

(مقاله پژوهشی)

بررسی تاثیر تخلیص آنزیمی بر ویژگی های رئولوژیکی صمغ دانه بالنگو (*Lallemantia royleana*)

مریم سردودیان^۱، اکرم آریان فر^{۱*}، علی محمدی ثانی کاخکی^۱، سارا ناجی طبسی^۲

۱-باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران

۲-گروه نانو فناوری مواد غذایی، موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۰۹

چکیده

صمغ های غذایی از جمله افزودنی هایی هستند که نقش های گوناگونی از قبیل قوام دهندگی، ژل دهندگی و پایدارکنندگی را در محلول های غذایی ایفا می کنند. هدف از این پژوهش، بررسی خواص رئولوژیکی صمغ دانه بالنگو فاقد پروتئین می باشد. بدین منظور، صمغ دانه بالنگو تهیه شد و پس از هیدرولیز آنزیمی آن، صمغ دانه بالنگو فاقد پروتئین تهیه شد و خواص رئولوژیکی صمغ دانه بالنگو حاوی و فاقد پروتئین از لحاظ پارامترهایی نظیر ویسکوزیته ذاتی، خواص رئولوژیکی پایا (آزمون مستقل از زمان و وابسته به زمان) و خواص رئولوژیک دینامیک (آزمون روبش تنش و روبش فرکانس) بررسی شد. نتایج نشان داد، صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن در غلظت ۱ درصد (وزنی-وزنی) رفتار شبه جامد و تضعیف شونده با برش از خود نشان دادند. همچنین دارای شکل فضایی مارپیچ تصادفی در ناحیه رقیق بودند. با توجه به ضریب تبیین (۰/۹۹۸)، مدل هرشل بالکی جهت توصیف رفتار رئولوژیکی محلول های صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن انتخاب شد. در آزمون وابسته به زمان صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن از نظر ایجاد ساختار و میزان تیسکوتروپی آن توانایی یکسانی نمایش دادند. نتایج آزمون خصوصیات رئولوژیکی دینامیکی نشان داد منحنی مدول ذخیره بالاتر از مدول اتلاف در ناحیه خطی قرار داشت که نشانگر رفتار شبه ژل یا شبه جامد در صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین تشکیل دهنده آن است. هیدرولیز و کاهش مقدار پروتئین تاثیر معنی داری در رفتار ویسکوالاستیک نمونه فاقد پروتئین ایجاد نکرد.

واژه های کلیدی: صمغ دانه بالنگو، آنزیم پروتئیناز، خواص رئولوژیکی، ویسکوالاستیک

۱- مقدمه

هیدروکلونیدها (صمغ‌ها) پلیمرهایی با وزن مولکولی بالا و مجموعه‌ای از پلی‌ساکاریدها و برخی پروتئین‌ها هستند که با حل یا پخش شدن در آب، ویسکوزیته را افزایش می‌دهند (۶۶). هیدروکلونیدها به سبب دارا بودن خصوصیات و ویژگی‌هایی همچون تشکیل ژل، امولسیون‌کنندگی، تثبیت‌کنندگی، پوشش‌دهندگی و پایدارکنندگی به طور گسترده در صنایع غذایی و پزشکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۱، ۵). انواع مختلفی از این هیدروکلونیدها در طبیعت وجود دارند که به طور معمول در میوه، گل، برگ، ساقه، ریشه و دانه گیاهان مختلف یافت می‌شوند (۶). کاربرد و اهمیت هیدروکلونیدها به خواص عملکردی آن‌ها بستگی دارد. در مواد غذایی عواملی مانند ساختار مولکولی هیدروکلونید، غلظت هیدروکلونید، pH، دما و واکنش هیدروکلونید با ترکیبات موجود در غذا بر روی خواص عملکردی آن تاثیرگذار می‌باشد. به تازگی تقاضا برای هیدروکلونیدها با خواص عملکردی خاص افزایش یافته است و یافتن منابع جدید با خواص ویژه اهمیت فراوانی یافته است و این نکته قابل توجه می‌باشد که صمغ‌های دانه‌ای و پلی‌ساکاریدهای گیاهی به راحتی در دسترس می‌باشند (۱، ۳۹، ۴۰). صمغ‌ها به دلیل عواملی همچون مقاوم بودن به pH اسیدی و سازگاری زیستی، جزو هیدروکلونیدهای پلی‌ساکاریدی دارویی پرکاربرد هستند (۳). حیوانات، گیاهان و میکروب‌ها می‌توانند منابع طبیعی مناسبی جهت دستیابی به هیدروکلونیدها باشند. اما عدم دسترسی کامل به منابع حیوانی و قیمت بالای آن‌ها، شیوع برخی بیماری‌ها از جمله جنون گاوی و تمایل مردم به رژیم‌های گیاهی همگی جزء عواملی هستند که سبب شده است تا منابع گیاهی نسبت به سایر منابع تامین‌کننده هیدروکلونیدها در ارجحیت باشند (۶۶). برخی از گیاهان که در نواحی مختلف ایران رشد می‌کنند، دارای پلی‌ساکاریدهای مهم می‌باشند و صمغ استخراجی از دانه‌های آن‌ها را می‌توان به عنوان منابع جدید هیدروکلونیدی معرفی کرد. دانه‌ی گیاهانی مانند بالنگو،

قدومه‌ی شهری، قدومه‌ی شیرازی، شاهی، بارهنگ و ریحان که به عنوان منابع دارویی استفاده می‌شوند و دارای اثرات درمانی با ارزشی هستند، حاوی مقدار زیادی موسیلاژ قابل استخراج به عنوان هیدروکلونید نیز می‌باشند (۵۵). بالنگو گیاهی با نام علمی *Lallemantia L. royleana* متعلق به خانواده نعناعیان است که در مناطق مختلف جهان به خصوص خاورمیانه رشد می‌کند (۴۷). دانه‌های بالنگو به شکل بیضی و تیره رنگ می‌باشند (۴۷). دانه‌های بالنگو بلافاصله پس از قرار گرفتن در داخل آب، آن را جذب کرده و مایع چسبناک، کدر و بی‌مزه‌ای (موسیلاژ) را ایجاد می‌کند. به علت تولید مقادیر بالای موسیلاژ، این دانه می‌تواند به عنوان یک منبع جدید هیدروکلونید در فرمولاسیون مواد غذایی به کار رود. در ایران عموماً از آن به عنوان تخم شربت‌ی یاد می‌شود (۴۷). دانه‌های این گیاه آروماتیک به دلیل تولید موسیلاژ، به صورت سنتی در درمان نارسایی‌هایی همچون خونریزی‌های لثه، سرفه‌های ناشی از سرماخوردگی، ناراحتی‌های کلیوی و به عنوان خنک‌کننده، مسکن درد و آرام‌بخش استفاده می‌شود (۲، ۹). صمغ دانه بالنگو به شرایط محیطی مانند دما و حضور کاتیون‌ها حساس است. با این وجود در مقایسه با سایر هیدروکلونیدها، صمغ حاصل از دانه بالنگو ویسکوزیته ذاتی بالاتری دارد (۵۶). صمغ دانه بالنگو رفتار سودوپلاستیک دارد و در سرعت‌های برشی پائین ویسکوزیته بالایی ایجاد می‌کند (۵۷). صمغ استخراج شده از دانه بالنگو به طور عمده از پلی‌ساکاریدها (حدود ۷۷/۱ درصد)، رطوبت (۸/۲ درصد) پروتئین (۱/۶ درصد) و خاکستر (۱۳/۱ درصد) تشکیل شده است (۱۹). صمغ دانه بالنگو را می‌توان به عنوان یک ترکیب پایدارکننده در سیستم‌های امولسیون بکار برد. به علاوه، سیکل‌های انجماد-ذوب نیز تا حدی سبب افزایش ظرفیت امولسیون صمغ دانه بالنگو و بهبود ویژگی‌های بافتی ژل حاصل از این صمغ می‌گردد (۱۹). ظرفیت عالی پیوند با آب و عدم سینرسیس پس از سیکل‌های انجماد-ذوب و اثر مثبت آن بر ویژگی‌های بافتی ژل صمغ دانه بالنگو می‌تواند برای

۵۹ به ۱) در آب با دمای ۸۵ درجه سانتی گراد، $pH = 7$ و به مدت ۲۰ دقیقه قرار گرفتند. صمغ دانه های متورم توسط دستگاه استخراج کننده مجهز به صفحه چرخنده (استخراج کننده آزمایشگاهی، شرکت پارس خزر، ایران) جداسازی شد. به منظور حذف ناخالصی های موجود، محلول صمغ از صافی توری عبور داده شد. جهت تخلیص صمغ دانه بالنگو، صمغ جدا شده با ۳ برابر حجم اتانول ۹۶ درصد مخلوط شد تا پلی ساکاریدها رسوب کنند. رسوب ها جدا شدند و مجدد در آب مقطر حل گردید و سپس توسط آون (مدل ۱۷۲۰، شرکت Memert، آلمان) با جریان هوا در دمای ۳۸ درجه سانتی گراد خشک شد و صمغ حاصل بوسیله آسیاب (مدل Panasonic، MJ-J176P، ژاپن) خرد و به منظور یکنواخت شدن پودر، با الک (مش ۱۲۰، شرکت الک دماوند، ایران) الک گردید، بسته بندی (کیسه پلاستیکی زیب دار) و در جای خشک و خنک نگهداری شد.

۲-۳- صمغ دانه بالنگو فاقد پروتئین

صمغ دانه بالنگو فاقد پروتئین توسط هیدرولیز آنزیمی تهیه شد. جهت هضم پروتئین، از پودر صمغ دانه بالنگو، محلول ۰/۱ درصد وزنی- وزنی تهیه شد و به همراه آنزیم پروتئیناز K (۱ میلی گرم بر میلی لیتر) به مدت ۳ ساعت در ۳۷ درجه سانتی گراد بوسیله همزن (مدل Topolino، شرکت IKA، آلمان) همزده شد. پس از تکمیل عمل هضم، جهت غیرفعال کردن آنزیم، اتانول (۹۶ درصد) با نسبت ۳ به ۱ به سیستم اضافه شد و به مدت ۶ ساعت نگهداری شد. پلی ساکارید جدا شده و دوباره در آب حل و محلول حاصل در ۱۵۰۰۰ g به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ (مدل Z36HK، شرکت HERMLE، آلمان) و سوپرناتانت به عنوان نمونه فاقد پروتئین جمع آوری و صمغ دانه بالنگو فاقد پروتئین نامیده شد. نمونه حاصل در آون تحت دمای ۳۸ درجه سانتی گراد خشک شد و پس از صاف شدن، بسته بندی (کیسه پلاستیکی زیب دار) و در جای خشک و خنک نگهداری شد (۲۰).

غذاهای منجمد و به منظور کاستن تاثیر مخرب شرایط انجماد و جلوگیری از رشد کریستال یخ مورد استفاده قرار گیرد (۱۹). محمد امینی و رضوی (۲۰۱۲)، تاثیر دماهای مختلف (۲۰-۵۰ درجه سانتی گراد)، یون های مختلف (سدیم و کلسیم) و قندهای (ساکارز و لاکتوز) روی خواص رئولوژی محلول صمغ دانه بالنگو مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصله نشان داد تاثیر دما در مقایسه با قدرت یونی و قندها بر روی ویسکوزیته ذاتی کمتر بود (۳۹). ناجی و همکاران (۲۰۱۶)، خصوصیات رئولوژیکی صمغ دانه ریحان و اجزای (وزن مولکولی بالا، وزن مولکولی پایین و نمونه فاقد پروتئین) حاصل از آن مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، صمغ دانه ریحان و تمامی اجزای آن دارای شکل فضایی ماریچ تصادفی در ناحیه رقیق بودند. همچنین صمغ دانه ریحان و تمامی اجزای آن (غلظت ۱ درصد) رفتار شبه جامد و تضعیف شونده با برش از خود نشان دادند (۴۹). با توجه به افزایش رو به رشد استفاده از هیدروکلوئیدهای بومی در فرمولاسیون مواد غذایی، بررسی و شناسایی ساختار شیمیایی آن ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. لذا هدف از انجام پژوهش، بررسی خصوصیات رئولوژیکی صمغ دانه بالنگو فاقد پروتئین می باشد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد اولیه

دانه های بالنگوی شیرازی (*Lallemantia royleana*) به میزان لازم از شهرستان بجنورد تهیه گردید و تا زمان انجام آزمایش ها (یک هفته)، در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی گراد) و در مکانی خشک نگهداری شدند. برای تهیه امولسیون ها از روغن آفتابگردان (لادن، ایران) استفاده شد.

۲-۲- استخراج صمغ دانه بالنگو

صمغ دانه بالنگو با استفاده از روش ارائه شده توسط محمد امینی (۲۰۰۷) تهیه شد (۴۰). دانه ها پس از خریداری تمیز گشته، مواد زائد و ناخالصی ها مانند کاه و سنگ از دانه ها جدا شد. به منظور استخراج صمغ، دانه ها (نسبت آب به دانه

۲-۴- بررسی ترکیبات شیمیایی صمغ

میزان رطوبت براساس استاندارد AOAC (۱۱)، پروتئین به روش کلدال (۴) و کربوهیدرات به روش فنل- اسیدسولفوریک و با استفاده از گلوکز به عنوان استاندارد تعیین گردید (۱۸).

۲-۵- بررسی ویژگی های رئولوژیکی

۲-۵-۱- خواص رئولوژیکی ناحیه رقیق

ویسکوزیته ذاتی با استفاده ویسکومتر لوله موئن آبلود (سمی میکرو ویسکومتر شماره ۷۵، شرکت Canon، آمریکا) که قبلاً کالیبر شده بود، در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد تعیین شد. محلول های رقیق صمغ بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن در دمای اتاق و در غلظت ثابت mg/ml ۰/۴ در آب دیونیزه بر روی همزن مغناطیسی تهیه شدند و جهت هیدراسیون کامل بمدت یک شب بر روی مخلوط کن غلظکی نگهداری شد. هر نمونه در ۳ تکرار تهیه شد. سپس محلول توسط سمپلر وارد ویسکومتر شده و اجازه داده شد که دمای آن با حمام آب یکسان شود. سپس توسط پوآر به قسمت بالایی بازوی ویسکومتر مکش اعمال شد تا محلول به درون حباب بالایی کشیده شود. زمانی که مکش برداشته شد، در اثر نیروی جاذبه، مایع جریان یافت. مدت زمانی که مایع از محل خط نشانه بالایی به خط نشانه پایینی رسید توسط یک کرنومتر اندازه گیری شد. برای هر رقت حداقل سه بار مدت زمان عبور محلول یادداشت و به صورت میانگین ثبت شد (۳۰). در ابتدا زمان عبور حلال اندازه گیری شد. سپس زمان عبور ۲ ml از محلول اندازه گیری شد. سپس محلول مورد آزمون موجود در ویسکومتر با افزودن آب دیونیزه به درون ویسکومتر و جایجا کردن آب درون لوله توسط پوآر رقیق شد و پس از طی زمان کافی جهت به دما رسیدن، زمان عبور هر یک از این رقت ها نیز اندازه گیری شد. ویسکوزیته ذاتی $[\eta]$ از طریق برون یابی ویسکوزیته نقصانی $^1 (\eta_{sp}/C)$ یا ویسکوزیته درونی یا اصلی 2 تا رقت بی نهایت براساس معادلات هاگینز

(۱۹۴۲) و کرامر (۱۹۳۸) بدست آمد (به ترتیب معادلات ۱-۴). η_{rel} (معادله ۱) و η_{sp} (معادله ۲) به ترتیب ویسکوزیته نسبی و ویسکوزیته مخصوص (بدون بعد) می باشند. η و η_s به ترتیب ویسکوزیته های محلول و حلال مورد استفاده می باشند. K_H ثابت معادله هاگینز (معمولاً مثبت) (معادله ۳) و K_K ثابت معادله کرامر (معمولاً منفی) (معادله ۴) می باشند (۲۸، ۳۱).

$$(\eta_{rel}) = \eta/\eta_s \quad (1)$$

$$\eta_{sp} = (\eta - \eta_s)/\eta_s = \eta_{rel} - 1 \quad (2)$$

$$\eta_{sp} /C = [\eta] + K_H [\eta]^2 C \quad (3)$$

$$(\ln \eta_{rel}) /C = [\eta] + K_H [\eta]^2 C \quad (4)$$

۲-۵-۲- بررسی خواص رئولوژیکی پایا

خصوصیات رئولوژیکی پایا با استفاده از رئومتر پارافیزیکا (MCR 301, Anton paar GmbH، آلمان) مجهز به هندسه مخروط-صفحه با قطر ۵۰ mm، اندازه گپ mm ۰/۲۰۶ و زاویه ۴ درجه مورد بررسی قرار گرفت. محلول های صمغ بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن تهیه شده بر روی صفحه رئومتر قرار گرفت و ۱۰ دقیقه زمان استراحت داده شده تا دمای نمونه به دمای ۲۰ درجه سانتی گراد برسد. از سیستم هود دستگاه برای کنترل بهتر دمای اطراف نمونه استفاده شد.

۲-۵-۱- آماده سازی محلول ها

محلول های صمغ بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن در غلظت ۰/۱ درصد (وزنی-وزنی) با حل کردن پودر نمونه مورد نظر در آب دیونیزه تهیه شدند. سدیم آزید به منظور جلوگیری از آلودگی های میکروبی به میزان ۰/۰۲ درصد (وزنی-حجمی) به محلول ها اضافه گردید. سپس جهت هیدراسیون کامل به مدت حداقل یک شب در دمای اتاق به هم زده شد. در نهایت ۳ ساعت به محلول ها استراحت داده - شد (۴۸). نمونه ها در سه تکرار تهیه و مورد آزمون قرار گرفتند.

۲-۲-۵-۲- آزمون مستقل از زمان

رفتار جریان پایا در دامنه درجه برش 1/s ۰/۱-۳۰۰ مورد ارزیابی قرار گرفت (۴۸). با توجه به رفتار غیرنیوتنی این صمغ‌ها، به منظور توصیف رفتار رئولوژیکی، داده‌های آزمون (سرعت برشی- تنش برشی) با مدل‌های قانون توان و هرشل بالکی برآزش شد. در معادله ۵ (معادله قانون توان)، k ضریب قوام ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$) و n شاخص رفتار جریان (بدون بعد) می‌باشد. در معادله ۶ (معادله هرشل بالکی)، k_H ، τ_{0H} و n_H به ترتیب تنش تسلیم (Pa)، ضریب قوام ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$) و شاخص رفتار جریان مدل هرشل-بالکی (بدون بعد) است. جهت تعیین مدل مناسب از نرم افزار Matlab (2015a) استفاده شد.

$$\tau = k_p \dot{\gamma}^{np} \quad (5)$$

$$\tau = k_H (\dot{\gamma})^{n_H} + \tau_{0H} \quad (6)$$

۲-۲-۵-۳- آزمون وابسته به زمان

برای ارزیابی خواص رئولوژیکی وابسته به زمان، نمونه‌ها در غلظت ۱ درصد (وزنی-وزنی) تهیه و تحت سرعت برشی ثابت 50 1/s قرار گرفت. تنش برشی (τ) به عنوان تابعی از زمان اعمال برش (t) تا رسیدن به یک مقدار تنش ثابت ثبت و رفتار جریان وابسته به زمان نمونه‌ها با مدل سینتیک ساختاری (معادله ۷) مورد ارزیابی قرار گرفت (۶۲). در این معادله: η_0 ویسکوزیته ظاهری اولیه (Pa.s) در لحظه $t=0$ (حالت ساختاری) و η_∞ ویسکوزیته ظاهری (Pa.s) در حالت تعادلی در لحظه $t \rightarrow \infty$ (حالت غیر ساختاری)، n ، درجه واکنش تخریب ساختار (بدون بعد) و k ثابت تخریب ساختار (1/s) می‌باشند. در این تحقیق $n=2$ در نظر گرفته شد.

$$\left[\left(\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} \right) \right]^{1-n} = (n-1)kt + 1 \quad (7)$$

۲-۲-۶- بررسی خواص رئولوژیک دینامیک

آزمون‌های رئولوژیک دینامیکی صمغ بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن با استفاده از رئومتر پارفیزیکا^۱ مجهز به هندسه مخروط-صفحه در حالت کنترل شده تنش برشی (CSS^۲) انجام گرفت.

۲-۲-۶-۱- آزمون روبش تنش^۳

جهت بررسی خصوصیات رئولوژیکی دینامیکی ناحیه ویسکو الاستیک خطی (LVE)^۴، آزمون دامنه نوسانی انجام شد. دمای نمونه با استفاده از پلیر، کنترل شده و جهت حفظ یکنواختی دما در حالت فعال طی آزمون، نمونه‌ها با یک ژاکت محافظ (هود اختصاصی دستگاه) پوشانده شدند. پس از قرار دادن نمونه‌ها بر روی پلیر ۱۰ دقیقه زمان استراحت داده شد تا دمای نمونه به دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد برسد. آزمون روبش تنش در دمای مذکور، در فرکانس ثابت ۱ هرتز و در دامنه تنش ۴۰-۰/۰۱ پاسکال برای تمامی نمونه‌ها به منظور تعیین ناحیه ویسکو الاستیک خطی، مدول‌های ذخیره^۵، افت^۶ و زاویه فازی^۷، تنش تسلیم^۸، تنش نقطه جریان^۹ و مدول متناظر^{۱۰} انجام گرفت (۴۸). جهت برآورد پارامترهای خصوصیات ویسکو الاستیک از نرم‌افزار فیزیکا رئومتر دیتا آنالیز و متلب (۲۰۱۵a) استفاده شد.

۲-۲-۶-۲- آزمون روبش فرکانس^{۱۱}

آزمون روبش فرکانس در دامنه فرکانس زاویه‌ای ۱۰-۰/۰۱ هرتز، تنش ثابت ۰/۱ پاسکال و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت. مدول‌های ذخیره، افت و زاویه فازی مورد بررسی قرار گرفتند (۴۸). جهت برآورد پارامترهای خصوصیات ویسکو الاستیک از نرم‌افزار فیزیکا

1 -Paar Physica rheometer

2 -Controlled Shear Stress

3 -Stress Sweep

4 -Linear Viscoelastic Region

5 -Storage Modulus

6 -Loss Modulus

7- Phase Angle

8-Yield Stress

9 -Flow Point Stress

10 -Corresponding Modulus

11 -Frequency Sweep

۲-۲- تجزیه و تحلیل آماری

تمامی آزمایشات در سه تکرار انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری نتایج از طریق تجزیه واریانس در قالب طرح کاملاً تصادفی و مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن در سطح آماری ۵ درصد صورت گرفت. برای مدل‌سازی و تجزیه تحلیل از نرم افزارهای مربوطه مانند Matlab (2015a) و SPSS 22، استفاده شد و جهت رسم نمودارها از نرم افزار Excel (۲۰۱۳) استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ترکیبات شیمیایی صمغ

ترکیب شیمیایی صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن در جدول ۱ آورده شده است.

رئومتر دیتا آنالیز و متلب (۲۰۱۵) استفاده شد. وابستگی مدول‌های G' و G'' به فرکانس با استفاده از توابع قانون توان (معادله‌های ۹ و ۱۰) تعیین شد:

$$G' = a\omega^b \quad (9)$$

$$G'' = c\omega^d \quad (10)$$

که در آن ω فرکانس نوسانی است، b و d شاخص‌های قانون توان در مدول ذخیره و اتلاف می‌باشند برای ژل کووالانسی، $b = 0$ ، در حالی که برای ژل فیزیکی $b > 0$ است. در مقادیر b نزدیک به ۱، سیستم به صورت یک ژل ویسکوز رفتار می‌کند. بنابراین در مقادیر b و d نزدیک به صفر، G' و G'' با فرکانس تغییر نمی‌کنند و الاستیسیته بالای ساختار را نشان می‌دهند (۲۴).

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن (براساس وزن خشک (%))*

نمونه‌ها	رطوبت	پروتئین	کربوهیدرات
صمغ دانه بالنگو	۸/۱۶±۰/۰۳ ^a	۸/۴۲±۰/۱۴ ^a	۷۲/۹۸±۰/۱۴ ^a
صمغ دانه بالنگو فاقد پروتئین	۹/۲۰±۰/۱۲ ^a	۰/۴۱±۰/۲۳ ^b	۷۲/۳۵±۰/۳۱ ^a

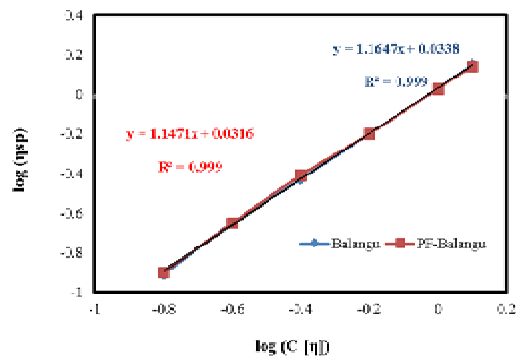
*ارقام دارای حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند (آزمون دانکن، $P < 0/05$).

$\log C[\eta]$ که تحت عنوان منحنی برتر^۱ شناخته می‌شود (۱۳)، رسم گردید (شکل ۱). شیب منحنی برتر در محدوده ۱/۱ تا ۱/۴ در منطقه رقیق است و در ناحیه غلیظ این شیب از ۲/۷ تا ۵/۱ متغیر است (۴۳). شیب منحنی برتر صمغ بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن به ترتیب ۱/۱۶۴ و ۱/۱۴۷ بدست آمد که نشان می‌دهد تمامی محلول‌ها در ناحیه رقیق قرار داشتند (جدول ۲). عدد بری^۲ یا غلظت بدون بعد $C[\eta]$ شاخصی برای تعیین درگیری‌های ملکولی است، زمانی که عدد بری کوچکتر از ۱ باشد، نشان‌دهنده ناحیه رقیق می‌باشد و زمانی که بین ۱ تا ۱۰ باشد بیانگر ناحیه نیمه رقیق است (۲۱). در این مطالعه، عدد بری در محدوده ۰/۹۵-۰/۱۵۸ بود که عدم درگیری ملکولی را نشان می‌دهد (جدول ۲).

شناسایی پلی‌ساکاریدها تعیین‌کننده خالص بودن آن‌ها است که با بررسی ترکیبات شیمیایی آن‌ها از جمله اندازه‌گیری رطوبت، پروتئین و کربوهیدرات منعکس می‌شود (۱۲). براساس نتایج جدول ۱، هم میزان رطوبت و هم کربوهیدرات صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن تفاوت آماری معنی‌داری نداشت ($P > 0/05$). میزان پروتئین به طور معنی‌داری بین نمونه‌ها متفاوت بود ($P < 0/05$). فرحناکی و همکاران (۱۳۹۰)، به بررسی صمغ حاصل از دانه شاهی پرداختند و میزان رطوبت، پروتئین و خاکستر آن به ترتیب برابر است با ۴/۸۴، ۵/۷۵ و ۵/۷۵ درصد گزارش کردند (۵).

۳-۲- خواص رئولوژیکی ناحیه رقیق

به‌منظور تعیین دامنه نیوتنی رقیق، نمودار $\log(\eta_{sp})$ در برابر



شکل ۱- منحنی لگاریتمی ویسکوزیته مخصوص (η_{sp}) در برابر شاخص درجه اشغال فضایی $C[\eta]$ صمغ بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن در آب دیونیزه و دمای 25°C

جدول ۲- خواص رئولوژیکی ناحیه رقیق صمغ بالنگو و نمونه فاقد پروتئین*

نمونه‌ها	$[\eta]$ dl/g	k_H	$k_{H+} k_K$	$C[\eta]$	b
صمغ بالنگو	$45/11 \pm 0/12^a$	$0/28 \pm 0/02^a$	$0/486 \pm 0/08^a$	$0/158 - 0/94$	$1/17 \pm 0/013^a$
نمونه فاقد پروتئین	$44/31 \pm 0/25^a$	$0/23 \pm 0/04^a$	$0/497 \pm 0/04^a$	$0/163 - 0/95$	$1/14 \pm 0/034^a$

*ارقام دارای حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند (آزمون دانکن، $P < 0/05$).

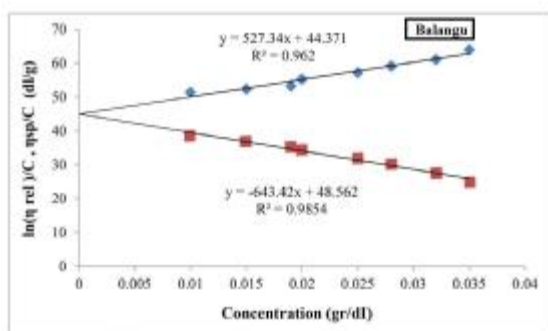
به‌عنوان مثال، میزان K_H تقریباً $0/35$ برای بیوملکول‌های انعطاف‌پذیر می‌باشد (۵۲). میزان K_H برای صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن به ترتیب $0/28$ و $0/23$ حاصل شد (جدول ۲). میزان K_H نشان داد که صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن بیوملکول‌های انعطاف‌پذیر هستند. از لحاظ تئوری، برای شکل فضایی مارپیچ تصادفی رابطه بین ثابت-های بدون بعد هاگینز و کرامر $k_{H+} k_K = 0/5$ است. در برخی از موارد، انحراف از ارزش نظری روی می‌دهد که به اتصالات ملکولی نسبت داده می‌شود (۴۱). ارزش $k_{H+} k_K$ برای صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن به ترتیب $0/486$ و $0/497$ تعیین شد. جهت تعیین شکل فضایی پلی ساکارید از رابطه قانون توان استفاده شد که مقدار توان (b) یا شیب مدل قانون توان (معادله ۸) شکل فضایی ملکولی را توصیف می‌کند (۲۶، ۳۶). مقدار b زمانی که از ۱ بیشتر است بیانگر شکل فضایی منعطف مارپیچ تصادفی^۱ در ناحیه رقیق است. در حالیکه مقادیر شیب کمتر از ۱ مربوط به شکل فضایی سخت‌تر میله مانند^۲ است (۳۷، ۴۳).

ویسکوزیته ذاتی $[\eta]$ معیاری از توانایی درونی یک پلیمر جهت افزایش ویسکوزیته محلول است (۷). ویسکوزیته ذاتی صمغ دانه بالنگو این پژوهش نسبت به سایر صمغ‌های بومی چون صمغ دانه شاهی (25°C ; $3/91$ dl/g)، مرو (25°C ; $24/32$ dl/g) و قدومه شیرازی (25°C ; $24/32$ dl/g) بیشتر است (۱۸/۳۴، ۱۰، ۵۲، ۲۰). همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، مقدار ویسکوزیته ذاتی نمونه فاقد پروتئین با حذف پروتئین تغییر معنی‌داری نکرد ($P > 0/05$). نتایج به دست آمده این تحقیق با نتایج تحقیقات ناجی و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت داشت آنها گزارش کردند مقدار ویسکوزیته ذاتی برای صمغ دانه ریحان و نمونه فاقد پروتئین به ترتیب برابر $39/17$ و $38/18$ dl/g بود که نشان می‌دهد تیمار دادن صمغ دانه ریحان با آنزیم پروتئاز تاثیری بر اندازه و سختی زنجیره مولکولی پلیمر نگذاشته است (۴۹). ثابت هاگینز (K_H) معیاری از برهم‌کنش پلیمر-پلیمر در محیط رقیق است و همچنین شکل فضایی پلیمر را نشان می‌دهد. مقدار K_H برای شکل فضایی کروی غیرباردار تقریباً ۲ است. مقادیر کمتر از ۲ بیانگر پلیمرهای توسعه یافته است،

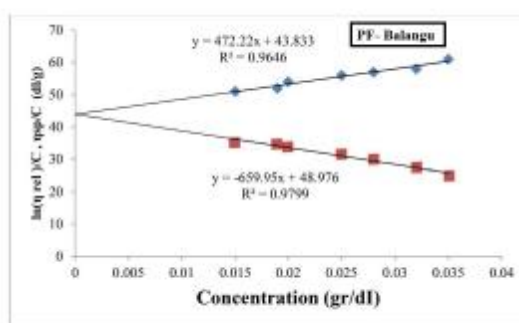
بر شکل فضایی پلی ساکارید ریحان نداشته است (۴۹). شکل فضایی مارپیچ تصادفی، یک ویژگی خاص برای پلی ساکاریدهای خطی در محلولها است. بسیاری از پلی ساکاریدها مانند کاراگینان، آلژینات و صمغ لویای افاقا در محلولهای رقیق دارای شکل فضایی مارپیچ تصادفی هستند. پلی ساکاریدها با ساختار بسیار منشعب مانند صمغ عربی معمولاً یک شکل کروی فشرده دارند که محلول آن معمولاً ویسکوزیته بسیار پایین با رفتار جریان نیوتنی دارد (۶۵). علاوه بر این، بسیاری از هیدروکلوئیدها با ساختار مارپیچ تصادفی مانند آگار قادر به تشکیل یک شبکه ژلی از طریق ایجاد اتصالات عرضی فیزیکی در محلول در دمای مناسب است (۵۰).

$$\eta_{sp} = a C^b \quad (8)$$

همان طور که در جدول ۲ مشاهده می شود، تفاوت معنی داری بین مقدار b صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن ملاحظه نشد ($P > 0.05$) و مقادیر b صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین (به ترتیب ۱/۱۷ و ۱/۱۴ بود) بیانگر شکل فضایی مارپیچ تصادفی آنها است. با توجه به مشابهت مقدار b نمونه فاقد پروتئین می توان دریافت، احتمالاً تغییری در شکل فضایی ملکولی پلی ساکارید پس از تیمار دادن آن با آنزیم پروتئاز روی نداده است. این یافته با نتایج ناجی و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. آن ها بیان نمودند میزان شیب مدل قانون توان (b) برای صمغ دانه ریحان و نمونه فاقد پروتئین به ترتیب ۱/۱۹ و ۱/۱۸ بود یافته های آن ها بیانگر این بود که آنزیم پروتئاز اثر معنی داری



(a)



(b)

شکل ۲- ویسکوزیته ذاتی صمغ دانه بالنگو (a) و نمونه فاقد پروتئین آن (b) در آب دیونیزه با استفاده از معادلات هاگینز (■) و کرامر (■) در دمای ۲۵°C

خلاصه شده است. ملاحظه می شود در هر دو مدل دارای ضریب تبیین بالا (۰/۹۹۸ - ۰/۹۹۵) و خطای جذر میانگین مربعات^۱ (۰/۳۱۸ - ۱/۴۱۰) پایین بود.

۳-۳- خواص رئولوژیکی برشی پایا

۳-۳-۱- خواص رئولوژیکی مستقل از زمان

برای تعیین خصوصیات جریان، داده ها با مدل قانون توان و هرشل بالکی برازش شدند، که نتایج آنها در جدول ۳

جدول ۳- پارامترهای مدل توان و هرشل بالکی برای محلول‌های صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن (۱ درصد وزنی-وزنی) و در دمای ۲۰°C*

مدل	پارامترهای رئولوژیکی	صمغ دانه بالنگو	صمغ دانه بالنگو فاقد پروتئین
	k_p (Pa.s ⁿ)	۱۲/۶۴±۰/۸۱ ^a	۱۲/۹۴±۰/۴۱ ^a
قانون توان	n_p	۰/۳۹±۰/۰۲ ^a	۰/۳۸±۰/۰۶ ^a
	R^2	۰/۹۹۵	۰/۹۹۷
	RMSE	۱/۴۱۰	۰/۹۸۹
	τ_{0H} (Pa)	۲/۶۴±۰/۰۹ ^a	۲/۷۱±۰/۰۷ ^a
هرشل - بالکی	k_H (Pa.s ⁿ)	۹/۴۵±۰/۹۲ ^a	۹/۸۳±۰/۸۴ ^a
	n_H	۰/۳۵±۰/۰۴ ^a	۰/۳۲±۰/۰۸ ^a
	R^2	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸
	RMSE	۰/۳۵۰	۰/۳۱۸

*ارقام دارای حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند (آزمون دانکن، $P < ۰/۰۵$).

آن (۰/۹۹۸) بالاتر و RMSE آن (۰/۳۱۸-۰/۳۵۰) پایین‌تر بود جهت توصیف رفتار رئولوژیکی محلول‌های صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن مناسب‌تر تشخیص داده شد. براساس نتایج جدول ۳، هم ضریب قوام و هم تنش تسلیم صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن تفاوت آماری معنی‌داری نداشت ($P > ۰/۰۵$). این می‌تواند به این علت باشد تغییری در ویسکوزیته ذاتی پلی‌ساکارید پس از تیمار دادن آن با آنزیم پروتئاز روی نداده است ($P > ۰/۰۵$). طباطبایی آمید و میرحسینی (۲۰۱۲) گزارش کرده‌اند که کاهش میزان پروتئین صمغ، خصوصیات ویسکوزیته را بهبود می‌دهد و افزایش ویسکوزیته با تخلیص صمغ می‌تواند مربوط به کاهش میزان پروتئین باشد (۶۳). اما این موضوع در این تحقیق ملاحظه نشد. وجود تنش تسلیم در محلول‌های صمغ زمانی که به عنوان اتصال دهنده برای حفظ ترکیبات فرمولاسیون در کنار هم استفاده می‌شود بسیار حائز اهمیت است (۵۴). عمل تخلیص، ناخالصی‌های (مانند تانن‌ها، پیگمان‌های رنگی و پروتئین) موجود در ساختار شیمیایی صمغ خالص را کاهش می‌دهد و حلالیت صمغ را بهبود می‌بخشد (۶۳). وجود تنش تسلیم برای محلول‌های صمغ بالنگو ممکن است به دلیل تعداد زیاد باندهای هیدروژنی در ساختار آنها باشد که منجر به ایجاد

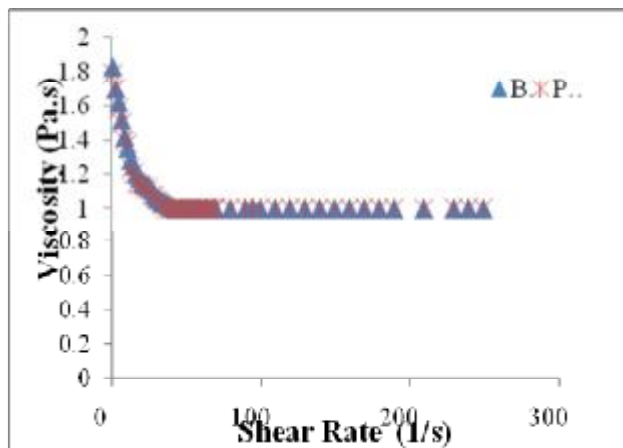
براساس مدل قانون توان شاخص رفتار جریان صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن به ترتیب ۰/۳۸ و ۰/۳۹ مشاهده شد که بیانگر رفتار تضعیف شونده با برش قوی این دو صمغ است (جدول ۳). با توجه به میزان شاخص رفتار جریان نمونه فاقد پروتئین می‌توان دریافت، احتمالاً تغییر معنی‌داری در وزن مولکولی پلی‌ساکارید پس از تیمار دادن آن با آنزیم پروتئاز روی نداده است ($P > ۰/۰۵$). وزن ملکولی بالا و درگیری‌ها و تجمعات پلیمری از طریق پیوندهای هیدروژنی یک دلیل رفتار تضعیف شونده با برش صمغ‌ها است. پلی‌ساکاریدها با زنجیره‌های سخت و اندازه هیدرودینامیکی بزرگ در ایجاد ویسکوزیته بالا و رفتار تضعیف شونده با برش نقش دارند (۶۴). کوئی (۲۰۰۵) بیان داشته است که با افزایش وزن ملکولی سودوپلاستیسیته پلی‌ساکارید افزایش می‌یابد (۱۷). ویسکوزیته بالای صمغ دانه بالنگو مربوط به در مسیر جریان قرار گرفتن پلیمرهای با وزن ملکولی بالا می‌باشد (۱۵). میزان ضریب قوام در صمغ دانه‌های ریحان، قدومه شیرازی، بالنگو و مرو به ترتیب $۱۳/۹۵$ Pa.sⁿ (۱ درصد، ۲۵°C)، $۰/۶۵$ Pa.sⁿ (۱ درصد، ۲۵°C)، $۲/۶۱$ Pa.sⁿ (۱/۵ درصد، ۲۵°C)، $۱/۴/۶۶$ Pa.sⁿ (۲۵°C) و $۸/۴۱$ Pa.sⁿ (۱ درصد، ۲۰°C) گزارش شده است (۴۹، ۳۳، ۵۸، ۵۵). با توجه به نتایج جدول ۳، مدل هرشل بالکی که در مقایسه با مدل توان ضریب تبیین

تیکسوتروپی آن ها است. رفتار تیکسوتروپی محلول های پلیمری به شکست اتصالات شبکه های پلیمری توسط تنش برشی مربوط می باشد که نتیجه آن کاهش ویسکوزیته با افزایش زمان است. این رفتار باعث ایجاد ویژگی های مطلوب متفاوتی در محصولاتی همچون چاشنی های مخصوص سالاد و مایونز می شود (۲۹).

شکل فضایی پایداری در آن ها گشته که در مقابل جریان مقاومت می کنند (۶۱).

۳-۲-۳- خواص رئولوژیکی وابسته به زمان

شکل ۳ رفتار رئولوژیکی وابسته به زمان صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن را نشان می دهد. ویسکوزیته ظاهری با افزایش زمان در تمام نمونه ها کاهش یافت که بیانگر رفتار



شکل ۳- ویسکوزیته محلول صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن به عنوان تابعی از زمان برش (درجه برش ثابت 50 s^{-1} و غلظت ۱ درصد (وزنی-وزنی) و دمای 20°C)

($P > 0.05$). نسبت ویسکوزیته ظاهری اولیه به ویسکوزیته ظاهری در حالت تعادل (η_0/η_∞) شاخص مقدار نسبی شکست ساختار یا وسعت تیکسوتروپی است (۵۷). در این پژوهش، میزان η_0/η_∞ ، در صمغ دانه بالنگو نسبت به نمونه فاقد پروتئین آن به طور معنی داری بیشتر بود ($P < 0.05$) که نشانگر افزایش توسعه تیکسوتروپی و شکل گیری بهتر ساختار محکم و منسجم در ساختار ژل با هیدرولیز پروتئین است. برخلاف نتیجه این تحقیق، ناجی و همکاران (۲۰۱۵)، گزارش کردند میزان η_0/η_∞ نمونه فاقد پروتئین صمغ دانه ریحان نسبت به صمغ دانه ریحان کاهش معنی داری داشت ($P < 0.05$) که این امر به دلیل کاهش میزان پروتئین در نمونه فاقد پروتئین آن می باشد (۴۸).

رفتار رئولوژیکی وابسته به زمان با مدل سنتیک ساختاری (SKM) درجه دوم برازش گردید که برای تمامی محلول های صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن، ضریب تبیین بالا ($0.997-0.974$) و RMSE (0.019) - ضریب پایین بدست آمد (جدول ۴). در مدل سینتیک ساختاری فرض می شود که تغییرات در خصوصیات جریان وابسته به زمان همراه با تخریب ساختار درونی سیال تحت برش است و اینکه ضریب ثابت تخریب (k) طی برش به فرآیند تبدیل سینتیک تبدیل حالت ساختاری^۱ به غیرساختاری^۲ بستگی دارد (۱۰). تفاوت آماری معنی داری بین مقادیر ثابت سرعت تخریب ساختار (k) محلول های صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن وجود نداشت

جدول ۴- پارامترهای مدل سینتیک ساختاری درجه دوم برای محلول های صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن (درجه برش

ثابت 50 1/s و غلظت ۱ درصد (وزنی-وزنی) و دمای 20°C *)

RMSE	R ²	K	η_0/η_∞	η_0 (Pa.s)	نمونه ها
۰/۰۰۳	۰/۹۹۷	۰/۳۵±۰/۰۹ ^a	۳/۵۲±۰/۰۷ ^a	۱/۸۶±۰/۰۴ ^a	صمغ دانه بالنگو
۰/۰۱۹	۰/۹۷۴	۰/۳۲±۰/۰۵ ^a	۱/۸۱±۰/۰۳ ^b	۱/۳۱±۰/۰۶ ^b	صمغ دانه بالنگو فاقد پروتئین

*ارقام دارای حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند (آزمون دانکن، $P < 0.05$).

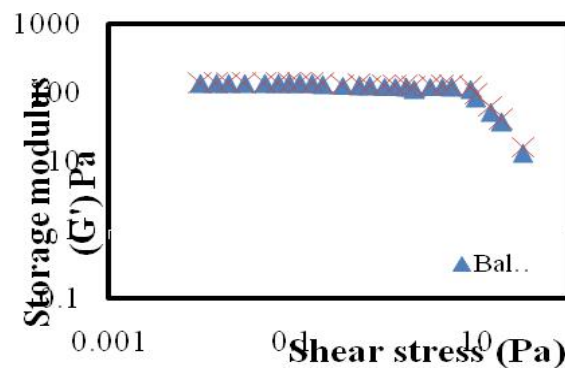
۳-۴- خواص رئولوژیکی دینامیکی

۳-۴-۱- تعیین ناحیه خطی ویسکوالاستیک (آزمون

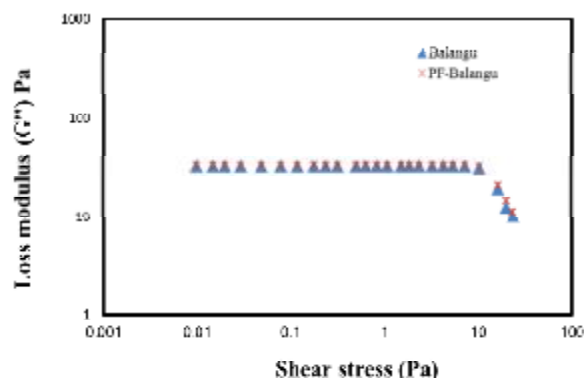
روبش تنش)

نمودارهای روبش تنش (شکل های ۴ و ۵) ترسیم شد و از

نمودارهای حاصل، پارامترهای مدول ذخیره، مدول افت برشی، مقدار تازنانت افت، تنش تسلیم، تنش نقطه جریان و مدول متناظر به دست آمده توسط آزمون نوسانی برآورد گردید (جدول ۵).



شکل ۴- تغییرات مدول الاستیک (G') در آزمون روبش تنش (CSS) صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن در غلظت ۱ درصد (وزنی-وزنی)، دمای 20°C و فرکانس ۱ Hz



شکل ۵- تغییرات مدول ویسکوز (G'') در آزمون روبش تنش (CSS) صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن در غلظت ۱ درصد (وزنی-وزنی)، دمای 20°C و فرکانس ۱ Hz

ناحیه ویسکوالاستیک خطی می تواند معیاری از قدرت ژل باشد. در آزمون روبش تنش یا کرنش، ژل های قوی تر نسبت به ژل های ضعیف، محدوده خطی (LVE) وسیع تری دارند و به بیان بهتر بیشتر در ناحیه خطی باقی می مانند (۶۲). در این پژوهش، ناحیه خطی برای صمغ بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن جهت انجام آزمون فرکانس متغیر ۰/۱ Pa انتخاب گردید.

جدول ۵- پارامترهای مربوط به ناحیه خطی ویسکوالاستیک دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن در غلظت ۱ درصد (وزنی-وزنی)، (مدول ذخیره (G'_{LVE})؛ مدول اتلاف (G''_{LVE})؛ مقدار تانژانت اتلاف ($Tan\delta_{LVE}$)؛ تنش تسلیم در حد ناحیه خطی ویسکوالاستیک (τ_f)؛ تنش نقطه جریان (τ_f) و تنش تسلیم در نقطه تقاطع (G_f ; $G' = G''$) دمای $20^\circ C$ و فرکانس ۱ Hz).

نمونه ها	G'_{LVE} (Pa)	G''_{LVE} (Pa)	$Tan\delta_{LVE}$	τ_f (Pa)	G_f (Pa)
صمغ دانه بالنگو	$123/11 \pm 2/11^a$	$40/12 \pm 1/25^a$	$0/32 \pm 0/04^a$	$2/14 \pm 0/15^a$	$47/19 \pm 0/41^b$
صمغ دانه بالنگو فاقد پروتئین	$115/32 \pm 2/71^a$	$38/41 \pm 1/34^a$	$0/33 \pm 0/02^a$	$2/54 \pm 0/35^a$	$51/36 \pm 0/28^a$

*حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی دار بین نمونه ها می باشد (آزمون دانکن، $P < 0/05$).

اینکه تغییری در ساختار ژل پلی ساکارید پس از تیمار دادن آن با آنزیم پروتئاز روی نداده است ($P > 0/05$). نتایج به دست آمده این تحقیق با نتایج تحقیقات ناجی و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت داشت آن ها گزارش کردند مقدار مدول ذخیره بالاتر از مدول افت برشی برای صمغ دانه ریحان و نمونه فاقد پروتئین بود (۴۹). تانژانت اتلاف ($\tan\delta$) بیانگر نسبت انرژی از دست داده به انرژی ذخیره شده در هر چرخه است. زمانی $\tan\delta < 1$ ، رفتار الاستیک غالب است در حالی که مقادیر $\tan\delta > 1$ نشان دهنده رفتار ویسکوز می باشد. مقادیر $\tan\delta$ بزرگتر از ۰/۱ به این معنی است که نمونه ها ژل واقعی نیستند. این نمونه ها یک ساختار بین یک بیوپلیمر با غلظت بالا و ژل واقعی دارد (۳۸). همان طور که در جدول ۵ قابل ملاحظه است، مقدار تانژانت افت در حد نهایی LVE برای محلول صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین کمتر از ۱ ولی بزرگتر از ۰/۱ بود که بیانگر وجود ساختار الاستیک در ژل ضعیف بیوپلیمری است. نتایج تنش تسلیم دینامیک نمونه ها که توسط آزمون روبش تنش تعیین گردید در جدول ۵ گزارش شده است. مقدار نقطه تسلیم بستگی به تکنیک های رئولوژیکی و مفروضات مورد

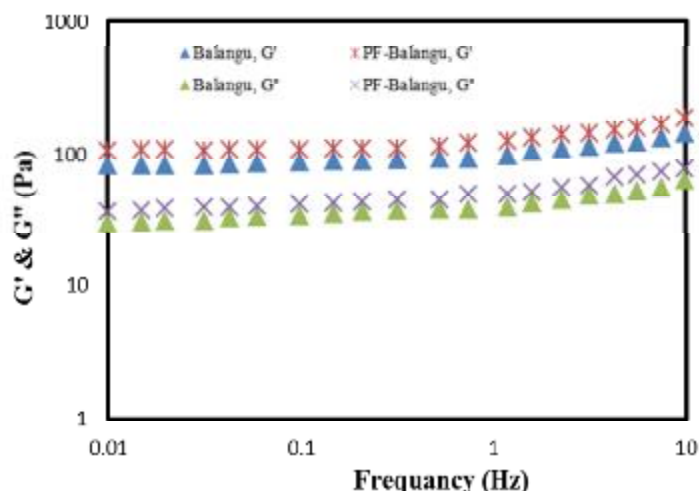
ژل های هیدروکلوئیدی وجود دارند که بسیار نزدیک به حالت جامد یا مایع می باشند. رفتار جامد مانند آن ها به دلیل شبکه تشکیل شده می باشد و از روی مقادیر مدول الاستیک آن ها قابل تشخیص هست (۵۱). تمامی هیدروکلوئیدها قادر به افزایش ویسکوزیته محلول های آبی هستند اما برخی از آن ها توانایی تشکیل ژل را دارند. تشکیل ژل پدیده ای است که مستلزم به هم پیوستگی یا ایجاد اتصالات عرضی میان زنجیرهای پلیمرها است تا یک شبکه بهم پیوسته سه بعدی شکل گیرد. این شبکه یک ساختار مستحکم تشکیل می دهد که نسبت به جریان یافتن تحت تاثیر تنش مقاوم است و آب را در داخل خود به دام انداخته یا تثبیت می کند. هیدروکلوئیدهایی که توانایی تشکیل چنین ساختاری را دارند محدود بوده و ساختار و بافت ژل های تشکیل شده نیز به طور گسترده ای متفاوت است (۲۲). در ناحیه خطی نمودار مدول ذخیره بالاتر از مدول افت برشی قرار داشت که نشانگر رفتار شبه ژل یا شبه جامد صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن است. هیدرولیز و کاهش مقدار پروتئین تاثیر معنی داری در رفتار ویسکوالاستیک نمونه فاقد پروتئین ایجاد نکرد (جدول ۵ و شکل های ۴ و ۵). احتمالاً به دلیل

شامل وزن مولکولی بالا، وزن مولکولی پایین و نمونه فاقد پروتئین مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند مقدار مقاومت ژل در نقطه تنش تسلیم از بیشتر به کمتر نمونه وزن مولکولی بالا، نمونه فاقد پروتئین، صمغ دانه ریحان و نمونه وزن مولکولی پایین بود (۴۹).

۳-۴-۲-آزمون روبش فرکانس

آزمون روبش فرکانس صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن در تنش ثابت 0.1 Pa انجام شد و نتایج آزمون در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده است و داده‌های حاصل از این آزمون در جدول ۶ خلاصه شده‌اند. براساس نتایج آزمون روبش فرکانس (شکل ۶ و ۷ و جدول ۶) مقادیر مدول ذخیره در تمام طیف فرکانس اعمال شده بیشتر از مدول افت برشی بود و منحنی‌های G' و G'' کاملاً موازی و تا حدی وابسته به فرکانس بودند و نقطه تقاطعی وجود نداشت که توسط ناجی و همکاران (۲۰۱۵)، حسینی پرور (۲۰۰۹) و رافع و رضوی (۲۰۱۳) نیز رفتار مشابهی گزارش شده است (۲۷، ۴۸، ۵۹). کلارک و راس - مورفی (۱۹۸۷) برای این گونه سیالات عبارت ژل ضعیف یا مایعات ساختاری^۱ را استفاده می‌کنند که بیانگر وجود شبکه به هم‌تنیده در ساختار آنها است که حتی در فرکانس‌های بالا پایدار است (۱۴). نتایج به دست آمده در آزمون روبش فرکانس با نتایج تحقیقات رزمخواه و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت داشت آنها گزارش کردند مقدار مدول ذخیره نمونه فاقد پروتئین صمغ دانه شاهی بیشتر از صمغ دانه شاهی بود. همچنین بیان نمودند که با حذف مواد پروتئینی و سایر ناخالصی‌ها، زنجیره‌های پلی‌ساکارید به یکدیگر متصل می‌گردد و باعث ایجاد ساختار شبکه الاستیک قوی می‌شود که این امر می‌تواند مقاومت بالا در برابر تغییر شکل‌های مکانیکی را داشته باشند (۵۹).

استفاده در اندازه‌گیری دارد (۱۵، ۶۲). با افزایش مقدار تنش، پیوندهای تشکیل دهنده شبکه در مقدار بحرانی تنش، شکسته شده و منجر به افت G' و G'' می‌شود. حد انتهایی ناحیه LVE در آزمون روبش تنش، به عنوان تنش تسلیم یا نقطه تنش (τ_y) شناخته می‌شود. تا زمانی که مقدار تنش کمتر از نقطه تسلیم اعمال شود هیچ تغییر قابل توجهی در ساختار داخلی اتفاق نمی‌افتد (۴۵). براساس مقادیر τ_y محلول صمغ بالنگو و نمونه فاقد پروتئین تفاوت آماری معنی‌دار نداشت ($P > 0.05$) (جدول ۵). مقدار G' نمایش دهنده جزء الاستیک نمونه بوده و اندازه انرژی اعمالی ذخیره شده در نمونه در طول اعمال برش است. از طرف دیگر، G'' نشان دهنده جزء ویسکوز نمونه شناخته می‌شود و اندازه انرژی مورد استفاده در طول اعمال برش می‌باشد و همچنین به عنوان میزان انرژی از دست رفته از نمونه است (۴۶). با افزایش تنش، منحنی مدول‌های الاستیک و ویسکوز یکدیگر را قطع کردند، که این نقطه تلاقی نیز شاخص مناسبی برای تعیین نقطه تسلیم می‌باشد (مدول متناظر ($G_F: G' = G''$) (۳۴). مقادیر G_F و بنابراین مقاومت ژل در نقطه تنش تسلیم نمونه فاقد پروتئین نسبت به صمغ دانه بالنگو به‌طور معنی‌داری بیشتر بود (جدول ۵). این موضوع نشان‌دهنده تشکیل ژل قوی بوده که می‌تواند ناشی از حذف ناخالصی‌ها و پروتئین‌ها باشد (۵۹). ویژگی‌های ساختاری از فاکتورهای مهمی هستند که می‌تواند بر رفتار رئولوژیکی محلول صمغ تاثیر بگذارد (۶۷). بنابراین، پارامترهای مختلف ویسکوالاستیک صمغ‌ها می‌تواند به ترکیبات مختلف شیمیایی آنها (ساختار مونوساکارید، خاکستر، رطوبت، کربن، نیتروژن و اسید اورنیک) مرتبط باشند (۵۹). ناجی و همکاران (۲۰۱۶)، خصوصیات ویسکوالاستیک صمغ دانه ریحان و اجزای حاصل از آن



شکل ۶- نمودار مدول ذخیره (G') و مدول اتلاف (G'') در برابر فرکانس صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن در غلظت ۱ درصد (وزنی-وزنی)، دمای 20°C و تنش 0.1 Pa

جدول ۶- مدول ذخیره (G')، مدول اتلاف (G'') و ویسکوزیته کمپلکس (η^*) صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن (دمای 20°C و تنش 0.1 Pa ؛ فرکانس 1 Hz)

نمونه‌ها	G' (Pa)	G'' (Pa)	η^* (Pa)	$\text{Tan } \delta$	شیب η^*
صمغ دانه بالنگو	$139/25 \pm 2/54^b$	$37/39 \pm 1/25^b$	$28/72 \pm 1/33^a$	0.27 ± 0.03^a	-0.90 ± 0.03^a
صمغ دانه بالنگو فاقد پروتئین	$164/47 \pm 4/25^a$	$41/02 \pm 0/82^a$	$31/17 \pm 1/89^a$	0.25 ± 0.03^a	-0.92 ± 0.12^a

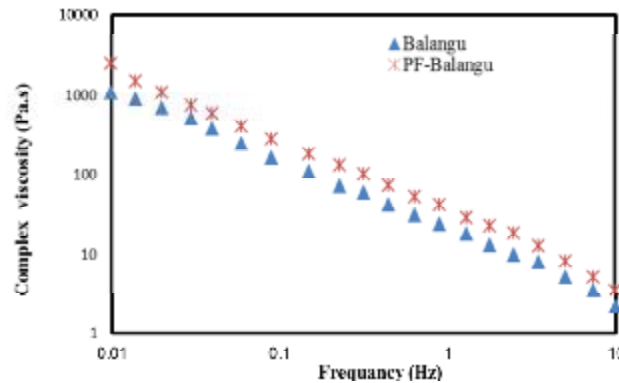
*حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین نمونه‌ها می‌باشد (آزمون دانکن، $P < 0.05$).

($P < 0.05$) که بهبود خصوصیات الاستیک را در عدم حضور آلودگی‌های پروتئینی نشان می‌دهد. مقدار مدول افت برشی صمغ دانه بالنگو بطور معنی‌داری کمتر از نمونه فاقد پروتئین آن بود ($P < 0.05$). یوسف و همکاران (۲۰۰۹)، گزارش کردند صمغ دانه شنبلله و نمونه فاقد پروتئین آن حاوی پروتئین و ترکیبات منوساکارید متفاوتی بودند که منجر به ایجاد اختلاف معنی‌داری در مقادیر مدول ذخیره و الاستیک و ویسکوزیته کمپلکس شد (۶۸). براساس نتایج جدول ۶، هیچ تفاوت آماری معنی‌داری بین تانژانت اتلاف در فرکانس (1 Hz) ملاحظه نشد ($P > 0.05$) و مقدار تانژانت اتلاف صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن در فرکانس (1 Hz) کمتر از یک بود که وجود یک ساختار ژل ضعیف پلیمری را در محلول‌ها نشان می‌دهد.

آزمون روبش فرکانس می‌تواند سه نوع سیستم را شناسایی کند: محلول‌های رقیق، محلول‌های غلیظ و ژل‌ها. برای ژل‌ها، در محدوده فرکانس اعمال شده G' همواره بیشتر از G'' است. در محلول‌های رقیق در محدوده فرکانس مورد مطالعه G'' بزرگتر از G' است و مدول‌ها در فرکانس‌های بالاتر به هم نزدیک می‌شوند. اما در محلول‌های پلی‌ساکاریدی غلیظ، در فرکانس‌های پایین مقدار مدول G' کمتر از G'' است و در میانه محدوده فرکانس اعمالی یکدیگر را قطع می‌کنند (۳۵). براساس آزمون روبش فرکانس، صمغ دانه بالنگو دارای برهم‌کنش‌های ملکولی و بهم پیوستگی زنجیره‌های ملکولی بیشتر بود که این باعث تقویت رفتار ویسکوالاستیک محلول آن‌ها شده است. با کاهش مقدار پروتئین صمغ دانه بالنگو، مدول ذخیره نمونه فاقد پروتئین نسبت به صمغ بالنگو افزایش معنی‌داری داشت

۰/۰۱ تا ۱۰ هرتز رابطه خطی نشان داد (شکل ۷). شیب منحنی ویسکوزیته کمپلکس صمغ بالنگو تفاوت معنی داری با نمونه فاقد پروتئین آن نداشت ($P > 0.05$). مقادیر ویسکوزیته کمپلکس صمغ بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن با افزایش فرکانس، کاهش پیدا می کند که نشان دهنده رفتار غیر نیوتنی و روان شوندگی با برش می باشد. مقادیر شیب منحنی ویسکوزیته کمپلکس در این تحقیق نشان دهنده تشکیل ژل قوی می باشد. نتایج به دست آمده این تحقیق با نتایج تحقیقات رافع و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت داشت آن ها مقدار متوسط این شیب برای غلظت های ۱، ۲ و ۳ درصد صمغ دانه ریحان، ۰/۸۴ گزارش نمودند (۵۳). موریس (۱۹۹۰)، پیشنهاد کرد که ویسکوزیته کمپلکس با شیب نزدیک به ۰/۷۶ بیانگر یک "ژل ضعیف" پلی ساکارید است که از درهم تنیده شدن و تداخل زنجیره های مارپیچ تصادفی پلی ساکاریدها حاصل شده است (۴۴).

مقادیر تانژانت اتلاف بر حسب نوع سیستم پلیمری تغییر می کند. برای محلول های رقیق مقادیر تانژانت اتلاف بسیار بالا، برای پلیمرهای آمورف در محدوده ۰/۲ تا ۰/۳ و برای پلیمرهای شیشه ای کریستالی و ژل ها در حدود ۰/۰۱ است (۶۲). موریس (۱۹۹۱) و رویسنون و همکاران (۱۹۹۱)، برای صمغ زانتان یک ساختار ژل ضعیف گزارش کرده اند (۴۴، ۶۰). مقادیر ویسکوزیته کمپلکس محلول های صمغ بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن تفاوت آماری معنی داری نداشت ($P > 0.05$). احتمالاً این شباهت به دلیل عدم تاثیر هیدرولیز آنزیمی بر ساختار ژل پلی ساکارید می باشد ($P > 0.05$). هیچ گونه رفتاری که حاکی از رسیدن ویسکوزیته کمپلکس به مقدار ثابت نیوتنی در محدوده دامنه فرکانس اعمال شده باشد، وجود نداشت. پارامتر دیگری که بیان کننده قدرت ژل است شیب منحنی ویسکوزیته کمپلکس در برابر فرکانس $\eta^* - f$ است (۴۸). لگاریتم ویسکوزیته کمپلکس با لگاریتم فرکانس در دامنه



شکل ۷- ویسکوزیته کمپلکس (η^*) در برابر فرکانس صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن در غلظت ۱ درصد (وزنی-وزنی)، دمای ۲۰°C و فرکانس ۱ Hz

قانون توان در مدول ذخیره (b) صمغ دانه ریحان در غلظت ۱ درصد (وزنی-وزنی) توسط رافع و همکاران (۲۰۱۳)، ۰/۳۶ گزارش شده است که این تفاوت می تواند مربوط به عمل تخلیص پلی ساکارید با اتانول در تحقیق مذکور باشد (۵۹). ناجی و همکاران (۲۰۱۶)، گزارش کردند با تخلیص صمغ دانه ریحان با آنزیم پروتئاز میزان پارامتر b کاهش یافت (۴۹) که نتیجه مغایر با نتیجه بدست آمده در این تحقیق بود.

با توجه به مقادیر ضریب تبیین (۰/۹۸۶-۰/۹۹۴) و RMSE (۵/۹۴-۲/۱۲)، مدل قانون توان برای بیان رابطه بین مدول ذخیره و اتلاف با فرکانس مناسب است. همان گونه در جدول ۷ ملاحظه می شود، مقدار b صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن به ترتیب برابر با ۰/۰۹۷ و ۰/۰۹۴ بود. همچنین مقدار d صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن به ترتیب برابر ۰/۱۷ و ۰/۱۴ بود که تفاوت آماری معنی داری ملاحظه نشد ($P > 0.05$). مقدار شاخص های

جدول ۷- پارامترهای مدل توان برای مدول ذخیره، مدول اتلاف صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن (دمای ۲۰°C و تنش

(۰/۱ Pa)

G'' = c ω ^d			G' = a ω ^b			نمونه‌ها
RMSE	R ²	d	RMSE	R ²	b	
۲/۱۲	۰/۹۹۴	۰/۱۷±۰/۰۵ ^a	۵/۳۱	۰/۹۵۵	۰/۰۹۷±۰/۰۱ ^a	صمغ دانه بالنگو
۲/۷۲	۰/۹۸۶	۰/۱۴±۰/۰۸ ^a	۵/۹۴	۰/۹۳۴	۰/۰۹۴±۰/۰۳ ^a	صمغ دانه بالنگو فاقد پروتئین

*حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین نمونه‌ها می‌باشد (آزمون دانکن، P<۰/۰۵).

۴- نتیجه‌گیری

۳. بقالیان، ک. ۱۳۷۸. اثر رطوبت خاک و هوا بر کمیت و کیفیت موسیلاژ اسفرزه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته علوم باغبانی، دانشگاه تهران.

۴. جهان‌بین، ک. ۱۳۹۰. استخراج، شناسایی و تعیین ساختار پلی‌ساکاریدهای محلول در آب حاصل از ریشه گیاه چوبک تماشایی. رساله دکتری صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

۵. فرحناکی، ع.، عسگری، ح.، بختیاری، م. ۱۳۹۰. بررسی برخی خواص رئولوژیکی هیدروکلوئید دانه گیاه شاهی (*Lepidium sativum* L). مجله مهندسی بیوسیستم ایران، جلد ۴۲، شماره ۱، ۱۲۰-۱۱۳.

۶. فاطمی، ح. ۱۳۷۸. شیمی مواد غذایی، انتشارات دفتر نشر.

۷. کاراژیان، ح.، رضوی، س. م. ع.، فرهوش، ر. ۱۳۸۸. بهینه‌سازی شرایط استخراج صمغ از دانه شاهی و بررسی خواص عملکردی آن. پایان‌نامه دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد.

۸. ماهرانی، ب.، برزگر، م.، سحری، م. ع.، دهقانی، ح. ۱۳۸۳. بهینه‌سازی شرایط استخراج صمغ دانه بزرک ایرانی به روش سطح پاسخ، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۸، شماره ۴، ۱۴۵-۱۵۵.

۹. میرحیدر، ح. ۱۳۷۳. معارف گیاهی (کاربرد گیاهان در پیشگیری و درمان بیماری‌ها). جلد سوم. چاپ اول دفتر نشر فرهنگ اسلامی.

10. Abu-Jdayil, B. 2003. Modelling the time-dependent rheological behavior of semisolid foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 57: 97-102.

11. AOAC. 2005. Official methods of analysis of AOAC International. AOAC International.

در این پژوهش، خصوصیات رئولوژیکی نمونه فاقد پروتئین صمغ دانه بالنگو مورد بررسی قرار گرفت. مدل هرشل بالکی جهت توصیف رفتار رئولوژیکی محلول‌های صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن انتخاب شد. نتایج نشان داد، صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن دارای شکل فضایی مارپیچ تصادفی در ناحیه رقیق بودند و زنجیره‌های صمغ دانه بالنگو دارای بیشترین انعطاف‌پذیری می‌باشد. صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین آن در غلظت ۱ درصد (وزنی-وزنی) رفتار شبه جامد و تضعیف شونده با برش از خود نشان دادند. نتایج آزمون خصوصیات رئولوژیکی دینامیکی در ناحیه خطی نمودار مدول ذخیره بالاتر از مدول اتلاف قرار داشت که نشانگر رفتار شبه ژل یا شبه جامد در صمغ دانه بالنگو و نمونه فاقد پروتئین تشکیل‌دهنده آن است. هیدرولیز و کاهش مقدار پروتئین تاثیر معنی‌داری در رفتار ویسکوالاستیک نمونه فاقد پروتئین ایجاد نکرد.

۵-منابع

۱. امیری عقدایی س. س.، اعلمی، م.، خمیری، م.، رضایی، ر. ۱۳۸۹. تاثیر استفاده از موسیلاژ دانه ریحان بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، حسی و رئولوژیکی ماستی کم چرب، مجله الکترونیکی فناوری و نگهداری مواد غذایی، جلد ۲، شماره ۴، ۱-۱۷.

۲. امین، غ. ۱۳۸۴. متداول‌ترین گیاهان دارویی سنتی ایران. انتشارات علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران، تهران، ص ۶۶.

- heating/cooling rate. *Food Hydrocolloids*, 35: 583-589.
25. Heldman, D. R., Lund, D. B. and Sabliov, C. 2006. Handbook of food engineering. CRC press.
 26. Higiro, J., Herald, T., Alavi, S. and Bean, S. 2007. Rheological study of xanthan and locust bean gum interaction in dilute solution: Effect of salt. *Food research international*, 40: 435-447.
 27. Hosseini-Parvar, S. 2009. Basil seed gum (BSG): Physico-chemical, rheological and emulsifying characterization and its synergistic interactions in combination with locust bean gum and guar gum. In Department of Food Science and Technology. Ferdowsi University of Mashhad: Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
 28. Huggins, M.L. 1942. The viscosity of dilute solutions of long-chain molecules. IV. dependence on concentration. *Journal of the American Chemical Society*, 64 (11): 2716-2718.
 29. Imeson, A. 2011. Food stabilisers, thickeners and gelling agents. John Wiley & Sons.
 30. Karazhiyan, H., Razavi, S., Phillips, G. O., Fang, Y., Al-Assaf, S. and Nishinari, K. 2011. Physicochemical aspects of hydrocolloid extract from the seeds of *Lepidium sativum*. *International Journal of Food Science and Technology*, 46: 1066-1072.
 31. Kraemer, E.O. 1938. Molecular weights of celluloses and cellulose derivatives. *Industrial and Engineering Chemistry*, 30 (10): 1200-1203.
 32. Koocheki, A., Taherian, A. R. and Bostan, A. 2013. Studies on the steady shear flow behavior and functional properties of *Lepidium perfoliatum* seed gum. *Food Research International*, 50: 446-456
 33. Koocheki, A., Taherian, A. R., Razavi, S. M. A., Bostan, A. 2009. Response surface methodology for optimization of extraction yield, viscosity, hue and emulsion stability of mucilage extracted from *Lepidium perfoliatum* seeds. *Food Hydrocolloids* 23: 2369-2379.
 12. Brummer, Y. and Cui, S. W. 2005. Food Carbohydrates: Chemistry, Physical Properties and Application. CRC Press, Boca Raton, FL, 67-104.
 13. Behrouzian, F., Razavi, S. and Karazhiyan, H. 2014. Intrinsic viscosity of cress (*Lepidium sativum*) seed gum: Effect of salts and sugars. *Food Hydrocolloids*, 35: 100-105.
 14. Clark, A. H. and Ross-Murphy, S. B. 1987. Structural and mechanical properties of biopolymer gels. In *Biopolymers*, 57-192. Springer.
 15. Christianson, D. and Bagley, E. 1984. Yield stresses in dispersions of swollen, deformable cornstarch granules. *Cereal Chemistry*, 61: 500-503.
 16. Coia, K. and Stauffer, K. 1987 Shelf life study of oil/water emulsions using various commercial hydrocolloids. *Journal of Food Science*, 52: 166-172.
 17. Cui, S. W. 2005. Food carbohydrates: chemistry, physical properties, and applications. CRC Press.
 18. Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical chemistry*, 28: 350-356.
 19. Farhadi, F. 2017. Structural elucidation of a water-soluble polysaccharide isolated from Balangu shirazi (*Lallemantia royleana*) seeds. *Food Hydrocolloids*, 72: 263-270.
 20. Francuskiwicz, F. 1994. Polymer fractionation. Springer.
 21. Graessley, W. W. 1974. The entanglement concept in polymer rheology. Springer.
 22. Glicksman, M. 1982. Food hydrocolloids. Crc Press Boca Raton, FL.
 23. Hesarinejad, M. A., Razavi, S. M. and Koocheki, A. 2015. *Alyssum homolocarpum* seed gum: Dilute solution and some physicochemical properties. *International journal of biological macromolecules*, 81: 418-426.
 24. Hesarinejad, M. A., Koocheki, A., and Razavi, S. M. A. 2014. Dynamic rheological properties of *Lepidium perfoliatum* seed gum: effect of concentration, temperature and

44. Morris, E.R. 1991. International Food ingredients. 1: 32-7.
45. Mezger, T. G. 2006. The Rheology Handbook: For users of rotational and oscillatory rheometers. Vincentz Network.
46. Mezger, T. G. 2002. In U. Zorll (Ed.), the rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers. Germany: Hannover.
47. Naghibi, F., Mosaddegh, M., Mohammadi Motamed, S. and Gorbani, A. 2005. Labiatae family in folk medicine in Iran: from ethnobotany to pharmacology. *Iranian Pharmaceutical Research*, 2: 63-79.
48. Naji-Tabasi, S. and Razavi, S.M.A. 2015. New studies on basil (*Ocimum bacilicum* L.) seed gum: Part III - Steady and dynamic shear rheology. *Food Hydrocolloids*. 1-8.
49. Naji-Tabasi, S., Razavi, S. M. A., Mohebbi, M. and Malaekheh-Nikouei, B. 2016. New studies on basil (*Ocimum bacilicum* L.) seed gum: part I-Fractionation: physicochemical and surface activity characterization. *Food Hydrocolloids*, 52: 350–358.
50. Norton, I. T., Spyropoulos, F. and Cox, P. 2010. Practical food rheology: an interpretive approach. John Wiley & Sons.
51. Nishinari, K. 2003. Physical chemistry and industrial application of gellan gum. Springer.
52. Pamies, R., Hernandez Cifre, J.G., del Carmen Lopez Martinez, M. and de la Torre, J.G. 2008. Determination of intrinsic viscosities of macromolecules and nanoparticles. Comparison of single-point and dilution procedures. *Colloid and polymer science*, 286: 1223–1231.
53. Rafe, A., Razavi, S. and Farhoosh, R. 2013. Rheology and microstructure of basil seed gum and β -lactoglobulin mixed gels. *Food Hydrocolloids*, 30: 134-142.
54. Rao, M. and Kenny, J. 1975. Flow properties of selected food gums. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 8: 142-148.
55. Razavi, S.M.A., Bostan, A., Niknia, S. and Razmkhah, S. 2011. Functional properties of hydrocolloid extracted
34. Knudsen, J. C., Karlsson, A. O., Ipsen, R. and Skibsted, L. H. 2006. Rheology of stirred acidified skim milk gels with different particle interactions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 274: 56-61.
35. Kutz, M. 2013. Handbook of farm, dairy and food machinery engineering. Academic Press.
36. Lai, L., Tung, J. and Lin, P. 2000. Solution properties of hsian-tsoa (*Mesona procumbens Hems!*) leaf gum. *Food Hydrocolloids*, 14: 287-294.
37. Lapasin, R. and Pricl, S. 1995. Rheology of polysaccharide systems. Springer.
38. Mandala, I., Savvas, T. and Kostaropoulos, A. 2004. Xanthan and locust bean gum influence on the rheology and structure of a white model-sauce. *Journal of Food Engineering*, 64: 335-342.
39. Mohammad Amini, A. and 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: 235– 243.
40. Mohammad Amini, A. 2007. Extraction optimization of Balangu seed gum and effect of Balangu seed gum on the rheological and sensory properties of Iranian flat bread, MSc. thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
41. Mohammad-Amini, A., Razavi, S. M. A. and Zahedi, Y. 2015. The influence of different plasticisers and fatty acids on functional properties of basil seed gum edible film. *International Journal of Food Science and Technology*. 50 (5): 1137-1143.
42. Morris, E.R. 1990. Shear-thinning of 'random coil' polysaccharides: Characterisation by two parameters from a simple linear plot. *Carbohydrate Polymers*, 13: 85-96.
43. Morris, E. R., Cutler, A., Ross-Murphy, S., Rees, D. and Price, J. 1981. Concentration and shear rate dependence of viscosity in random coil polysaccharide solutions. *Carbohydrate polymers*, 1: 5-21.

64. Vardhanabhuti, B. and Ikeda, S. 2006. Isolation and characterization of hydrocolloids from monoi (*Cissampelos pareira*) leaves. *Food hydrocolloids*, 20: 885-891.
65. Wang, Q. and Cui, S. W. 2005. Understanding the conformation of polysaccharides. *Food Carbohydrates: Chemistry, Physical Properties, and Applications*, 219.
66. Williams, P. A. and Phillips, G. O. 2000. Gum Arabic in Handbook of Hydrocolloids (G.O. Phillips and P.A. Williams, eds.) Woodhead Publishing Ltd, Cambridge.
67. Xiu, A., Zhou, M., Zhu, B., Wang, S. and Zhang, J. 2011. Rheological properties of Salecan as a new source of thickening agent. *Food Hydrocolloids*, 25: 1719-1725.
68. Youssef, M. K., Wang, Q., Cui, S. W., and Barbut, S. 2009. Purification and partial physicochemical characteristics of protein free fenugreek gums. *Food Hydrocolloids*, 23: 2049-2053.
- from selected domestic Iranian seeds (in Persian). *Journal of Food Science Research*, 21 (3): 380-389.
56. Razavi, S. M. A., Mohammadi Moghaddam, T., Emadzadeh, B. and Salehi F. 2012. Dilute solution properties of wild sage (*Salvia macrosiphon*) seed gum. *Food Hydrocolloids*, 29: 205-210.
57. Razavi, M. and Karazhiyan, H. 2009. Flow properties and thixotropy of selected hydrocolloids: experimental and modelling studies. *Food hydrocolloids*, 23: 908-912.
58. Razavi, S. M., Moghaddam, T. M. and Emadzadeh, B. 2010. Rheological interactions of Balangu (*Lallemantia royleana*) seed extract with selected food hydrocolloids. *Electronic J. Environ. Agric and Food Chem*, 9: 1540-1550.
59. Razmkhah, S., Razavi, S.M.A., Mohammadifar, M.A., Tutor Alec, M., Ahmadi Gavlighi, H. 2016. Protein-free cress seed (*Lepidium sativum*) gum: Physicochemical characterization and rheological properties. *Carbohydrate Polymers*, 153: 14-24.
60. Robinson, G., Manning, C.E. and Morris, E.R. 1991. In Food Polymers, Gels and Colloids, ed. E. Dickinson. Special Publication No. 82, Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, pp. 22-33.
61. Song, K.-W., Kim, Y.-S. and Chang, G.-S. 2006. Rheology of concentrated xanthan gum solutions: Steady shear flow behavior. *Fibers and Polymers*, 7: 129-138.
62. Steffe, J. F. 1996. Rheological methods in food process engineering. Freeman press.
63. Tabatabaee Amid, B. and Mirhosseini, H. 2012a. Effect of different purification techniques on the characteristics of hetero polysaccharide-protein biopolymer from durian (*Durio zibethinus*) seed. *Molecules*, 17: 10875-10892.

(Original Research Paper)

Study on the Effect of Enzymatic Purification on Rheological Properties of Balangu Seed (*Lallemantia royleana*) Gum

Maryam Sardarodiyani¹, Akram Arianfar^{1*}, Ali Mohammadi Sani¹, Sara Naji-Tabasi²

1-Young Researchers and Elite Club, Quchan Branch, Islamic Azad University, Quchan, Iran.

2-Department of Food Nanotechnology, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST), Mashhad, Iran.

Received:30/12/2018

Accepted:05/05/2019

Abstract

Food gums are a class of food additives playing various roles, such as thickening, gelling and stabilizing of the food aqueous solutions. The aim of this study was to investigation rheological properties of protein-free Balangu seed gum. For this purpose, balangu seed gum was prepared and after its enzymatic hydrolysis, protein-free Balangu was prepared and the rheological properties of balangu seed gum and protein-free balangu seed gum were evaluated in terms of different parameters such as intrinsic viscosity, steady shear flow properties (shear dependence and time dependence tests) and dynamic rheology properties (stress sweep and frequency sweep tests). The results showed that balangu and protein-free balangu seed gums at 1% w/w had shear-thinning and weak gel-like behavior, and indicated the random coil conformation in dilute region. Considering correlation coefficient (0.998), the Herschel–Bulkley model was selected to describe the rheological behavior of Balangu and protein-free balangu seed gum solutions. In the time-dependent test, the balangu and protein-free balangu seed gums showed same ability to create the structure and the amount of thixotropy. The results of dynamic rheological test showed the storage modulus curve was located higher than the loss modulus in the linear region, indicating semi-gel or semi-solid behavior in Balangu and protein-free balangu seed gum. Hydrolysis and decreasing protein content did not significantly affect viscoelastic behavior of balangu seed gum.

Keywords: Balangu Seed Gum, Proteinase Enzyme, Rheological Characteristics, Viscoelastic

*Corresponding Author: a_aria_1443@yahoo.com