بالکلی به دلیل داشتن مقادیر  $I^2$  کمتر از یک و

طبق نتایج جدول ۱۴،  $I^2$  کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ بالنگو (۰/۵ درصد)، در جدول نمایان شده است. در فشار ۳۰۰ بار در روش هموژنیزاسیون یک مرحله ای، مدل سیسکو و پس از آن مدل توان و هرشل بالکلی دارای  $I^2$  بالاتری هستند و از آنجایی که ضریب هرشل بالکلی کمتر از ۱ شده است، دلالت بر رفتار رقیق شونده با برش دارد. در فشار ۳۰۰ بار در روش هموژنیزاسیون دو مرحله ای، بیشترین  $I^2$  مربوط به مدل توان است و در روش هموژنیزاسیون ۲ بار عبور، بیشترین  $I^2$  مربوط به مدل سیسکو و سپس توان است. در فشار ۵۰۰ بار، نیز  $I^2$  نسبت به سایر ضریب ها در مدل های مختلف بالاتر است و میزان  $I^2$  در روش هموژنیزاسیون یک مرحله ای در مدل هرشل بالکلی و سیسکو، بالاتر است و چون از عدد یک کمتر می باشد رفتار رقیق شونده با برش را تایید می کند. در فشار ۵۰۰ بار در روش هموژنیزاسیون دو مرحله ای،  $I^2$  مدل های مورد بررسی بالا می باشد ولی از عدد یک کمتر است که همانگونه که بیان شد نشان دهنده، رفتار رقیق شونده با برش می باشد. در فشار ۵۰۰ بار و روش هموژنیزاسیون دوبار عبور نیز، بیشترین میزان  $I^2$  مربوط به مدل های هرشل بالکلی، توان و نیوتنی است و از عدد یک کمتر هستند. در فشار ۷۰۰ بار نیز در روش هموژنیزاسیون یک مرحله ای، بیشترین  $I^2$  مربوط به مدل هرشل بالکلی و توان است و در روش هموژنیزاسیون دو مرحله ای و روش دوبار عبور، بیشترین  $I^2$  مربوط به مدل بینگهام است. در تمامی موارد مورد بررسی میزان  $I^2$  بالا و میزان RMSE پایین بود که این امر نشان دهنده رفتار سودوپلاستیک در نمونه های کمپلکس می باشد [۳۴].

مدل پاورلا و هرشل بالکلی دارای R بالاتری نسبت به بقیه مدل‌ها بودند. مقدار اندیس جریان در مدل پاورلا و هرشل بالکلی کمتر از ۱ بود که رفتار رقیق شونده با برش نمونه‌ها را تأیید کرد [۳۴].

#### ۴- نتیجه گیری کلی

بطور کلی نتایج نشان داد جهت تولید کمپلکس کازئینات سدیم و صمغ بالنگو، بهترین ترکیب استفاده از ۰/۵ درصد کازئینات سدیم، ۰/۵ درصد صمغ بالنگو با استفاده از هموزنیاتور ۲ بار عبور و فشار ۷۰۰ بار در pH معادل ۳/۵ می باشد.

#### ۵- منابع

[1] Jones, O., Andrew, E. D. & McClements, D. J. 2010. Thermal analysis of b-lactoglobulin complexes with pectin or carrageenan for production of stable biopolymer particles. *Food Hydrocolloids*, 24: 239-248.

[2] Salehi, F., & Kashaninejad, M. 2014. Effect of Different Drying Methods on Rheological and Textural Properties of Balangu Seed Gum, *Drying Technology*. 32: 720-727.

[3] Salehi, F., Kashaninejad, M., & Behshad, V. 2014. Effect of sugars and salts on rheological properties of Balangu seed (*Lallemantia royleana*) gum, *International Journal of Biological Macromolecules*. 67,16-21

[4] Anal, A. K., Tobiassen, A., Flanagan, J. & Singh, H., 2008, Preparation and characterization of nanoparticles formed by chitosan-caseinate interactions, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 64: 104-110.

[5] Ghosh, A., & Bandyopadhyay, P. 2012. Polysaccharide-protein complexes and their applications. *Carbohydrate Polymers*, 89(4): 1310-1316.

[6] Mohammadi, S. 2019. Production of tragacanth/whey protein nanocomplex for curcumin encapsulation and simulation of rheological properties and its release in the model system and pasteurized dairy dessert. PhD thesis. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.

RMSE پایین، مناسب ترین مدل جهت برازش این داده‌ها می باشد.

از آنجایی که pH بهینه ۳/۵ در نظر گرفته شده است می توان گفت در pH اسیدی با خنثی شدن بارهای منفی کازئین روی کم و کیف جاذبه‌ها و پیوندهای میان ملکولی اثر می گذارد و ویژگی های رئولوژیکی تحت تاثیر قرار می گیرد.

محمدخشت چین و همکاران، از صمغ دانه ریحان جهت انکپسوله کردن اسانس پوست گریپ فروت استفاده نمودند و در دوره‌های هموزنیاسیون ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ دور بر دقیقه رفتار رقیق شونده با برش (سودوپالستیک) را در نمونه‌های ریزپوشانی شده مشاهده کردند. در تحقیق ایشان مدلها، رفتار جریانی اسانس‌های انکپسوله شده را  $r^2$  بالا توصیف کردند. مدل‌های رئولوژیکی غیروابسته به زمان شامل پاورلا، هرشل بالکلی، بینگهام و کیسون نشان داد که [7] Ghasemi, S., Jafari, S. M., Assadpour, E. & Khomeiri, M. 2017a. Production of pectin-whey protein nano-complexes as carriers of orange peel oil. *Carbohydrate Polymers*, 177: 369-377.

[8] Eghbal, N., Yarmanda, M. S., Mousavia, M., Degraevb, P., Oulahlb, N. & Gharsallaouib, A. 2016. Complex coacervation for the development of composite edible films based on LM pectin and sodium caseinate. *Carbohydrate Polymers*. 151: 947-956.

[9] Azarikia, F. & Abbasi, S. 2015. Efficacy of whey protein-tragacanth on stabilization of oil-in-water emulsions: Comparison of mixed and layer-by-layer methods. *Food Hydrocolloids*. 2: 1-34.

[10] Khoshmanzhar, M., Ghanbarzadeh, B., Hamishekar, H., Saati Khiabani, M. & Rezaei Makram, R. 2012. Investigation of factors affecting particle size, zeta potential and rheological properties of the paste in a colloidal system containing kappa-carrageenan-sodium caseinate nanoparticles. *Research and Innovation in Food Sciences and Industries*. 1 (4): 255-272.

[11] Azizanbari, C., Ghanbarzadeh, B., Hamishekar, H., & Hosseini, M. (2019). Gellan -Caseinate Nanocomplexes as a Carrier of Omega-3 Fatty Acids: study of Particle size, Rheological Properties and Encapsulation Efficiency. *Food Processing and Preservation Journal*, 5 (2): 19-42.

[12] Khoshmanzar, M., Ghanbarzadeh, B., Hamishekar, H., Sowti, M., & Hoseini, M. (2014). Sodium Caseinate-Carrageenan Biopolymeric

- Nanocomplexes as a Carrier of Vitamin D: Study of Complex Formation, Particles Size and Encapsulation Efficiency. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 27(1): 37-49.
- [13] Jourdain, L., Leser, M. E., Schmitt, C., Michel, M. & Dickinson, E. 2008. Stability of emulsions containing sodium caseinate and dextran sulfate: relationship to complexation in solution. *Food Hydrocolloids*. 22: 647-659.
- [14] Gorji, S.G., Gorji, E.G., & Mohammadifar, M.A. 2014. Characterisation of gum tragacanth (*Astragalus gossypinus*)/sodium caseinate complex coacervation as a function of pH in an aqueous medium. *Food Hydrocolloids*, 34:161-168.
- [15] Ru, Q., Wang, Y., Lee, J., Ding, Y., & Huang, Q. 2012. Turbidity and rheological properties of bovine serum albumin/pectin coacervates: effect of salt concentration and initial protein/polysaccharide ratio. *Carbohydrate Polymers*, 88(3): 838-846.
- [16] Ye, A., Flanagan, J., & Singh, H. 2006. Formation of stable nanoparticles via electrostatic complexation between sodium caseinate and Arabic gum. *Biopolymers*, 82(2): 121-133.
- [17] Kobori, T., Matsumoto, A., & Sugiyama, S. 2009. pH-Dependent interaction between sodium caseinate and xanthan gum. *Carbohydrate Polymers*, 75(4): 719-723
- [18] Girard, M, Turgeon, S. L. & Gauthier, S. F. 2004. Thermodynamic parameters of beta-lactoglobulin – pectin complexes assessed by isothermal titration calorimetry. *Journal of Agriculture Food Chemistry*. 51: 4450-4455.
- [19] Zhou, X., Guo, N., Zhang, F., Zhuo, K., & Zhu, G. 2024. Improving stability and bioavailability of ACNs based on Gellan gum-whey protein isolate nanocomplexes. *Food Chemistry*, X, 24, 102050.
- [20] Karim, A., Rehman, A., Jafari, S. M., Miao, S., Dabbour, M., Ashraf, W., & Lianfu, Z. 2024. Fabrication and Characterization of Sonicated Peach Gum-Sodium Caseinate Nanocomplexes: Physicochemical, Spectroscopic, Morphological, and Correlation Analyses. *Food and Bioprocess Technology*, 18(3):2462-2481.
- [21] Akrami, M., Ghanbarzadeh, B., Pourzafar, F., Mortazavi, A., Dinarvand, R., & Dehghannia. J. 2016. Gum Arabic-Caseinate Nanocomplexes Carrying Beta-Carotene (2): Investigation of Particle Size, Zeta Potential, Morphology and Encapsulation Efficiency. *Food Industry Research*, 26(4): 763-778.
- [22] GBassi, G., Yolou, F., Sarr, S., Atheba, P., Amin, C. & Ake, M. 2012. Whey protein analysis in aqueous medium and in artificial gastric and intestinal fluids. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6: 1828-1837.
- [23] Ranjit, K. & Baquee, A. A. 2013. Nanoparticle: an overview of preparation, characterization and application. *International research journal of pharmacy*, 4 (4): 47-57.
- [24] Rasheed, H. A., Rehman, A., Li, C., Bai, M., Karim, A., Dai, J., & Lin, L. 2024. Fabrication of Citrus bergamia essential oil-loaded sodium caseinate/peach gum nanocomplexes: Physicochemical, spectral, and structural characterization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 260: 129475.
- [25] Nowrouzi S, Ghods Rohani M, Rashidi H. 2021. Effects of Balangu Seed Gum on Physicochemical and Sensory Characteristics of Low-Fat Fresh Yoghurts. *Iranian Journal of Nutrition Science and Food Technology*, 16 (2) :69-78
- [26] Najaf\_Najafi M., & Fazeli, A. 2016. Evaluation of *Lepidium sativum* seed gum effect on physical stability and flow properties of oil-in-water emulsion prepared by high-speed dispersing. *Journal of food science and technology*, 14 (64) :126-116
- [27] Kiani, H., Mousavi, S. M. A. & Emam-Djomeh, Z. 2008. Rheological properties of Iranian yoghurt drink, Doogh. *International Journal of Dairy Science*, 3: 71-78.
- [28] Chen, B., Li, H., Ding, Y. & Suo, H. 2012. Formation and microstructural characterization of whey protein isolate/beet pectin coacervations by laccase catalyzed cross-linking. *LWT- Food Science and Technology*, 47 (1): 31-38.
- [29] Ghasemi, S., Jafari, S. M., Assadpour, E. & Khomeiri, M. 2017a. Production of pectin-whey protein nano-complexes as carriers of orange peel oil. *Carbohydrate Polymers*, 177: 369-377.
- [30] Punia, S., & Dhull, S. B. 2019. Chia seed (*Salvia hispanica* L.) mucilage (a heteropolysaccharide): Functional, thermal, rheological behaviour and its utilization. *International journal of biological macromolecules*, 140: 1084-1090.
- [31] Semwal, A., Ambatipudi, K., & Navani, N. K. 2022. Development and characterization of sodium caseinate based probiotic edible film with chia mucilage as a protectant for the safe delivery of probiotics in functional bakery. *Food Hydrocolloids for Health*, 2(1): 100065.
- [32] Sardarodiyani, M., Arianfar, A., Mohamadi Sani, A., & Naji-Tabasi, S. 2019. Enzymatic purification of Balangu seed (*Lallemantia royleana*) gum and evaluation of its physicochemical and emulsifying properties. *Journal of food science and technology*, 16 (95) :37-51
- [33] Tarighati H., Raftani Amiri, Z., & Esmaeilzadeh kenari R. 2022. Comparison of free and encapsulated extracts of *Mentha pulegium*'s leaves in *Allysum*

*homolocarpum*, chitosan and chitosan- *Allysum homolocarpum* on oxidative stability of soybean oil during 18 days incubation conditions. Food industry research, 32(3): 29-60.

[34] Mohammad Kheshtchin, S. Farahmandfar, R. & Farmani J. 2022. Effect of homogenization on encapsulation of grapefruit (*Citrus paradisi*) peel essential oil with basil seed gum. Innovative Food Technologies, 9(3): 223-238.

[35] Niknam, R., Ayaseh, A., & Ghanbarzadeh, B. 2018. Steady shear flow and dynamic rheology of the emulsions containing ultrasound-assisted extracted *Plantago major* seed gum. Journal of Food Science and Technology, 15(83): 281-298.

[36] Naji-Tabasi, S., & Razavi, S.M.A. 2016. New studies on basil (*Ocimum bacilicum* L.) seed gum: Part 2 – Emulsifying and foaming characterization. Carbohydrate Polymers, 149: 140 – 150.

[37] Samavati, V., Emam-Djomeh, Z., Mohammadifar, M.A., Omid, M., & Mehdinia, A. 2012. Application of rheological modeling in food emulsions. Iran Journal of Chemistry and Chemical Engineering, 31 (2): 71-83.



## Scientific Research

### Investigation of Physicochemical and Rheological Properties of Nanocomplexes Prepared from Sodium Caseinate and Balangu Seed Gum

Roghayeh Ezzati<sup>1</sup>, Leila Roozbeh Nasiraei<sup>1</sup>, Sara Jafarian<sup>1</sup>, Masoud Dezyani<sup>2</sup>, Fatemeh Shahdadi<sup>3</sup>

1- Department of Food Science, Nour Branch, Islamic Azad University, Nour, Iran

2- Department of Food Science, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran

3- Department of Food Science, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran

## ARTICLE INFO

## ABSTRACT

## Article History:

Received: 2025/10/11

Review: 2025/12/02

Accepted: 2025/12/05

## Keywords:

Nanocomplex,  
Balango gum,  
Sodium caseinate,  
Rheological properties,  
Homogenization.

DOI: [10.48311/fsct.2026.116950.82884](https://doi.org/10.48311/fsct.2026.116950.82884)

\*Corresponding Author E-

The aim of this study was to prepare and determine the properties of biopolymer nanocomplexes containing sodium caseinate and Balangu seed gum. To produce the nanocomplex, 0.5% sodium caseinate and 0, 0.25 and 0.5% Balangu gum were used. Three types of complexes with different concentration of Balangu gum produced were investigated in terms of turbidity, particle size, zeta potential, as well as shear stress and viscosity and fitting of rheological data. The results showed that the complex of sodium caseinate and 0.5% Balango gum was selected as the better complex. In addition, the effect of the type of homogenizer (single-stage, two-stage and 2-pass) and the homogenization pressure (300, 500 and 700 bar) at pH 3-8 on the turbidity of the complex was investigated and according to the results, the lowest turbidity was for the sample homogenized at 500 bar pressure, pH 3 and 2-pass homogenizer. The selected pH was considered to be 3.5 and the sample at pH 3.5 was affected by the type and pressure of the defined homogenizer and its characteristics were investigated. According to the results, the lowest turbidity (absorption) was related to the sodium caseinate and balangu gum complex sample subjected to double-pass homogenization and 500 bar pressure (0.48). The highest negative zeta potential was related to the sample subjected to double-pass homogenization at 700 bar pressure (-33.35 mV). The lowest particle size was related to the sample subjected to double-pass homogenization at 700 bar (396.66 nm). In all cases studied, the  $r^2$  value was high and the RMSE value was low, which indicates pseudoplastic behavior in the complex samples.