

بررسی خصوصیات رئولوژیکی غلظت‌های متفاوت ژل نانوفیبر تهیه‌شده از تفاله گوجه‌فرنگی

علی معتمدزادگان^{۱*}، هدا فهیم^۲، راضیه رضوی^۲، حسین یوسفی^۳

۱- دانشیار، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
* نویسنده مسئول (amotgan@sanru.ac.ir)

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری ایران

۳- دانشیار، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۱۱

واژه‌های کلیدی

رئولوژی

رویش-دما

رویش-فرکانس

رویش-کرنش

ژل نانوفیبر گوجه‌فرنگی

در این پژوهش تفاله گوجه‌فرنگی حاصل از پسماند کارخانه‌های رب گوجه‌فرنگی خریداری شده و پس از خشک‌کردن به‌وسیله یک دستگاه سوپر آسیاب به پودر تبدیل شد. از پودر به‌دست‌آمده سه ژل با غلظت‌های ۲، ۴ و ۶ درصد تهیه شد و آزمون‌های رئولوژیکی رویش-کرنش، رویش-فرکانس و رویش-دما و رفتار جریان برای نمونه‌های ژل انجام شد. نتایج آزمون تفرق نور پویا نشان داد که میانگین اندازه ذرات ژل گوجه‌فرنگی حدود ۳۸ نانومتر بود. هر سه ژل برازش خوبی با مدل قانون توان داشته و رفتار رقیق‌شونده با برش داشتند و ویسکوزیته آنها با افزایش سرعت برش کاهش یافت. همچنین مساحت حلقه هیسترسیس ژل‌ها نشان‌دهنده خصوصیت تیکسوتروپی آنها بود. آزمون رویش-کرنش نشان داد که مدول الاستیک تمامی ژل‌ها بالاتر از مدول ویسکوز بوده و نقطه تقاطع هر سه ژل نشان داد که با افزایش غلظت تمایل به جریان‌یافتن کاهش می‌یابد. در آزمون رویش-فرکانس، تمامی غلظت‌های تهیه‌شده دارای مدول G' بالاتر نسبت به G'' بود و مقدار این دو پارامتر با افزایش غلظت از ۲ تا ۶ درصد نیز افزایش یافت. هر سه غلظت ژل در فرکانس‌های پایین رفتار شبه‌جامد از خود نشان دادند درحالی‌که با افزایش فرکانس روند افزایشی در پارامترهای G' و G'' مشاهده شد که نشان‌دهنده تضعیف ساختار ژل بود. در آزمون رویش-دما کاهش تدریجی مدول G' و G'' با افزایش دما تأییدکننده تضعیف اندک ژل در دماهای بالا بود، ولی در طول سردکردن ژل‌ها دوباره ساختار خود را بازیافتند و پسماند چندان مشاهده نشد.

مقدمه

کارخانه‌های فراوری گوجه‌فرنگی بالا می‌باشد (Schieber, 2001). تفاله گوجه‌فرنگی حدوداً حاوی ۳۳ درصد دانه، ۲۷ درصد پوست و ۴۰ درصد پالپ می‌باشد که پس از خشک‌شدن این نسبت به ۴۴ درصد دانه و ۵۶ درصد پوست و پالپ می‌رسد (Kaur, Wani, 2008). در سال‌های اخیر تقاضای مصرف‌کنندگان برای محصولات فراوری‌شده کارخانه‌های

گوجه‌فرنگی^۱ یکی از مهم‌ترین سبزی‌های زراعی و محبوب در جهان است که برای تولید محصولات از قبیل آب گوجه‌فرنگی، رب، پوره، کچاپ و سس گوجه‌فرنگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا ضایعات حاصل از

¹ *Lycopersicon esculentum*

افزایش یافته و سبب شده است فراوری ضایعات میوه و سبزی‌ها مورد توجه محققان قرار بگیرد (Westphal, Bauerfeind, Rohrer, & Böhm, 2014). در گذشته ضایعات گوجه‌فرنگی جهت خوراک دام و حاصلخیزی خاک استفاده می‌شد (Botineștean, Gruia, & Jianu, 2015)، ولی در حال حاضر این ضایعات می‌توانند به عنوان منابع ارزان قیمت جهت تولید ترکیبات باارزشی مانند ویتامین‌ها، کاروتنوئیدها، اسانس‌ها و فیبرها مورداستفاده قرار گیرند (Grassino et al., 2016). ضایعات گوجه‌فرنگی منبعی غنی از آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی بوده و اضافه کردن این ضایعات به محصولات غذایی خانگی و صنعتی منجر به افزایش ۴۰ تا ۵۳ درصدی خاصیت آنتی‌اکسیدانی محصول غذایی می‌شود (Toor & Savage, 2005). سلولز، همی سلولز، لیگنین و پکتین جزء فیبرهای موجود در ضایعات گوجه‌فرنگی هستند که به عنوان جزء ترکیبی در صنایع غذایی استفاده می‌شوند (Alvarado, Pacheco-Delahaye, & Hevia, 2001; Silva, Herrera, Sánchez-Mata, & Cámara, 2010). Ferreira و Caliar, Reis, Borba و Caliar (۲۰۱۶) گزارش نمود که تفاله کامل گوجه‌فرنگی که عمدتاً حاوی پوست و دانه است حدود ۵۲ درصد فیبر، ۱۰ درصد کربوهیدرات، ۲۰ درصد پروتئین، ۱۳ درصد چربی و ۳/۵ درصد خاکستر دارد. باین حال Anderson, Knoblich و Latshaw (۲۰۰۵) که ترکیبات شیمیایی پوست و دانه را به صورت مجزا بررسی نموده بودند، گزارش کردند که میزان فیبر پوست ۲۹/۹۴ درصد، پروتئین ۱۰ درصد و چربی و خاکستر به ترتیب برابر با ۳/۲ و ۲۵/۶ درصد است.

مطالعه‌های مختلفی در رابطه با استفاده از پودر تفاله گوجه‌فرنگی در محصولات مختلف به عنوان هیدروکلوئید، افزودنی، منبعی از آنتی‌اکسیدان و ترکیبات ریزمغذی انجام شده است (Del Valle, Cámara, & Torija, 2002). تأثیر افزودن پوست و تفاله گوجه‌فرنگی را در غلظت‌های ۱، ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد/وزنی به کنسانتره گوجه‌فرنگی اضافه کرده و مشاهده کردند که پس از افزودن پوست گوجه‌فرنگی میزان پکتین و قوام کنسانتره گوجه‌فرنگی افزایش یافت. از مخلوط آرد جو و تفاله گوجه‌فرنگی به روش اکستروژن برای تولید اسنک نیز استفاده شده است و اسنک‌های تولیدی از نظر رنگ، بافت، مزه و پذیرش کلی امتیاز بالایی را دریافت کردند (Altan, McCarthy, & Maskan, 2008). Majzoobi

Mesbahi و Jamalian, Farahnaky, Ghavi (۲۰۱۱) پودر تفاله گوجه‌فرنگی را به عنوان منبعی از هیدروکلوئید در غلظت‌های صفر، ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد/وزنی آرد به نان بربری اضافه کرده و گزارش کردند که جذب آب خمیر افزایش پیدا کرد و زمان رسیدن و ماندگاری خمیر نیز کاهش یافت و نرم شدن خمیر نیز از ۵ دقیقه به ۱۲ دقیقه افزایش یافت. اضافه کردن پودر تفاله سبب کاهش بیاتی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد شد. پودر تفاله گوجه‌فرنگی توسط Hoogenkamp, Savadkoochi و Shamsi Farahnaky (۲۰۱۴) برای تولید فرانکفورت، همبرگر و سوسیس‌های بدون گوشت مورداستفاده قرار گرفت و نتایج نشان داد که ظرفیت نگهداری آب سوسیس‌های حاوی تفاله گوجه‌فرنگی نسبت به نمونه‌های تجاری بالاتر می‌باشد. فرانکفورت‌های تولیدی حاوی ۵ و ۷ درصد/وزنی تفاله گوجه‌فرنگی قرمزی (a^*) بیشتری داشته و سوسیس‌های بدون گوشت حاوی ۷ درصد تفاله گوجه‌فرنگی روشنایی (L^*) و زردی (b^*) بالاتری را نشان دادند، ولی بین همبرگرهای با و بدون تفاله گوجه‌فرنگی اختلاف رنگی مشاهده نشد. سفتی و قابلیت جویدن تمامی نمونه‌های حاوی تفاله گوجه‌فرنگی نسبت به انواع تجاری بالاتر بود. همچنین در بررسی که روی اضافه کردن تفاله گوجه‌فرنگی تازه به سس کچاپ به هدف افزایش میزان فیبر انجام شد، تفاله تازه با دیگر ترکیبات فرمولاسیون سس کچاپ هموزن شد. نتایج نشان داد که اضافه کردن تفاله سبب افزایش فیبر کچاپ شده و خصوصیات رئولوژیکی سس حاصله که مستقیماً بستگی به ترکیبات جامد و نامحلول موجود در کچاپ داشت، افزایش یافت و درعین حال خصوصیات حسی، عطر و طعم و ویسکوزیته مشابه با گوجه‌فرنگی تازه بود (Torbica et al., 2016). اثر غلظت (بین ۹/۱ تا ۱۸/۱ درصد) و دما (۶۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) بر خصوصیات ویسکوالاستیک دیسپرسیون‌های تفاله لیوفیلیزه شده گوجه‌فرنگی توسط Belović, Pajić- Pećinar و Mastilović, Torbica, Lijaković (۲۰۱۶) بررسی شد. این محققان گزارش کردند که دیسپرسیون‌های تولیدی به صورت کلی مخلوطی از ذرات نامحلول احاطه شده توسط شبکه‌ای از مولکول‌های پکتین بودند و رفتار ویسکوالاستیک داشتند. غلظت‌های بالاتر این دیسپرسیون‌ها محکم‌تر بوده و مدول ذخیره بالاتری داشتند. همچنین دمای حرارت‌دهی بالا (۱۰۰

افزایش یافته و سبب شده است فراوری ضایعات میوه و سبزی‌ها مورد توجه محققان قرار بگیرد (Westphal, Bauerfeind, Rohrer, & Böhm, 2014). در گذشته ضایعات گوجه‌فرنگی جهت خوراک دام و حاصلخیزی خاک استفاده می‌شد (Botineștean, Gruia, & Jianu, 2015)، ولی در حال حاضر این ضایعات می‌توانند به عنوان منابع ارزان قیمت جهت تولید ترکیبات باارزشی مانند ویتامین‌ها، کاروتنوئیدها، اسانس‌ها و فیبرها مورداستفاده قرار گیرند (Grassino et al., 2016). ضایعات گوجه‌فرنگی منبعی غنی از آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی بوده و اضافه کردن این ضایعات به محصولات غذایی خانگی و صنعتی منجر به افزایش ۴۰ تا ۵۳ درصدی خاصیت آنتی‌اکسیدانی محصول غذایی می‌شود (Toor & Savage, 2005). سلولز، همی سلولز، لیگنین و پکتین جزء فیبرهای موجود در ضایعات گوجه‌فرنگی هستند که به عنوان جزء ترکیبی در صنایع غذایی استفاده می‌شوند (Alvarado, Pacheco-Delahaye, & Hevia, 2001; Silva, Herrera, Sánchez-Mata, & Cámara, 2010). Ferreira و Caliar, Reis, Borba و Caliar (۲۰۱۶) گزارش نمود که تفاله کامل گوجه‌فرنگی که عمدتاً حاوی پوست و دانه است حدود ۵۲ درصد فیبر، ۱۰ درصد کربوهیدرات، ۲۰ درصد پروتئین، ۱۳ درصد چربی و ۳/۵ درصد خاکستر دارد. باین حال Anderson, Knoblich و Latshaw (۲۰۰۵) که ترکیبات شیمیایی پوست و دانه را به صورت مجزا بررسی نموده بودند، گزارش کردند که میزان فیبر پوست ۲۹/۹۴ درصد، پروتئین ۱۰ درصد و چربی و خاکستر به ترتیب برابر با ۳/۲ و ۲۵/۶ درصد است.

مطالعه‌های مختلفی در رابطه با استفاده از پودر تفاله گوجه‌فرنگی در محصولات مختلف به عنوان هیدروکلوئید، افزودنی، منبعی از آنتی‌اکسیدان و ترکیبات ریزمغذی انجام شده است (Del Valle, Cámara, & Torija, 2002). تأثیر افزودن پوست و تفاله گوجه‌فرنگی را در غلظت‌های ۱، ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد/وزنی به کنسانتره گوجه‌فرنگی اضافه کرده و مشاهده کردند که پس از افزودن پوست گوجه‌فرنگی میزان پکتین و قوام کنسانتره گوجه‌فرنگی افزایش یافت. از مخلوط آرد جو و تفاله گوجه‌فرنگی به روش اکستروژن برای تولید اسنک نیز استفاده شده است و اسنک‌های تولیدی از نظر رنگ، بافت، مزه و پذیرش کلی امتیاز بالایی را دریافت کردند (Altan, McCarthy, & Maskan, 2008). Majzoobi

فرکانس و روبش-دما) با استفاده از رئومتر (Anton Paar، مدل MCR 301، ساخت اتریش) انجام شد، ژئومتری مورد استفاده صفحه موازی^۱ بوده و فاصله بین صفحات برای تمام آزمون‌ها روی Zerogap و ۰/۰۲ میلی‌متر تنظیم شد. تمامی اندازه‌گیری‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شدند. ژل گوجه‌فرنگی درون پلیت رئومتر بارگذاری شده و به مدت ۱ دقیقه زمان داده شد تا ساختار ژل بازیافت شده و به دمای مورد نظر برسد. در هنگام انجام آزمون با استفاده از سیستم پلتیر مجهز به سیرکولاتور آب (Viscotherm VT، ساخت اتریش) دما تنظیم شد. داده‌های رئولوژیکی با استفاده از نرم‌افزار رئوپلاس نسخه ۳،۴ پردازش شد.

اندازه ذرات

برای این آزمون ژل گوجه‌فرنگی تا غلظت ۰/۰۱ درصد رقیق شد و به مدت ۱۰ دقیقه در حمام فراصوت (۳۷ کیلوهرتز) در دمای محیط تحت امواج فراصوت قرار گرفت (S60، Elma، ساخت آلمان). میانگین اندازه و پراکنش اندازه ذرات با استفاد از آنالیز تفرق نور پویا (DLS^۲، Scatterscope I، Qudix، ساخت کره جنوبی) اندازه‌گیری شد.

رفتار جریانی

در این آزمون نمونه‌ها تحت نرخ برش در محدوده^۳ (s⁻¹) ۳۰۰-۰/۰۱ قرار گرفتند. ابتدا نرخ برش از ۰/۰۱ تا ۳۰۰ بر ثانیه افزایش یافت و در مرحله دوم نرخ برش از ۳۰۰ تا ۰/۰۱ کاهش یافت. داده‌های رئولوژیکی حاصل از این آزمون با مدل‌های قانون توان (رابطه^۴ ۱)، هرشل-بالکلی^۲ (رابطه^۵ ۲)، بینگهام (رابطه^۳ ۳)، کراس^۴ (رابطه^۴ ۴) و کارتا^۵ (رابطه^۵ ۵) برازش شد تا بهترین رابطه بین نرخ برش (γ) و تنش برشی (τ) مشخص گردد (Razi، Motamedzadegan, Shahidi, & Rashidinejad, 2018).

رابطه^۱ (۱)

$$\tau = K\dot{\gamma}^n$$

رابطه^۲ (۲)

$$\tau = k\dot{\gamma}^n + \tau_0$$

درجه سانتی‌گراد) سبب شد تا پیوندهای غیرکووالانسی بین ذرات جامد و شبکه پکتینی پیرامونی شکسته شود در نتیجه استحکام سیستم کاهش یابد.

به سبب وجود پتانسیل استفاده از این ضایعات در صنعت غذا و فراورده‌های غذایی و نظریه‌اینکه برای استفاده از این فراورده جانی در صنعت غذا بایستی در ابتدا خصوصیات و رفتار فیزیکی آن در حین فرایندهای مختلف غذایی مشخص گردد، در این مطالعه به بررسی خصوصیات فیزیکی و رئولوژیکی غلظت‌های متفاوت ژل نانوفیبر تولیدشده از پسماند کارخانه‌های رب‌سازی پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی پودر گوجه‌فرنگی

تفاله گوجه‌فرنگی از ضایعات کارخانه فرآوری رب گوجه‌فرنگی اتکا (قائم‌شهر) جمع‌آوری شد و تاحدامکان به صورت دستی چوب و کلاهک‌های گوجه‌فرنگی جداسازی شد. سپس تفاله تمیزشده به مدت ۵ ساعت در آون (UFE600A3، Memmert، ساخت آلمان) با دمای ۱۰۳±۱ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا به طور کامل خشک شود. پس از خشک شدن تاحدامکان تخم گوجه‌فرنگی موجود در تفاله‌ها با الک جداشده و باقی‌مانده به صورت دستی و با هاون خرد گردید. در ادامه نمونه‌های خشک و خردشده با استفاده از آسیاب دیسکی با جنس دیسک کربید سیلیسیم (MKCA6-2، Masuko، Co، ساخت ژاپن) با ۱۸۰۰ دور در دقیقه آسیاب شد (علی‌نای لاکانی، افرا و یوسفی، ۱۳۹۵).

تهیه ژل و آزمون‌های رئولوژیکی

غلظت‌های مختلف ژل تفاله گوجه فرنگی ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی/حجمی، به ترتیب از حل کردن ۲، ۴ و ۶ گرم پودر گوجه‌فرنگی در ۹۸، ۹۶ و ۹۴ میلی‌لیتر آب مقطر تهیه شد. بدین منظور ۲، ۴ و ۶ گرم پودر آسیاب‌شده در مقداری آب به مدت ۳۰ دقیقه هیدراته‌شده و درحالی‌که به آرامی روی همزن مغناطیسی (MS300HS، مه‌رتجهیز، ساخت ایران) با ۲۰۰ دور در دقیقه هم‌زده می‌شد، آب مقطر به آنها اضافه شد تا به حجم نهایی ۱۰۰ میلی‌لیتر رسید. در ادامه محلول‌های ژلی با التراسوند به مدت ۵ دقیقه تحت دامنه ۹۰ درصد تیمار شدند. آزمون برشی پایا (رفتار جریان) و ناپایا (روبش-کرنش، روبش-

¹ Parallel plate

² Dynamic light scattering

³ Herschel-Bulkley

⁴ Cross

⁵ Carreau

نتایج و بحث

اندازه ذرات

نتایج آزمون تفرق نور پویا نشان داد که متوسط اندازه ذرات ژل تهیه شده بین ۲۴ تا ۱۰۰ نانومتر بود. مطابق با نتایج، d_{10} نمونه‌ها یعنی ۱۰ درصد اندازه ذرات ژل ۲۴/۱ نانومتر، d_{50} یعنی ۵۰ درصد اندازه ذرات ژل ۳۸/۵ نانومتر و d_{90} یعنی ۹۰ درصد اندازه ذرات ژل گوجه‌فرنگی در محدوده ۸۵ نانومتر بود. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از آسیاب دیسکی سبب کاهش اندازه ذرات ژل حاصل از تفاله گوجه‌فرنگی در مقیاس نانومتر شده است. در این خصوص، Azari, Yousefi, و Khazaeian (۲۰۱۸) که از روش آسیاب مکانیکی برای تبدیل مستقیم ذرات چوب به نانوفیبر استفاده کرده بودند، نشان دادند که متوسط قطر نانوفیبرهای حاصله ۵۵ نانومتر بوده که مطابق با نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر می‌باشد.

رفتار جریان ژل تفاله گوجه‌فرنگی

نتایج نشان داد که در تمامی نمونه‌ها با افزایش نرخ برش از ۰/۴ تا ۳۰۰ بر ثانیه ویسکوزیته ظاهری کاهش یافت. به عبارت دیگر، ویسکوزیته ظاهری به طور معکوس وابسته به نرخ برش بود که نشان‌دهنده رفتار رقیق‌شونده با برش در تمام نمونه‌های ژل گوجه‌فرنگی بود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت ژل تفاله گوجه‌فرنگی از ۲ به ۶ درصد ویسکوزیته ظاهری افزایش یافته است. کاهش ویسکوزیته در نتیجه افزایش سرعت برش می‌تواند در اثر جهت‌گیری یک‌سویه مولکول‌های ساختاری ژل نانوفیبر گوجه‌فرنگی بخصوص پکتین باشد. do Nascimento, Cordeiro, Simas-Tosin, و Gorin, Jacomini (۲۰۱۶) گزارش کردند که در سیستم‌های پلی‌ساکاریدی، پکتین نقش مهمی را در رابطه با رفتار رقیق‌شوندگی با برش ایفا می‌کند (شکل ۱).

به‌طور کلی مواردی نظیر وزن مولکولی، میزان زنجیره‌های جانبی و طول زنجیره‌ها و شکل فضایی پلی‌ساکاریدها در محلول بر میزان ویسکوزیته ظاهری و سایر خصوصیات رئولوژیکی ژل‌ها تأثیر دارند (Amin, Abadi, & Katas, 2014; Casas, Mohedano, & García-Ochoa, 2000). مشخص شده است که مواد جامد نامحلول ژل شامل ترکیبات پروتئینی و پکتیکی است و طبق مطالعه Sharma, LeMaguer, Liptay, و Poysa

رابطه (۳)

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma}$$

رابطه (۴)

$$\eta_a = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (\alpha_c \dot{\gamma})^m}$$

رابطه (۵)

$$\eta_a = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{(1 + (\lambda_c \dot{\gamma})^2)^N}$$

در رابطه‌های (۱) تا (۵)، k : ضریب قوام ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$), n : شاخص رفتار جریان (بدون بُعد)، τ : تنش برشی ($\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$) Pa و $\dot{\gamma}$: سرعت برش (s^{-1}), τ_0 : تنش حد (Pa), η_p : ویسکوزیته برشی صفر ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), η_∞ : ویسکوزیته برشی بی‌نهایت ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), α_c و λ_c : ثابت‌های زمانی مربوط به زمان آرامیدگی پلیمر در محلول و m و N : ضرایب بدون بُعد می‌باشند.

آزمون روبش-کرنش^۱

در این آزمون نمونه‌ها تحت کرنش ۰/۱ تا ۱۰۰ درصد در فرکانس ثابت ۱ هرتز قرار گرفتند تا محدوده ویسکوالاستیک (LVE^2) ژل‌ها تعیین شود. در ادامه وابستگی مدول ذخیره G'_{LVE} و ویسکوز G''_{LVE} و نیز تانژانت آفت $\tan(\delta)_{\text{LVE}}$ استرس در نقطه جریان τ_f و کرنش در انتهای ناحیه خطی γ_c مورد بررسی قرار گرفت (Razi et al., 2018).

آزمون روبش-فرکانس^۳

در این آزمون، نمونه‌ها در ناحیه خطی (LVE) تحت کرنش ثابت ۰/۳ درصد از فرکانس ۰/۱ تا ۵۰ هرتز مورد بررسی قرار گرفتند، دما در حین آزمایش ۲۵ درجه سانتی‌گراد بود (Torbica et al., 2016).

آزمون روبش-دما^۴

در این آزمون دمای تمام نمونه‌ها تحت کرنش ۰/۳ درصد و فرکانس ثابت ۱ هرتز از دمای ۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد افزایش و سپس دوباره تا ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. سرعت تغییر دما ۵ درجه سانتی‌گراد در هر دقیقه بود (Torbica et al., 2016).

¹ Amplitude sweep

² Linear viscoelastic range

³ Frequency sweep

⁴ Temperature sweep

خسروی‌راد (۱۳۹۷) درمورد رفتار رئولوژیکی کنسانتره آلیمو گزارش کردند، مشابهت داشت.

همچنین Karataş و Arslan (۲۰۱۶) نشان دادند که با افزایش نرخ برش ویسکوزیته ظاهری محلول‌های کربوکسی‌متیل سلولز به‌دست‌آمده از ضایعات تفاله پوست گریپ‌فروت کاهش می‌یابد که مطابق با نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر است.

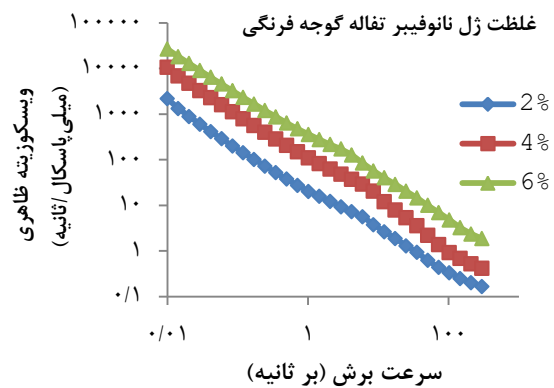
داده‌های حاصل از رفتار جریان با مدل‌های هرشل-بالکلی، قانون توان^۱، کراس و کارنا برازش‌شده و باتوجه‌به رفتار شل‌شوندگی ژل‌ها و معیار ضریب تبیین (R^2)، مدل قانون توان به‌عنوان بهترین مدلی که رفتار رئولوژیکی ژل‌ها را نشان می‌دهد، انتخاب شد (جدول ۱).

چنان‌که ملاحظه می‌شود، با افزایش غلظت از ۲ تا ۶ درصد، ضریب قوام از ۱۱/۷۶ به ۱۸۴/۳ ($Pa.s^n$) افزایش یافت این نتایج با داده‌های قبلی مبنی بر اینکه در دامنه سرعت برش فوق با افزایش غلظت، ویسکوزیته ظاهری افزایش می‌یابد، مطابقت داشت. از طرف دیگر شاخص رفتار جریان (n) در تمامی غلظت‌ها کمتر از ۱ بود که نشان‌دهنده ماهیت رفتار رقیق‌شوندگی با برش می‌باشد. هر قدر این شاخص کوچک‌تر باشد رفتار ماده اختلاف بیشتری با رفتار نیوتنی داشته و به حالت شبه‌پلاستیک نزدیک‌تر است (محفوظی، کوچکی و رضوی، ۱۳۹۶).

باتوجه‌به این مسئله، رفتار رقیق‌شوندگی با افزایش غلظت افزایش می‌یابد، یعنی رفتار ژل در غلظت ۲ درصد نزدیک به رفتار مایعات نیوتنی بوده و هرچه غلظت افزایش یابد، پس از گذر از تنش بحرانی، ژل رقیق‌شوندگی بیشتری داشته و مقاومت آن در برابر اعمال برش و سهولت جاری‌شدن کمتر است.

مساحت حلقه برای ژل ۲ درصد برابر با ۱۷۵۲/۹ (پاسکال/ثانیه) بود و ژل‌های ۴ و ۶ درصد به‌ترتیب مساحت حلقه هیستریزیس برابر با ۲۰۸۵/۶ و ۱۲۰۴۲/۴۶ پاسکال/ثانیه داشتند (داده‌ها آورده نشده‌اند). افزایش میزان هیستریزیس نشان‌دهنده افزایش میزان وابستگی به زمان می‌باشد و می‌توان گفت در غلظت بالا ژل تفاله گوجه‌فرنگی رفتار تیکسوتروپی^۲ بیشتری نشان داده است، در این رابطه Al-Asheh, Jumah, Banat, Abu-Jdayil و

(۱۹۹۶) پکتین فاکتور مهمی در افزایش ویسکوزیته و خصوصیات رئولوژیکی پالپ گوجه‌فرنگی بوده و پروتئین‌ها در این رابطه نقش کمتری دارند. ذرات جامد نامحلول که با شبکه‌ای از پکتین محاصره شده‌اند توسط Belović و همکاران (۲۰۱۶) نیز گزارش شده است. در مطالعه‌ای که توسط Knoblich و همکاران (۲۰۰۵) انجام شد، گزارش گردید که میزان پروتئین و چربی پوست گوجه‌فرنگی به‌ترتیب برابر با ۱۰ و ۳/۲ درصد بوده و میزان فیبر آن حدود ۲۹/۹ درصد می‌باشد. باتوجه‌به اینکه در این تحقیق پیش از تولید پودر؛ عمده دانه‌ها جداسازی‌شده بود، می‌توان نتیجه‌گرفت که رفتار رئولوژیکی ژل نانوفیبر ناشی از درصد بالای فیبر و پکتین موجود در تفاله بوده است.

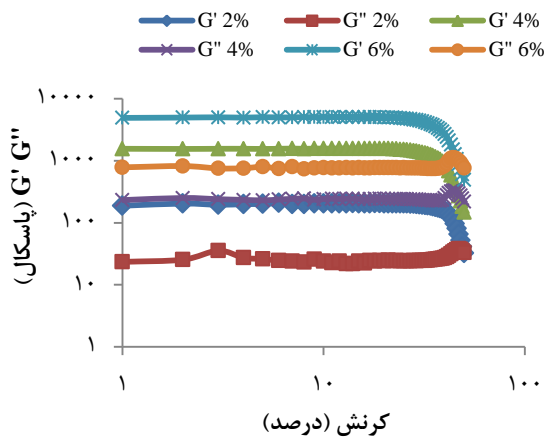


شکل ۱- نمودار ویسکوزیته ظاهری در برابر سرعت برش در غلظت‌های متفاوت ژل گوجه‌فرنگی

رفتار رقیق‌شونده با برش یا سودوپلاستیک در سیستم‌های ناهمگون که حاوی یک فاز پراکنده هستند، مشاهده می‌شود. ذرات فاز پراکنده با نیروهای ضعیفی به یکدیگر متصل شده‌اند و زمانی که نیروهای هیدرودینامیکی در هنگام برش به اندازه کافی بزرگ باشند، اتصالات بین مولکولی شکسته‌شده و در نتیجه کاهش اندازه واحدهای ساختاری، شکستن ماکرومولکول‌ها و آزاد شدن زنجیره‌های ماکرومولکولی، مقاومت به جریان در هنگام برش کاهش می‌یابد (Mewis, 1979). همچنین جهت‌یافتگی و آرایش بیشتر پلی‌ساکاریدهای سازنده سیستم (پکتین) در جهت سرعت برش، دلیل دیگری است که سبب ایجاد رفتار سودوپلاستیک در نمونه می‌شود (Lapasin & Priel, 1995; Rha, 2012). این نتایج با آنچه که معمدزادگان، امیدبخش‌امیری، جمشیدی و

¹ Power law

² Thixotropy



شکل ۲- مدول ذخیره (G') و مدول آفت (G'') غلظت‌های مختلف ژل تفاله گوجه‌فرنگی

نسبت G' به G'' در ناحیه خطی که با $\tan(\delta)_{LVE}$ نشان داده می‌شود بیانگر رفتار فیزیکی سیستم ژلی است (جدول ۲). این مقدار برای ژل ۲ درصد برابر با ۰/۱۱ پاسکال و برای ژل‌های ۴ و ۶ درصد به ترتیب برابر با ۰/۱۵۷ و ۰/۱۶ بود. تانژانت آفت بین ۰/۱ و ۱ در حقیقت بیانگر این مطلب است که سیستم یک ژل واقعی نیست و ساختاری بین یک بیوپلیمر غلیظ و ژل واقعی دارد. ژل حاصل از تفاله گوجه‌فرنگی در این مطالعه نیز در واقع مخلوطی از هیدروکلوئیدهایی چون پکتین و غیره بود که می‌توان آن را به نوعی بیوپلیمر غلیظ در نظر گرفت که فاقد ساختار گسترده یک ژل کامل می‌باشد. در این رابطه شکیبا، خمیری، امیری و رضایی (۱۳۹۶) گزارش کردند که تمامی نمونه‌های سس کچاپ مورد استفاده در مطالعه آنها (حاوی تیمارهای صمغ ریحان، اسفرزه و زانتان) تانژانت آفت بین ۰/۱ تا ۱ داشته و رفتار ویسکوالاستیک از خود نشان دادند که با یافته‌های تحقیق حاضر مطابقت داشت.

پس از کرنش بحرانی، نمودار از حالت خطی خارج شده و نمودار G' و G'' را قطع می‌کند که به آن نقطه تقاطع گویند. نقطه‌ای که در آن G' به شدت کاهش می‌یابد کرنش بحرانی (γ_c) نامیده می‌شود و نشان‌دهنده تخریب ساختار ژل است و در پلیمرهای زیستی و ژل‌ها معمولاً در کرنش بیشتر از ۱ درصد رخ می‌دهد. Behrouzian, Razavi و Alghooneh (۲۰۱۷) نشان دادند که در محدوده کرنش ۱۰ درصد و بیشتر از آن منحنی‌های G' و G'' محلول حاوی صمغ کتیرا شکسته می‌شوند، اما در این تحقیق کرنش بحرانی برای نمونه ۲ درصد برابر با ۰/۷۷

Hammad (۲۰۰۴) نیز گزارش کردند که رب و پودر گوجه‌فرنگی رفتار تیکسوتروپیک دارد.

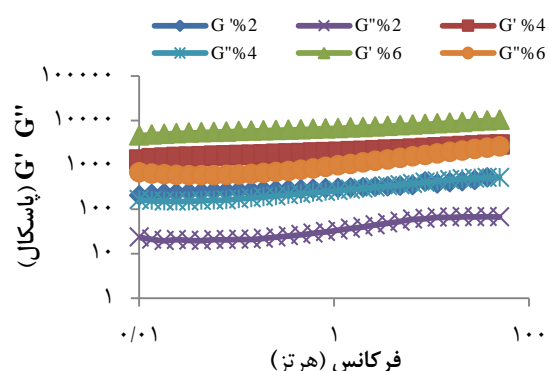
جدول ۱- تأثیر غلظت‌های مختلف ژل نانوفیبر گوجه‌فرنگی بر خصوصیات رئولوژیکی

غلظت ژل (درصد)	پارامترهای مدل قانون توان		
	ویسکوزیته ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)	ضریب قوام ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)	شاخص رفتار جریان (n)
۲	۰/۶۱۹	۱۱/۷۶	۰/۷
۴	۲/۱۹	۳۴/۳۹	۰/۱۲
۶	۱۰	۱۸۴/۳۰	۰/۱۵

آزمون روبش-کرنش

با استفاده از آزمون روبش-کرنش می‌توان محدوده ویسکوالاستیک خطی برای نمونه‌های ژل تفاله گوجه‌فرنگی را تعیین نمود. در شکل (۲) مشاهده می‌شود که در منحنی روبش-کرنش با افزایش کرنش دو محدوده مختلف در نمودار ایجاد شده است. (۱) ناحیه‌ای که G' و G'' تقریباً ثابت و خطی است. (۲) ناحیه غیرخطی که در آن G' و G'' با افزایش کرنش کاهش می‌یابد. در ناحیه خطی مقدار G' برای تمام غلظت‌های مورد بررسی بالاتر از G'' بود که مطابق با نتایج به دست آمده از تحقیق Belović و همکاران (۲۰۱۶) است. آنها میزان G' بالاتر از G'' را در دیسپرسیون‌های تفاله گوجه‌فرنگی گزارش کردند که مشابه با تحقیق حاضر بود. آنها نشان دادند که در محدوده ویسکوالاستیک خطی تمام نمونه‌های گوجه‌فرنگی مقدار G' بالاتر از G'' داشتند. بالاتر بودن G' نسبت به G'' در نمونه‌های ژل گوجه‌فرنگی نشان‌دهنده این مطلب است که ویژگی الاستیک ژل‌ها نسبت به حالت پلاستیک ارجحیت داشته است (Balaghi, Mohammadifar, Zargaraan, Gavlighi, & Mohammadi, 2011). همچنین با افزایش غلظت مقادیر هر دو مدول ویسکوز و الاستیک افزایش یافت که نشان‌دهنده افزایش خصوصیت ویسکوالاستیسیته با افزایش غلظت می‌باشد. این نتایج با آنچه که Bayod, Willers و Tornberg (۲۰۰۸) در مورد نمونه‌های رب و سس کچاپ گزارش کردند، مشابهت داشت.

در نتیجه آسیاب‌نمودن تفاله گوجه‌فرنگی، ضمن آسیب‌رسیدن به دیواره سلولی گیاهی ذرات تفاله گوجه‌فرنگی در شبکه قوی محلول پکتین به‌دام می‌افتند.



شکل ۳- مدول ذخیره (G') و مدول آفت (G'') به عنوان تابعی از فرکانس در کرنش ۱ درصد برای نمونه‌های مختلف ژل تفاله گوجه‌فرنگی

آزمون روبش-فرکانس در محدوده ویسکوالاستیک خطی انجام شد که در حین آزمون و در اثر تغییر فرکانس اعمالی به‌طور مداوم باندهایی درون ساختار ژل شکسته و دوباره تشکیل می‌شوند (Everett & McLeod, 2005). در شکل (۳) مشخص است که با افزایش فرکانس G' و G'' هرچند اندک افزایش یافته‌اند. نتایج مشابهی در رفتار رئولوژیکی صمغ‌های مرو، زانتان و ترکیب آنها (Behrouzian et al., 2017) و همچنین سوسپانسیون‌های گوجه‌فرنگی (Ouden & Vliet, 2002) مشاهده گردید که با افزایش فرکانس G' و G'' افزایش یافتند. در فرکانس‌های پایین مقدار این دو پارامتر پایین‌تر بود که نشان‌دهنده رفتار شبه‌جامد است اما در فرکانس‌های بالاتر حرکات برگشتی ژل به‌خوبی انجام نمی‌شود در نتیجه در اثر گیرافتادن ماکرومولکول‌های محلول، ژل‌های ضعیف‌تری شکل می‌گیرند. Moubarik (2015) نشان داد که با افزایش فرکانس مقدار G' و G'' در نمونه‌های لیگنین باگاس نیشکر^۱ افزایش یافته و مقدار G' بزرگ‌تر از G'' بود که نشان‌دهنده تشکیل یک ژل ضعیف با پیوندهای عرضی بود و این پیوندها می‌توانند شکسته و یا اصلاح شوند.

درصد و برای نمونه‌های ۴ و ۶ درصد به‌ترتیب برابر با ۰/۴۶ و ۰/۱۶ درصد بود. باتوجه به نتایج، در کرنش حدود ۰/۳ درصد رفتار رئولوژیکی در محدوده ویسکوالاستیک خطی قرار داشت لذا سایر آزمون‌های نوسانی در این محدوده انجام گرفت.

همچنین تنش در نقطه تقاطع با τ_f نشان داده می‌شود و زمانی است که ساختار درهم‌شکسته‌شده و ژل جریان می‌یابد (Behrouzian et al., 2017). این مقدار در ژل ۲ و ۴ درصد برابر با ۳۳۵ و ۱۱۶ پاسکال بوده ولی در ژل ۶ درصد برابر با ۲۳/۹ پاسکال بوده است به این معنی که میزان تنش موردنیاز برای ایجاد جریان با افزایش غلظت کاهش می‌یابد که می‌تواند مرتبط با افزایش غلظت مولکول‌های ساختاری و افزایش توانایی اتصال به آب آنها باشد.

جدول ۲- مدول ذخیره، مدول آفت و تانژانت آفت در ناحیه خطی، تنش در نقطه تقاطع و کرنش بحرانی غلظت‌های مختلف ژل گوجه‌فرنگی

غلظت (درصد)	τ_f (Pa)	$\tan(\delta)_{LVE}$	G'_{LVE} (Pa)	G''_{LVE} (Pa)	γ_c
۲	۳۳۵	۰/۱۱	۲۴۱	۲۶/۹۰	۰/۷۷
۴	۱۱۶	۰/۱۵۷	۱۵۴۰	۲۲۷	۰/۴۶
۶	۲۳/۰۹	۰/۱۶	۴۸۹۰	۷۵۲	۰/۱۶۱

* مدول ذخیره در ناحیه خطی G'_{LVE} ، مدول آفت در ناحیه خطی G''_{LVE} ، تانژانت آفت در ناحیه خطی $\tan(\delta)_{LVE}$ ، تنش در نقطه تقاطع τ_f و کرنش بحرانی γ_c .

آزمون روبش-فرکانس

شکل (۳) نمودار روبش-فرکانس غلظت‌های مختلف ژل تفاله گوجه‌فرنگی را نشان می‌دهد که در محدوده فرکانس ۰/۱ تا ۵۰ هرتز و کرنش ثابت ۰/۳ درصد انجام شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود G' در محدوده فرکانس تعریف‌شده در تمام نمونه‌ها بالاتر از G'' بوده و نقطه تقاطعی نیز در هیچ‌یک از نمونه‌های ژل مشاهده نشد که به نوعی نشان‌دهنده ویسکوالاستیک بودن ژل می‌باشد، تغییر شکل این نوع ژل‌ها از نوع الاستیک بوده و بازگشت‌پذیر است (Hesarinejad, Koocheki, & Razavi, 2014). این نتایج با آنچه که Ouden و Vliet (2002) راجع به سوسپانسیون‌های گوجه‌فرنگی به‌دست آوردند، مطابقت داشت. ساختارهای شبکه‌ای ژل مانند به‌هم‌پیوسته به‌طور کلی رفتار الاستیک نشان می‌دهند.

¹ Sugarcane Bagasse

و G'' مشاهده شد، درعین حال با افزایش غلظت قابلیت تولید ژل افزایش می‌یابد (Niknam, Ghanbarzadeh, Ayaseh, & Rezagholi, 2018). Adewale و Christopher (۲۰۱۷) روند کاهش G' برای سوسپانسیون تهیه شده از روغن خام تفاله چوب^۳ که محصول جانبی^۴ اصلی کارخانه‌های فراوری کاغذ می‌باشد، گزارش نمودند که مطابق با نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر است.

در منحنی برگشت مشاهده می‌شود که با کاهش دما از ۵۰ به ۵ درجه سانتی‌گراد مدول الاستیک افزایش می‌یابد؛ همچنین در مدول ویسکوز نیز رفتار مشابهی دیده شد. Rafe, Razavi, و Farhoosh (۲۰۱۳) گزارش کردند که افزایش مدول الاستیک در طول دوره سرد کردن می‌تواند در نتیجه قوی‌تر شدن برهمکنش‌های آب‌گریز و پیوندهای هیدروژنی باشد. نتایج مطالعه تحقیق حاضر با آنچه که از پژوهش Martin-Diana, Rico, Khiari, و Barry-Ryan (۲۰۱۷) در رابطه با ژلاتین استخراج شده از پوست ماهی ماکرول^۵ در آزمون روبش-دما گزارش شد، مشابه می‌باشد. در شکل (۴-الف) و (۴-ب) مشاهده می‌شود که در نمونه‌های ژل با افزایش غلظت مقدار G' و G'' افزایش یافته است، لذا غلظت یکی از پارامترهای مهم بر رفتار ویسکوالاستیک دینامیکی ژل در آزمون روبش-دما محسوب می‌گردد (Rigby, 1968). نتایج تحقیق حاضر با نتایج Yoo و Um (۲۰۱۳) مطابقت دارد، آنها رفتار رئولوژیکی ژل‌های هیدروکسی‌متیل سلولوز و هیدروکسی‌پروپیل متیل سلولوز را مورد بررسی قرار داده و اعلام نمودند که با افزایش دما تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد مقدار G' و G'' به میزان بسیار کمی کاهش یافته و نمونه‌هایی که ویسکوزیته بالاتری داشتند مدول الاستیک و ذخیره بالاتری داشتند.

غلظت ژل همچنین بر مقدار G' و G'' مؤثر بود و با افزایش غلظت ژل از ۲ به ۶ درصد مقدار آنها افزایش یافت که می‌تواند در نتیجه افزایش کمپلکس‌های ساختاری با افزایش غلظت باشد. در غلظت پایین (۲ درصد) نواحی بین مولکولی موجود نمی‌توانند در اتصالات غیر کووالانسی متقابل شرکت کنند در حالی که در غلظت‌های ۴ و ۶ درصد نواحی اتصال بیشتری بین مولکول‌ها تشکیل شده و شبکه‌ای ماکرومولکولی تشکیل می‌دهند، به عبارت دیگر زمانی که غلظت ژل به اندازه کافی بالا باشد، زنجیره‌های پلیمری شروع به درهم‌پیچیدگی می‌کنند که این درهم‌پیچیدگی‌ها بیشتر برهمکنش مکانیکی است لذا ماکرومولکول‌ها قادر هستند به آهستگی و تحت نیروهای برشی کوچک به آرامی در کنار یکدیگر حرکت کنند. رفتار مشابهی در مورد صمغ دانه قدومه شهری^۱ در غلظت‌های ۱/۵ تا ۳ درصد مشاهده شد (Hesarinejad et al., 2014). همچنین Koubala و همکاران (۲۰۰۹) نیز نشان دادند که با افزایش فرکانس مقدار G' و G'' در نمونه‌های ژل پکتین استخراج شده از پوست میوه انبه و آمبرلا^۲ افزایش می‌یابد همچنین مقدار G' و G'' در ژل تحت تأثیر غلظت بوده و در غلظت ۱ درصد بالاتر از ژل ۰/۶ درصد بود.

آزمون روبش-دما

شکل (۴-الف) و (۴-ب) تغییرات پارامترهای ویسکوالاستیک G' و G'' نمونه‌های ژل گوجه‌فرنگی در کرنش ۱ درصد را نشان می‌دهد. در تمامی نمونه‌ها، با افزایش دما از ۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد مدول‌های دینامیکی (G' و G'') اندکی کاهش یافتند که نشان می‌دهد با افزایش دما، مقاومت ژل گوجه‌فرنگی در برابر جریان یافتن کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش دما فاصله بین مولکول‌ها افزایش یافته و برهمکنش‌های بین مولکولی کاهش می‌یابد که به نوبه خود سبب کاهش انرژی مورد نیاز برای جریان یافتن شده و خصوصیت ویسکوالاستیک کاهش می‌یابد (Hesarinejad et al., 2014). با این حال باتوجه به نمودارهای مدول ذخیره و مدول آفت، مشخص شد که این ژل‌ها چندان تحت تأثیر دما قرار نگرفته و همچنین در هیچ‌یک از نمونه‌های ژل نقطه تقاطع بین G'

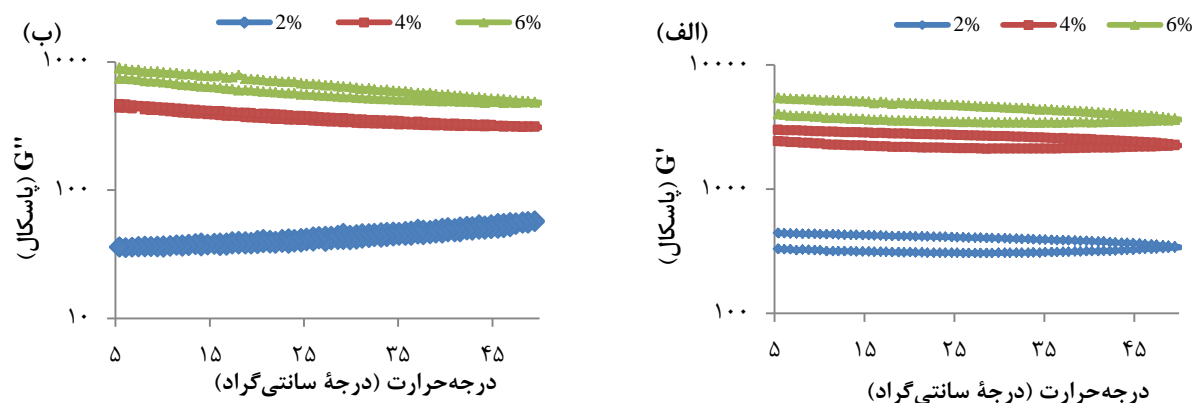
³ Crude tall oil

⁴ By product

⁵ Mackerel

¹ *Lepidium perfoliatum*

² Ambarella



شکل ۴- مدول ذخیره (الف) و مدول آفت (ب) غلظت‌های مختلف ژل نانوفیبر گوجه‌فرنگی در دمای ۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد

نتیجه‌گیری

به‌طور خلاصه از نتایج تحقیق‌های انجام‌شده می‌توان نتایج زیر را استنباط نمود: (۱) اندازه ذرات ژل حاصل از تفاله گوجه‌فرنگی در محدوده مناسب تشکیل ژل قرار داشت بنابراین دستگاه سوپراسیاب توانایی تبدیل تفاله خشک گوجه‌فرنگی به پودری با خاصیت تشکیل ژل را دارا بود. (۲) هر سه غلظت ژل برازش خوبی با مدل قانون توان داشته و رفتار رقیق‌شونده با برش و تیکسوتروپیک داشتند. (۳) آزمون روبش-کرنش رفتار شل‌شونده با برش را برای تمام نمونه‌های ژل گوجه‌فرنگی تأیید نمود و نشان داد که تمامی ژل‌ها خصوصیت الاستیک بیشتری نسبت به ویژگی ویسکوز داشته و شبکه ژلی نسبتاً مستحکمی دارند. همچنین، هر قدر غلظت افزایش می‌یابد تمایل ژل به جریان‌یافتن کاهش یافت. (۴) آزمون روبش-فرکانس نشان

داد ژل‌های تهیه‌شده در فرکانس پایین رفتار شبه‌جامد داشتند اما با افزایش فرکانس سیستم ژل تضعیف شد. همچنین مدول الاستیک و ویسکوز هر دو با افزایش غلظت ژل افزایش یافتند. (۵) آزمون روبش-دما نشان داد که با افزایش دما از ۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد ساختار ژل تضعیف می‌گردد، همچنین با افزایش غلظت مساحت حلقه هیستریزیسی افزایش یافت، به‌این معنی که در غلظت‌های بالاتر ساختار ژل بیشتر تخریب‌شده و توانایی بازیابی ساختار کمتر شده است.

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از همکاری شرکت دانش‌بنیان نانونین پلیمر در طی انجام این پژوهش تشکر و سپاسگزاری نمایند.

منابع

- شکیبا، س.، خمیری، م.، امیری، س.، رضایی، ر. (۱۳۹۶). تأثیر صمغ زانتان و موسیلاژ دانه‌های اسفرزه و ریحان بر رفتار ویسکوالاستیک سس کچاپ. نشریه فرآوری و نگهداری مواد غذایی، (۲)۹، ۸۵-۱۰۰. doi:<https://doi.org/10.22069/EJFPP.2018.13445.1438>
- علی‌نای‌لاکانی، ص.، افرا، ا.، و یوسفی، ح. (۱۳۹۵). بررسی تأثیر پالایش و پرس کاغذ در استفاده از سلولز نانو فیبریله شده به منظور بهبود ویژگی‌های خمیر کاغذ شیمیایی-مکانیکی CMP. تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران، (۲)۳۱، ۲۲۴-۲۳۶. doi:<https://doi.org/10.22092/IJWPR.2016.105770>
- محموظی، م.، کوچکی، آ.، و رضوی، س. (۱۳۹۶). بررسی اثر انجماد سریع و کند بر ویژگی‌های عملکردی (ویژگی‌های رئولوژیکی، پایداری امولسیون و کف) صمغ دانه قدومه شهری. پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، (۲)۱۳، ۲۴۰-۲۵۰. doi:<https://doi.org/10.22067/ifstrj.v1395i0.49167>
- معمدزادگان، ع.، امیدبخش‌امیری، ا.، جمشیدی، م.، و خسروی‌راد، ت. (۱۳۹۷). اثر فرآیند تغلیظ بر خصوصیات رئولوژیکی و فیزیکوشیمیایی آبلیمو. پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، (۱)۱۴، ۱۱۹-۱۳۱. doi:<https://doi.org/10.22067/ifstrj.v1396i0.59409>
- Abu-Jdayil, B., Banat, F., Jumah, R., Al-Asheh, S., & Hammad, S. (2004). A comparative study of rheological characteristics of tomato paste and tomato powder solutions. *International Journal of Food Properties*, 7(3), 483-497. doi:<https://doi.org/10.1081/JFP-200032940>
- Adewale, P., & Christopher, L. P. (2017). Thermal and rheological properties of crude tall oil for use in biodiesel production. *Processes*, 5(4), 59. doi:<https://doi.org/10.3390/pr5040059>

- Aliniyay Lakani, S., Afra, E., & Yousefi, H. (2016). Studying the effect of pulp refining and paper pressing and using nano fibrillated cellulose to improve the CMP pulp properties. *Iranian journal of Wood and Paper Science Research*, 31(2), 224-236. doi:<https://doi.org/10.22092/IJWPR.2016.105770> (in Persian)
- Altan, A., McCarthy, K. L., & Maskan, M. (2008). Evaluation of snack foods from barley–tomato pomace blends by extrusion processing. *Journal of Food Engineering*, 84(2), 231-242. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.05.014>
- Alvarado, A., Pacheco-Delahaye, E., & Hevia, P. (2001). Value of a tomato byproduct as a source of dietary fiber in rats. *Plant Foods for Human Nutrition*, 56(4), 335-348. doi:<https://doi.org/10.1023/A:1011855316778>
- Amin, M. C. I. M., Abadi, A. G., & Katas, H. (2014). Purification, characterization and comparative studies of spray-dried bacterial cellulose microparticles. *Carbohydrate Polymers*, 99, 180-189. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.041>
- Balaghi, S., Mohammadifar, M. A., Zargaraan, A., Gavlighi, H. A., & Mohammadi, M. (2011). Compositional analysis and rheological characterization of gum tragacanth exudates from six species of Iranian Astragalus. *Food Hydrocolloids*, 25(7), 1775-1784. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.003>
- Bayod, E., Willers, E. P., & Tornberg, E. (2008). Rheological and structural characterization of tomato paste and its influence on the quality of ketchup. *LWT-Food Science and Technology*, 41(7), 1289-1300. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.08.011>
- Behrouzian, F., Razavi, S. M., & Alghooneh, A. (2017). Evaluation of interactions of biopolymers using dynamic rheological measurements: Effect of temperature and blend ratios. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(5). doi:<https://doi.org/10.1002/app.44414>
- Belović, M., Pajić-Lijaković, I., Torbica, A., Mastilović, J., & Pećinar, I. (2016). The influence of concentration and temperature on the viscoelastic properties of tomato pomace dispersions. *Food Hydrocolloids*, 61, 617-624. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.06.021>
- Botineștean, C., Gruia, A. T., & Jianu, I. (2015). Utilization of seeds from tomato processing wastes as raw material for oil production. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17(1), 118-124. doi:<https://doi.org/10.1007/s10163-014-0231-4>
- Casas, J. A., Mohamedano, A. F., & García-Ochoa, F. (2000). Viscosity of guar gum and xanthan/guar gum mixture solutions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(12), 1722-1727. doi:[https://doi.org/10.1002/1097-0010\(20000915\)80:12<1722::AID-JSFA708>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/1097-0010(20000915)80:12<1722::AID-JSFA708>3.0.CO;2-X)
- Del Valle, M., Cámara, M., & Torija, M. (2002, September). *Effect of pomace addition on tomato paste quality*. Paper presented at the VIII International Symposium on the Processing Tomato 613.
- do Nascimento, G. E., Simas-Tosin, F. F., Iacomini, M., Gorin, P. A. J., & Cordeiro, L. M. (2016). Rheological behavior of high methoxyl pectin from the pulp of tamarillo fruit (*Solanum betaceum*). *Carbohydrate Polymers*, 139, 125-130. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.11.067>
- Everett, D. W., & McLeod, R. E. (2005). Interactions of polysaccharide stabilisers with casein aggregates in stirred skim-milk yoghurt. *International Dairy Journal*, 15(11), 1175-1183. doi:<https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2004.12.004>
- Grassino, A. N., Brnčić, M., Vikić-Topić, D., Roca, S., Dent, M., & Brnčić, S. R. (2016). Ultrasound assisted extraction and characterization of pectin from tomato waste. *Food chemistry*, 198, 93-100. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.095>
- Herrera, P. G., Sánchez-Mata, M., & Cámara, M. (2010). Nutritional characterization of tomato fiber as a useful ingredient for food industry. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(4), 707-711. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2010.07.005>
- Hesarinejad, M. A., Koocheki, A., & Razavi, S. M. A. (2014). Dynamic rheological properties of *Lepidium perfoliatum* seed gum: Effect of concentration, temperature and heating/cooling rate. *Food Hydrocolloids*, 35, 583-589. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.07.017>
- Karataş, M., & Arslan, N. J. F. H. (2016). Flow behaviours of cellulose and carboxymethyl cellulose from grapefruit peel. 58, 235-245. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.02.035>
- Kaur, D., Wani, A. A., Oberoi, D., & Sogi, D. (2008). Effect of extraction conditions on lycopene extractions from tomato processing waste skin using response surface methodology. *Food chemistry*, 108(2), 711-718. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.11.002>
- Khiari, Z., Rico, D., Martin-Diana, A. B., & Barry-Ryan, C. (2017). Valorization of fish by-products: Rheological, textural and microstructural properties of mackerel skin gelatins. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19(1), 180-191. doi:<https://doi.org/10.1007/s10163-015-0399-2>
- Knoblich, M., Anderson, B., & Latshaw, D. (2005). Analyses of tomato peel and seed byproducts and their use as a source of carotenoids. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(7), 1166-1170. doi:<https://doi.org/10.1002/jsfa.2091>
- Koubala, B. B., Kansci, G., Garnier, C., Mbome, I. L., Durand, S., Thibault, J. F., & Ralet, M. C. (2009). Rheological and high gelling properties of mango (*Mangifera indica*) and ambarella (*Spondias cytherea*) peel pectins. *International journal of food science & technology*, 44(9), 1809-1817. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02003.x>

- Lapasin, R., & Pricl, S. (1995). The polysaccharides: sources and structures *Rheology of Industrial Polysaccharides: Theory and Applications* (pp. 1-133): Springer.
- Mahfouzi, M., Koocheki, A., & Razavi, S. (2017). Effect of freezing on functional properties of *Lepidium perfoliatum* seed gum. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 13(2), 24-250. doi:<https://doi.org/10.22067/iftstrj.v1395i0.49167> (in Persian)
- Majzoubi, M., Ghavi, F. S., Farahnaky, A., Jamalian, J., & Mesbahi, G. (2011). Effect of tomato pomace powder on the physicochemical properties of flat bread (Barbari bread). *Journal of Food Processing and Preservation*, 35(2), 247-256. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2009.00447.x>
- Mewis, J. (1979). Thixotropy-a general review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 6(1), 1-20. doi:[https://doi.org/10.1016/0377-0257\(79\)87001-9](https://doi.org/10.1016/0377-0257(79)87001-9)
- Motamedzadegan, A., Omidbakhsh Amiri, E., Jamshidi, M., & Khosravi Rad, T. (2018). Effect of concentration on the rheological and physicochemical properties of lemon juice. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 14(1), 119-131. doi:<https://doi.org/10.22067/iftstrj.v1396i0.59409> (in Persian)
- Moubarik, A. (2015). Rheology study of sugar cane bagasse lignin-added phenol-formaldehyde adhesives. *The Journal of Adhesion*, 91(5), 347-355. doi:<https://doi.org/10.1080/00218464.2014.903803>
- Niknam, R., Ghanbarzadeh, B., Ayaseh, A., & Rezagholi, F. (2018). The effects of *Plantago major* seed gum on steady and dynamic oscillatory shear rheology of sunflower oil-in-water emulsions. *Journal of Texture Studies*, 49(5), 536-547. doi:<https://doi.org/10.1111/jtxs.12352>
- Ouden, F. d., & Vliet, T. v. (2002). Effect of concentration on the rheology and serum separation of tomato suspensions. *Journal of Texture Studies*, 33(2), 91-104. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2002.tb01337.x>
- Rafe, A., Razavi, S. M., & Farhoosh, R. (2013). Rheology and microstructure of basil seed gum and β -lactoglobulin mixed gels. *Food Hydrocolloids*, 30(1), 134-142. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.05.016>
- Razi, S. M., Motamedzadegan, A., Shahidi, A., & Rashidinejad, A. (2018). The effect of basil seed gum (BSG) on the rheological and physicochemical properties of heat-induced egg albumin gels. *Food Hydrocolloids*, 82, 268-277. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.01.013>
- Rha, C.-K. (2012). *Theory, determination and control of physical properties of food materials* (Vol. 1): Springer Science & Business Media.
- Rigby, B. (1968). Amino-acid composition and thermal stability of the skin collagen of the Antarctic ice-fish. *Nature*, 219(5150), 166-167. doi:<https://doi.org/10.1038/219166a0>
- Savadkoobi, S., Hoogenkamp, H., Shamsi, K., & Farahnaky, A. (2014). Color, sensory and textural attributes of beef frankfurter, beef ham and meat-free sausage containing tomato pomace. *Meat science*, 97(4), 410-418. doi:<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.03.017>
- Schieber, A., Stintzing, F. C., & Carle, R. (2001). By-products of plant food processing as a source of functional compounds—recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, 12(11), 401-413. doi:[https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(02\)00012-2](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(02)00012-2)
- Shakiba, S., Khomeiri, M., Amiri, S., & Rezaei, R. (2017). Effect of xanthan gum and Ispharzeh and Basil seeds mucilage on the viscoelastic behavior of ketchup sauce. *Electronic Journal of Food Processing and Preservation*, 9(2), 85-100. doi:<https://doi.org/10.22069/EJFPP.2018.13445.1438> (in Persian)
- Sharma, S., LeMaguer, M., Liptay, A., & Poysa, V. (1996). Effect of composition on the rheological properties of tomato thin pulp. *Food research international*, 29(2), 175-179. doi:[https://doi.org/10.1016/0963-9969\(96\)00010-5](https://doi.org/10.1016/0963-9969(96)00010-5)
- Silva, Y., Borba, B., Reis, M., Caliani, M., & Ferreira, T. (2016, October). *Tomato industrial waste as potential source of nutrients*. Paper presented at the International Technical Symposium Food: The Tree That Sustains Life.
- Toor, R. K., & Savage, G. P. (2005). Antioxidant activity in different fractions of tomatoes. *Food research international*, 38(5), 487-494. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2004.10.016>
- Torbica, A., Belović, M., Mastilović, J., Kevrešan, Ž., Pestorić, M., Škrobot, D., & Hadnađev, T. D. (2016). Nutritional, rheological, and sensory evaluation of tomato ketchup with increased content of natural fibres made from fresh tomato pomace. *Food and bioproducts processing*, 98, 299-309. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.02.007>
- Westphal, A., Bauerfeind, J., Rohrer, C., & Böhm, V. (2014). Analytical characterisation of the seeds of two tomato varieties as a basis for recycling of waste materials in the food industry. *European Food Research and Technology*, 239(4), 613-620. doi:<https://doi.org/10.1007/s00217-014-2257-1>
- Yoo, Y. J., & Um, I. C. (2013). Examination of thermo-gelation behavior of HPMC and HEMC aqueous solutions using rheology. *Korea-Australia Rheology Journal*, 25(2), 67-75. doi:<https://doi.org/10.1007/s13367-013-0007-8>
- Yousefi, H., Azari, V., & Khazaeian, A. (2018). Direct mechanical production of wood nanofibers from raw wood microparticles with no chemical treatment. *Industrial crops and products*, 115, 26-31. doi:<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.020> (in Persian)

Investigation the Rheological Properties of Nanofiber Gel Prepared from Tomato Pomace as a Function of Concentration

Ali Motamedzadegan^{1*}, Hoda Fahim², Raziieh Razavi², Hossein Yousefi³

1- Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

* Corresponding author (amotgan@sanru.ac.ir)

2- PhD. Student, Department of Food Science and Technology, Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

3- Associate Professor, Department of Wood Technology and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Abstract

In the current study, the nanofiber gel of tomato pomace was prepared using a super disk grinder device available at Nano Novin Polymer Co., Iran. Three different concentrations (2, 4 and 6%) of the gel prepared and rheological tests including amplitude sweep, frequency sweep, temperature sweep, and flow behavior were done. DLS results showed that the average diameter of tomato nano-gel was around 38 nm. The power law model was chosen as the best model for describing flow behavior data. All samples showed a shear-thinning behavior that viscosity decreased with increasing shear rate. A hysteresis loop was observed in all samples which confirmed the thixotropic characteristic of gels. Based on amplitude sweep data, elastic modulus (G') was higher than viscous modulus (G''), in addition, crossover points of all gels showed that the flowability decreased with increasing concentrations. Based on frequency data, G' in all concentrations was higher than G'' and both parameters increased with increasing concentration from 2 to 6%. In lower frequencies, all gels showed solid-like behavior while G' and G'' increased with increasing frequency indicating the weakening of the gel network. G' and G'' gradually decreased with increasing temperature from 5 to 50 °C which confirmed that all gels were weakened at high temperatures, but in the cooling cycle, all gels recovered their structures and no remarkable hysteresis was observed.

Keywords: Amplitude sweep, Frequency sweep, Rheology, Temperature sweep, Tomato nanofiber gel