

Influence of *k*-Carrageenan on whey protein isolate cold-set emulsion filled gel: A rheological and mechanical study

Mohammad Reza Salahi^{1,2}, Seyed Mohammad Ali Razavi^{2,3*}, Mohebbat Mohebbi³

1- PhD Graduated, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Center of Excellence in Native Natural Hydrocolloids of Iran, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran

3- Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

* Corresponding author (s.razavi@um.ac.ir)

Introduction: Emulsion-filled gel is a sort of gel system that traps oil droplets as a filler and contains a wide range of semi-solid to solid food products. They can also be utilized as a dual system to distribute and control the release of both lipophilic and hydrophilic bioactive and micronutrient substances. The main polymers involved in gel formation in food products are proteins and polysaccharides. Using molecular interactions between biopolymers, a wide range of rheological and physicochemical properties of gels can be methodically created. As a result, the interaction between proteins and polysaccharides has received a lot of attention in order to generate novel products. Because of their functional qualities and high nutritional value, whey proteins are frequently used in the food industry. As a result, mixed gels based on whey protein have gained a lot of attention. *k*-Carrageenan is commonly utilized in the food industry as a gelling and firming agent. Because *k*-Carrageenan, like whey protein isolate, can form a gel independently, its interaction with whey protein isolate in emulsion gel systems appears appealing. Therefore, in this study, the effect of *k*-Carrageenan gum (0.0, 0.1, 0.3, 0.5, and 0.7%) on the textural (uniaxial compression test), rheological (steady shear, strain sweep, and frequency sweep tests), and water holding capacity of cold-set emulsion-filled gel based on whey protein isolate was investigated.

Materials and Methods: Whey protein isolate (WPI) (98.9% protein, dry basis) was given as a gift by Agropur Ingredients Co. (Le Sueur, Minnesota, USA). *k*-Carrageenan and CaCl₂ (m_w : 147.01 gr/mol) were purchased from Sigma Aldrich Co. (USA) and Merck Co. (Darmstadt, Germany), respectively. Sunflower oil was bought from a local supermarket. Stock dispersions of WPI and *k*-Carrageenan were made by dissolving sufficient amounts of their powders in deionized water. To prepare uniform oil in water emulsion, sunflower oil was added to the WPI dispersion and the obtained mixture homogenized first using a laboratory rotor-stator homogenizer (15000 rpm, 3 min), then by an ultrasonic homogenizer (20 kHz, 5 min). The prepared emulsion and *k*-Carrageenan dispersions were poured into Schott bottles and heated in a water bath (90 °C, 40 min). WPI emulsion and AG dispersion were mixed in a cylindrical container on a stirring plate at a speed of 600 rpm for 6-8 min to obtain a homogeneous mixture. After decreasing the temperature to 60 °C for the ion-induced gelation, the mixtures were charged with CaCl₂ (10 mM). The prepared samples were incubated in a refrigerator overnight to stabilize the 3D network. The final mixed EFG samples contained 5.5% WPI, 20% oil, and 0, 0.1, 0.3, 0.5, and 0.7% (w/w) of *k*-carrageenan. The tests performed on emulsion-filled gel samples were: 1) steady shear (0.01-10 s⁻¹), 2) strain sweep (strain: 0.1-1000%, frequency: 1 Hz), 3) frequency sweep (frequency: 0.1-100 Hz, strain: 0.5%), 4) uniaxial compression (target strain: 80%, deformation speed: 1 mm/s), and 5) water holding capacity (by utilizing a microcentrifuge, 600×g for 10 min).

Results and Discussion: According to the steady shear test, all samples had a shear thinning behavior, and based on the power-law model, this behavior was intensified in the presence of *k*-Carrageenan; and with increasing the gum concentration from 0 to 0.7%, the consistency coefficient increased from 339.9 to 545.7 Pa.s. In the strain sweep test, with the increase in the gum concentration, the values of the elastic and viscous modulus in the linear region and the modulus at the crossover point increased, and Tan δ_{LVE} decreased from 0.17 to 0.13, which indicated an increase in the strength of the emulsion gel network structure. Based on the frequency sweep test, with the increase in *k*-Carrageenan concentration, the parameters K' and K'' , network strength and network expansion,

respectively, increased from 5311.8 Pa, 939.9 Pa, 1.5380 Pa.s^{1/2} and 10.05 in the control sample to 25080 Pa, 3574.9 Pa, 16097.7 Pa.s^{1/2} and 16.41 in the sample containing 0.7% *k*-Carrageenan, respectively. Moreover, the frequency dependency of elastic modulus decreased from 0.095 in the control sample to 0.050 in the 0.7% *k*-Carrageenan contained sample. According to the large deformation test, in general, in the composite emulsion-filled gels, the values of apparent modulus of elasticity and fracture stress were higher and fracture strain and fracture energy were lower than in the control sample. Also, the results showed that different *k*-Carrageenan concentrations had no significant effect on the water holding capacity.

The obtained results showed that *k*-Carrageenan had considerable influence on the rheo-mechanical features of cold-set emulsion-filled gels based on whey protein which can add to the knowledge base for the production of new functional foods.

Keywords: Cold set emulsion filled gel, Whey protein, *k*-Carrageenan, Rheology, Texture

مجله علمی پژوهشی
فصلنامه علمی پژوهشی
علوم و صنایع غذایی

تأثیر کاپاکاراگینان بر ژل پر شده امولسیون سرد ایزوله پروتئین آب پنیر: یک مطالعه رئولوژیکی و

مکانیکی

محمد رضا صلاحی^۱، سید محمد علی رضوی^۲ و * محبت محبتی^۳

۱- دانش آموخته دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- قطب علمی هیدروکلئیدهای طبیعی بومی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

* نویسنده مسئول (s.razavi@um.ac.ir)

چکیده

در پژوهش حاضر، اثر صمغ کاپاکاراگینان (۰، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ درصد) بر ویژگی‌های مکانیکی (آزمون فشاری تک محور)، رئولوژیکی (آزمون های برشی پایه، کرنش متغیر و فرکانس متغیر) و ظرفیت نگهداری آب ژل سرد پر شده امولسیون مبتنی بر ایزوله پروتئین آب پنیر بررسی شد. طبق نتایج آزمون برشی پایه، تمامی نمونه‌ها دارای رفتار تضعیف شونده با برش بودند و بر اساس مدل قانون توان، در حضور کاپاکاراگینان این رفتار تشدید می‌شد؛ و با افزایش غلظت صمغ از صفر تا ۰/۷ درصد، مقدار ضریب قوام از ۳۳۹/۹ تا ۵۴۵/۷ پاسکال در ثانیه افزایش می‌یافت. در آزمون کرنش متغیر، با افزایش درصد صمغ مقادیر مدول الاستیک و ویسکوز در ناحیه خطی و مدول در نقطه متقاطع افزایش یافتند و $\tan \delta_{LVE}$ از ۰/۱۷ به ۰/۱۳ کاهش پیدا کرد که بیانگر افزایش استحکام ساختار شبکه ژل امولسیون بود. بر اساس آزمون فرکانس متغیر، با افزایش غلظت کاپاکاراگینان، پارامترهای K' و K'' ، قدرت شبکه و گسترش شبکه به ترتیب از ۵۳۱۱/۸ پاسکال، ۹۳۹/۹ پاسکال، ۵۳۸۰/۱ پاسکال در ثانیه و ۱۰/۰۵ در نمونه ژل امولسیون شاهد تا ۲۵۰۸۰/۶ پاسکال، ۳۵۷۴/۹ پاسکال، ۱۶۰۹۷/۷ پاسکال در ثانیه و ۱۶/۴۱ در نمونه حاوی ۰/۷ درصد کاراگینان افزایش یافتند. به طور کلی، در ژل‌های امولسیون مرکب، مقادیر مدول ظاهری الاستیسیته و تنش شکست بیشتر و کرنش شکست و انرژی شکست کمتر از نمونه شاهد بود. همچنین، نتایج نشان داد که غلظت‌های مختلف کاپاکاراگینان اثر معنی‌داری بر ظرفیت نگهداری آب نمونه‌های ژل امولسیون نداشت. نتایج این پژوهش می‌تواند به دانش تولید غذاهای کاربردی جدید مبتنی بر برهمکنش پروتئین-پلی ساکارید بیفزاید.

واژه‌های کلیدی: ژل سرد پر شده امولسیون، پروتئین آب پنیر، کاپاکاراگینان، رئولوژی، بافت

ژل پر شده امولسیون^۱ نوعی سیستم ژلی است که در آن قطرات روغن به عنوان پر کننده به دام افتاده‌اند و طیف گسترده‌ای از محصولات نیمه جامد تا جامد مانند ماست، سس، بستنی، پنیر و گوشت‌های فرآوری شده را در صنایع غذایی در بر می‌گیرند (Farjami and Madadlou, 2019; Liu et al., 2015). از نظر ترمودینامیکی، ژل‌های پر شده امولسیونی پایداری بالایی دارند و به دلیل اینکه هر دو مزیت ژل و امولسیون را با هم دارند، می‌توانند به عنوان یک سیستم دوگانه برای تحویل و کنترل رهایش هر دو طیف ترکیبات زیست فعال و ریز مغذی چربی دوست و آبدوست مانند پروبیوتیک‌ها، آنزیم‌ها، ویتامین‌ها، کاروتنوئیدها، آلفا توکوفرول و نیز ترکیبات آرومایی مورد استفاده قرار گیرند (Alavi et al., 2020; Bao et al., 2020; Chen et al., 2020; Lu et al., 2019; Maltai et al., 2010; Mao et al., 2018). پروتئین‌ها و پلی ساکاریدها پلیمرهای اصلی در تشکیل ژل در محصولات غذایی هستند. طیف وسیعی از خواص رئولوژیکی و فیزیکی شیمیایی ژل‌ها می‌تواند به طور سیستماتیک با استفاده از برهمکنش‌های مولکولی بین بیوپلیمرها توسعه یابد. از این رو، برهمکنش بین پروتئین‌ها و پلی ساکاریدها به منظور توسعه محصولات نوین بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Xiong et al., 2017). برهمکنش‌های بین پروتئین و پلی ساکارید به ویژگی‌های آنها (مانند وزن مولکولی و چگالی بار) و نیز شرایط محیطی (مانند pH، حضور یون‌ها و دما) بستگی دارد (Çakır and Behrouzian and Razavi, 2020). Foegeding, 2011 در تهیه ژل امولسیون‌ها معمولاً از پروتئین‌ها به دلیل داشتن هر دو خصوصیت امولسیفایری و ژل دهنده‌گی به عنوان پایه ساختار ژل و از پلی ساکاریدها برای بهبود خواص رئومکانیکی و فیزیکی شیمیایی استفاده می‌شود.

پروتئین‌های آب پنیر به دلیل خصوصیات عملکردی و ارزش غذایی بالا به طور گسترده در صنایع غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. لذا، ژل‌های ترکیبی مبتنی بر ایزوله پروتئین آب پنیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. ایزوله پروتئین آب پنیر به طور عمده از پروتئین‌های کروی شامل بتالاکتوگلوبولین (۵۰ درصد) و آلفاکاتالومین (۲۰ درصد) تشکیل شده است (Behrouzian and Razavi, 2020). به منظور تشکیل ساختارهای ژلی، مولکول‌های کروی پس از دناتوره شدن، متراکم شده و به یکدیگر متصل می‌شوند و بسته به شرایط محیطی ساختارهایی با ویژگی‌های بافتی متفاوتی ایجاد می‌کنند.

کاپاکاراگینان^۲ به طور گسترده به عنوان یک عامل ژل دهنده و سفت کننده ساختار در صنایع غذایی از جمله صنایع لبنیات مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که کاپاکاراگینان همانند ایزوله پروتئین آب پنیر قادر به تشکیل ژل به صورت مستقل است، لذا برهمکنش آن با ایزوله پروتئین

1- Emulsion-filled gel

2- *k*-Carrageenan

آب پنیر جذاب به نظر می‌رسد. پس از انجام فرآیند حرارتی و در مرحله سرد کردن، ژل شدن کاپاکاراگینان در یک فرآیند دو مرحله ای شامل انتقال کوپل ماریپیچی و سپس تجمع و تشکیل شبکه در حضور کاتیون‌ها رخ می‌دهد که خصوصیات فیزیکی ژل حاصل به غلظت پلیمر، نوع و غلظت کاتیون مورد استفاده و نیز سرعت سرد شدن محلول حرارت داده شده دارد (Çakir and Foegeding, 2011).

هنگامی که پروتئین‌ها و پلی ساکاریدها دو فاز بیوپلیمری را تشکیل می‌دهند، ژلاسیون معمولاً با ژل شدن فاز پروتئینی رخ می‌دهد. به طور کلی، ژل پروتئین‌ها با فرآیند حرارت تشکیل می‌شود که طی آن مولکول‌های پروتئین باز شده، به طور منظم متراکم شده و شبکه‌ای ایجاد می‌کنند که در نهایت منجر به ایجاد بافت ایده آلی در مواد غذایی می‌شود (Jiang et al., 2018). پروتئین‌های کروی می‌توانند از طریق روش گرم یا روش سرد^۲ به اشکال ژل‌های نرم تا جامد تبدیل شوند. در روش‌های گرم، فرآیند عملیاتی ساده‌تر است به طوری که پدیده‌های دناتوره شدن، تجمع و ژل شدن به طور هم‌زمان در طول عملیات حرارتی رخ می‌دهند. اما تشکیل ژل به روش سرد در دو مرحله انجام می‌شود: در مرحله اول، محلول پروتئینی تحت فرآیند حرارتی قرار می‌گیرد تا مولکول‌های پروتئین دناتوره شده، به توده‌های محلول تبدیل شوند. در واقع در این مرحله، تشکیل توده‌های محلول پس از فرآیند حرارتی برای ژل‌سازی به روش سرد بسیار ضروری است. پس از سرد کردن محلول پروتئینی حرارت داده شده در ژل‌سازی به روش سرد، تشکیل ژل با اضافه کردن نمک‌هایی مانند NaCl و CaCl₂ (ژل شدن سرد ناشی از نمک)، یا با اضافه کردن اسیدی کننده‌هایی مانند گلوکونو دلتا لاکتون (ژل شدن سرد ناشی از اسید)، یا با اضافه کردن آنزیمی مانند ترانس گلوتامیناز (ژل شدن سرد ناشی از آنزیم) و یا استفاده از مخلوطی از این عوامل انجام می‌گیرد (Salahi et al., 2022a). روش‌های سرد نسبت به روش‌های گرم مزایای بیشتری دارند به عنوان مثال، روش‌های سرد می‌توانند از اجزای غذایی حساس به حرارت مانند ویتامین B₁ و پروبیوتیک‌ها محافظت کنند. همچنین کنترل بیشتری روی شکل نهایی، ساختار و بافت ژل وجود دارد (Kazemi-Taskooh and Varidi, 2021).

هدف از انجام این پژوهش، ایجاد درک بهتر در مورد ساختار ژل‌های پر شده امولسیون مرکب تهیه شده به روش سرد حاصل از مخلوط ایزوله پروتئین آب پنیر و پلی ساکارید کاپاکاراگینان بر اساس آزمون‌های مکانیکی، رئولوژیکی و فیزیکوشیمیایی است.



۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

ایزوله پروتئین آب پنیر از شرکت آگروپور (Le Sueur, Minnesota, USA) تهیه شد که طبق آنالیز ارائه شده توسط شرکت متشکل از ۹۸/۹٪ پروتئین (بر مبنای وزن خشک)، ۰/۳٪ چربی، ۱/۷٪ خاکستر و ۴/۶٪ رطوبت با مقدار pH=۶/۹ (محلول ۱۰٪) بود (شماره سری ساخت: ۴۲۰-۱۹-۰۶۰ JE). روغن آفتابگردان (ساخت شرکت اویلا) از یک سوپر مارکت تهیه و به طور مستقیم و بدون انجام فرآیندهای خالص‌سازی مورد

1- Heat-set
2- Cold-set

استفاده قرار گرفت. صمغ کاپاکاراگینان از شرکت سیگما آلدْرِیج (آمریکا)، تهیه شد. نمک کلسیم کلرید دهیدراته ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، با وزن مولکولی $147/01 \text{ gr/mol}$ نیز از شرکت مرک (Darmstadt, Germany) خریداری شد.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

۲-۳- تهیه محلول صمغ

به منظور تهیه دیسپرسیون‌های صمغ کاپاکاراگینان، مقادیر لازم از پودر صمغ به آرامی همراه با مخلوط کردن توسط همزن مغناطیسی به آب دیونیزه اضافه شدند. عمل هم زدن با سرعت 300 دور بر دقیقه و تا زمان تکمیل فرآیند انحلال و جذب آب توسط صمغ در دمای محیط ادامه داشت. پس از آن محلول صمغ به مدت $18-24$ ساعت جهت انجام هیدراتاسیون کامل مولکول‌های صمغ در دمای یخچال (4 درجه سانتی‌گراد) نگهداری شدند. صمغ کاپاکاراگینان بر اساس ایجاد غلظت‌های $0/1$ ، $0/3$ ، $0/5$ و $0/7$ درصد در نمونه‌های ژل‌های پر شده امولسیون‌ی تهیه شدند.

۲-۴- تهیه امولسیون ایزوله پروتئین آب پنیر

در ابتدا ایزوله پروتئین آب پنیر به آرامی حین هم زدن به آب دیونیزه اضافه شد. به منظور هیدراتاسیون کامل پروتئین‌ها، دیسپرسیون به مدت 2 ساعت و با سرعت 300 دور بر دقیقه توسط همزن مغناطیسی در دمای محیط هم زده شد. سپس، مقدار مناسبی از روغن آفتابگردان برای ایجاد غلظت 20 درصد وزنی-وزنی در فرمولاسیون نهایی، به دیسپرسیون ایزوله پروتئین آب پنیر اضافه شد و مخلوط حاصل به مدت 1 ساعت دیگر هم زده شد. به منظور هموژنیزه کردن مخلوط حاصل، از دستگاه همگن‌ساز التراتوراکس (مدل IKA، آلمان) با سرعت 15000 دور بر دقیقه به مدت 3 دقیقه و در دمای محیط استفاده شد. در ادامه، به منظور یکنواختی بیشتر امولسیون، از دستگاه اولتراسونیک (مدل 400-UHP ، 20 kHz)، ساخت شرکت توسعه فناوری مافوق صوت، ایران) مجهز به یک پروب استوانه‌ای از جنس تیتانیوم و با قطر 13 میلی‌متر استفاده شد. پروب دستگاه به اندازه 2 سانتی‌متر در داخل نمونه‌ها فرو برده شد و عمل هموژنیزاسیون به مدت 5 دقیقه و به صورت پالسی (20 ثانیه روشن، 10 ثانیه خاموش) انجام شد. با استفاده از یک حمام آب سرد، دمای نمونه‌ها طی فرآیند سونیکاسیون در محدوده $25-30$ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته شد.

۲-۵- تهیه نمونه‌های ژل‌های پر شده امولسیون

امولسیون‌های تهیه شده درون بطری‌های شیشه‌ای ریخته شده و درون حمام آب داغ به مدت 40 دقیقه در دمای 90 درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند. برای صمغ کاپاکاراگینان نیز فرآیند حرارتی مشابهی انجام گرفت. بلافاصله پس از انجام فرآیند حرارتی، صمغ کاپاکاراگینان با امولسیون حرارت دیده درون ظروف پلاستیکی با قطر داخلی 55 میلی‌متر مخلوط شده و روی همزن مغناطیسی با سرعت 600 rpm برای ایجاد یک مخلوط یکنواخت هم زده شدند. پس از کاهش دمای مخلوط به $55-60$ درجه سانتی‌گراد، به منظور تشکیل ژل، مقدار مناسبی از محلول 5 درصد از نمک

CaCl₂ تهیه شده برای ایجاد غلظت ۱۰ میلی مولار در فرمولاسیون نهایی به سیستم اضافه شد و سپس به منظور پخش یکنواخت نمک در نمونه های ژل، عمل هم زدن به مدت ۲ دقیقه و با سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه انجام شد. در پایان، به منظور تکمیل تشکیل ساختار ژل، نمونه ها به مدت یک شب در یخچال با دمای ۴ درجه سانتی گراد نگهداری شدند. در پایان این بخش ۵ نمونه ژل امولسیون شامل یک نمونه ژل امولسیون شاهد حاوی ۵/۵ درصد از ایزوله پروتئین آب پنیر و ۲۰ درصد از روغن به همراه نمونه های ژل امولسیون مرکب حاوی کاپاکاراگینان با غلظت های ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ درصد تهیه شدند. قبل از انجام ارزیابی های خصوصیات ژل های امولسیونی تهیه شده، نمونه ها جهت رسیدن به دمای محیط به مدت یک ساعت در دمای ۲۲-۲۰ درجه سانتی گراد نگهداری شدند.

۶-۲-آزمون ها

۱-۶-۲-آزمون های رئولوژیکی

برای ارزیابی خواص رئولوژی نمونه ها از دستگاه رئومتر پارافیزیکا (مدل ۳۰۱ MCR، شرکت Anton Paar) مجهز به پروب صفحه موازی با قطر ۵۰ میلی متر و اندازه گپ ۲۰۰۰ میکرومتر استفاده شد. تمامی آزمون ها در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد انجام شد. برای کنترل دما از سیستم Peltier (Viscotherm VT2) مجهز به سیرکولاتور سیال با دقت ۰/۰۱ درجه سانتی گراد استفاده شد. برای ایجاد تعادل دمایی، قبل از شروع آزمون ها، نمونه ها به مدت ۳-۵ دقیقه در این دما قرار داشتند. داده های حاصل از آزمون های رئولوژیکی توسط نرم افزار رئوپلاس نسخه ۳/۴۰ ثبت شدند. همچنین برای برازش داده ها از نرم افزار متلب نسخه ۲۰۱۷b استفاده شد.

۱-۶-۲-۱-آزمون رئولوژیکی برشی پایا

اثر درجه برش بر رفتار رئولوژیکی نمونه ها در دامنه s^{-1} ۱۰-۰/۱ مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور توصیف کمی خصوصیات رئولوژیکی پایا در نمونه های ژل امولسیون از مدل قانون توان^۱ (معادله ۱) استفاده شد:

$$\eta_a = k\dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (1)$$

که در این مدل η_a نشان دهنده ویسکوزیته ظاهری (Pa.s)، k نشان دهنده ضریب قوام (Pa.sⁿ)، $\dot{\gamma}$ نشان دهنده درجه برش (s^{-1}) و n نشان دهنده شاخص رفتار جریان (بدون واحد) هستند (Salahi et al., 2022b):

۲-۶-۲-۱-۲-آزمون های رئولوژیکی برشی دینامیک نوسان کم^۲

۱-۲-۶-۲-۱-۲-آزمون کرنش متغیر

1- Power-law
2- Small amplitude oscillatory shear

در این پژوهش با استفاده از آزمون کرنش متغیر در دامنه کرنش ۰/۱-۱۰۰۰ درصد خصوصیات ویسکوالاستیک نمونه‌های ژل‌های پر شده امولسیون در میزان فرکانس ثابت ۱ Hz مورد ارزیابی قرار گرفت. پارامترهای مورد بررسی حاصل از این آزمون شامل مدول الاستیک (G'_{LVE}, Pa)، مدول ویسکوز (G''_{LVE}, Pa)، مقدار تانژانت اتلاف ($Tan \delta_{LVE}$)، ناحیه کرنش خطی (γ_L ، درصد)، مقدار کرنش در نقطه جریان (γ_{FR} ، درصد)، تنش در نقطه جریان (τ_{FP}, Pa)، و مدول متناظر آن ($G_F: G' = G'', Pa$) بودند (Behrouzian and Razavi, 2020; Razi et al., 2018). همچنین، پارامترهای تنش شکست و کرنش شکست توسط آزمون کرنش متغیر تعیین شد. برای این منظور، ابتدا داده‌های مدول الاستیک در کرنش نوسانی ضرب شده و مقدار به دست آمده در برابر کرنش نوسانی رسم شد. نقطه بیشینه این نمودار نشان دهنده نقطه شکست است به طوری که از مؤلفه محور عمودی جهت تعیین تنش شکست (Pa) و از محور افقی این نقطه برای تعیین کرنش شکست (درصد) استفاده شد (Alghooneh, 2019).

۲-۲-۱-۲-۲ آزمون فرکانس متغیر

برای ارزیابی طیف مکانیکی نمونه‌های ژل امولسیون، آزمون فرکانس متغیر در دامنه فرکانس ۰/۱ تا ۱۰۰ هرتز و در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی‌گراد در ناحیه ویسکوالاستیک خطی^۱ (LVE) و تحت کرنش ثابت ۰/۵ درصد انجام شد. به منظور ارزیابی میزان وابستگی به فرکانس مدول‌های الاستیک و ویسکوز ژل‌های امولسیونی از مدل توانی (معادله‌های ۲ و ۳) استفاده شده است:

$$G' = K' \times \omega^{n'} \quad (۲)$$

$$G'' = K'' \times \omega^{n''} \quad (۳)$$

که در این معادله‌ها، $K' (Pa.s^n)$ و $K'' (Pa.s^n)$ به ترتیب عرض از مبدأ منحنی لگاریتمی مدول الاستیک و ویسکوز در برابر فرکانس زاویه‌ای را نشان می‌دهند که به ترتیب نشان دهنده سفتی شبکه و ضریب قوام ژل‌های امولسیونی هستند. همچنین، پارامترهای n' و n'' به ترتیب نشان دهنده میزان وابستگی مدول الاستیک و مدول ویسکوز به فرکانس هستند. مقدار K''/K' (بدون بعد) نمونه‌های ژل امولسیون نیز مورد بررسی قرار گرفت. این پارامتر مقدار متوسط تانژانت اتلاف را در طول بازه فرکانسی مورد مطالعه نشان می‌دهد که برای محاسبه نسبت جزء ویسکوز به جزء الاستیک در یک سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

علاوه بر این، به منظور تعیین قدرت ژل‌های امولسیونی تهیه شده، مقادیر مدول کمپلکس در برابر فرکانس به وسیله معادله ۴ برازش داده شدند:

$$G^* = \sqrt{G'^2 + G''^2} = A \times \omega^{1/z} \quad (۴)$$

که در این معادله، G^* بیانگر ویسکوزیته کمپلکس (Pa)، A توصیف کننده قدرت شبکه ($Pa.s^{1/z}$) و مقدار z نشان دهنده تعداد اتصالات (بدون بعد) هستند (Khubber et al., 2021).

۲-۶-۲- ارزیابی خواص مکانیکی بافتی ژل‌های امولسیون

آزمون فشاری تک محوره نمونه‌های ژل امولسیون توسط دستگاه آنالیز بافت (مدل CNS Farnell Com, UK) و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در این آزمون از پروب استوانه‌ای مدل TA25/1000 با قطر ۵۰ میلی‌متر استفاده شد. سرعت حرکت پروب در هر دو مرحله بارگذاری و باربرداری برابر با ۱ میلی‌متر بر ثانیه بود. میزان بار شروع^۱ ثبت داده‌ها ۰/۰۵ نیوتن بود. نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت قبل از انجام آزمون درون انکوباتور یخچال‌دار برای رسیدن به دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. در ادامه، نمونه‌های ژل امولسیون به شکل استوانه و با ابعاد ۲۰ در ۲۰ میلی‌متر تهیه شدند. نمونه‌ها تا میزان کرنش ۸۰ درصد طبق شرایط بیان شده تحت فشار قرار گرفتند. برای ارزیابی پارامترهای بافتی از نرم افزار Brookfield TexturePro CT v1.0 استفاده شد. آزمون بافتی حداقل در سه تکرار و روی نمونه‌های تهیه شده در روزهای مختلف انجام شد. پارامترهای مورد بررسی عبارت بودند:

تنش شکست واقعی^۲: مقدار تنش در اولین انحناء مشاهده شده در نمودار تنش شکست واقعی-کرنش شکست واقعی که نشان دهنده ایجاد یک شکست مشخص در ساختار است.

کرنش شکست واقعی^۳: مقدار کرنش در اولین انحناء مشاهده شده در نمودار تنش شکست واقعی-کرنش شکست واقعی که نشان دهنده ایجاد یک شکست مشخص در ساختار است.

انرژی شکست: مساحت زیر منحنی تنش شکست-کرنش شکست تا نقطه شکست. و

مدول ظاهری الاستیسیته^۴: شیب ناحیه خطی محاسبه شده در نمودار تنش شکست واقعی-کرنش شکست واقعی تا مقدار کرنش واقعی ۱۵ درصد.

۲-۶-۳- ظرفیت نگهداری آب^۵

برای این منظور از دستگاه میکروسانتریفیوژ مطابق با روش **Urbonaite و همکاران (۲۰۱۴)** با کمی تغییر استفاده شد. ژل‌های امولسیونی با استفاده از چوب پنبه سوراخ کن با ابعاد ۱۰ میلی‌متر ارتفاع و ۴/۸ میلی‌متر قطر برش داده شدند. سپس با استفاده از میکرواسپاتول، نمونه‌ها درون میکروتیوب‌های فیلتر دار ۲ میلی‌لیتری قرار داده شدند. این میکروتیوب‌ها درون تیوب‌های دیگری قرار گرفتند تا سرم رهاش یافته از ساختار ژل که از فیلتر عبور می‌کند در طی عمل سانتریفیوژ درون آن جمع آوری شود. عمل سانتریفیوژ با سرعت ۶۰۰ g به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. پس از انجام عمل سانتریفیوژ، مایع زهکشی شده از تیوب داخلی به تیوب خارجی منتقل شده و تفاوت وزن بین تیوب خارجی قبل و بعد از سانتریفیوژ مطابق فرمول ۵ برای محاسبه میزان سرم رهاش یافته از ساختار ژل امولسیون مورد استفاده قرار گرفت:

- 1- Trigger load
- 2- True fracture stress
- 3- True fracture strain
- 4- Apparent modulus of elasticity
- 5- Water holding capacity

$$\text{ظرفیت نگهداری آب (\%)} = \frac{W_T - W_g}{W_T} \times 100 \quad (5)$$

که در این معادله، W_T مقدار آب در نمونه‌های ژل امولسیون قبل از انجام سانتریفیوژ (برحسب گرم) و W_g مقدار آب خارج شده از نمونه‌ها طی انجام عمل سانتریفیوژ است. میزان آب موجود در ژل‌های امولسیونی با خشک کردن نمونه‌ها در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ ساعت در آون تعیین شد. ظرفیت نگهداری آب برای دو نمونه از هر تیمار در دو روز مختلف انجام شد و هر نمونه تهیه شده سه بار مورد تکرار قرار گرفت (۶ تکرار برای هر تیمار).

۲-۷- آنالیز آماری

تجزیه و تحلیل آماری داده‌های مربوط به ویژگی‌های رئومکانیکی و ظرفیت نگهداری آب ژل‌های پر شده امولسیونی به صورت آنالیز واریانس یک‌طرفه (one-way ANOVA) در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P < 0.05$) با استفاده از نرم افزار Minitab نسخه ۱۸ انجام شد. همچنین، برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون Tukey استفاده شد. برازش داده‌ها با نرم افزار Matlab نسخه ۲۰۱۷b و رسم نمودارها با نرم افزار Excel نسخه ۲۰۱۹ انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمون تنش برشی پایا

رفتار جریان نمونه‌های ژل امولسیون ایزوله پروتئین آب پنیر به عنوان تابعی از غلظت کاپا کاراگینان در بازه درجه برشی $10^{-1} - 0.1$ در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است در تمامی نمونه‌ها، با افزایش درجه برش ویسکوزیته ظاهری کاهش یافته که نشانگر رفتار غیر نیوتنی تضعیف شونده با برش آنها است. رفتار تضعیف شونده با برش بیانگر آن است که در این بازه از درجه برش سرعت تشکیل پیوندهای بین مولکولی از سرعت تخریب آنها کمتر است. این نوع رفتار برای اکثر محلول‌های هیدروکلوئیدی قابل مشاهده است که ناشی از وزن مولکولی بالا و درگیری‌ها و تجمعات پلیمری است. رفتار تضعیف شونده با برش برای هیدروکلوئیدهای آگار، کاراگینان و پکتین (Alghooneh, Marcotte et al., 2001:2019)، گزارش شده است.

به منظور تعیین خصوصیات جریان نمونه‌های ژل امولسیون، مدل‌های مختلفی از جمله قانون توان، هرشل بالکلی^۱، کراس^۲، کاریو^۳ و سیسکو^۴ روی داده‌های رفتار جریان پایا مورد برازش قرار گرفتند. اما همان‌طور که در شکل ۱ قابل مشاهده است داده‌ها در ناحیه قانون توان قرار دارند لذا

-
- 1- Herschel-Bulkley
 - 2- Cross
 - 3- Carreau
 - 4- Sisko

قابل پیش‌بینی بود که مدول قانون توان به عنوان بهترین گزینه برای انجام برآزش باشد. بر اساس این مدل، میزان ضریب قوام (k) در نمونه شاهد برابر با $339/9 \text{ Pa.s}^n$ بود (جدول ۱). نتایج نشان داد با افزایش غلظت کاپاکاراگینان، مقدار k در نمونه‌های ژل امولسیون افزایش یافته و در محدوده $468/4 - 545/7 \text{ Pa.s}^n$ قرار داشت. ظرفیت زنجیره‌های پلیمری برای تشکیل ساختارهای سه‌بعدی می‌تواند دلیل افزایش ویسکوزیته ظاهری ژل امولسیون ایزوله پروتئین آب پنیر در حضور پلی ساکاریدها باشد.

مقدار شاخص رفتار جریان (n) در نمونه شاهد بر اساس مدل قانون توان برابر با $0/064$ بود. مقدار پارامتر n در نمونه‌های حاوی صمغ کاپاکاراگینان کمتر از نمونه شاهد بوده در محدوده $0/038 - 0/019$ قرار داشت. این نتایج نشان دهنده رفتار بسیار تضعیف شونده با برش نمونه‌های ژل امولسیون تهیه شده است. پارامتر n شدت تغییرات ویسکوزیته را در برابر درجه برش نشان می‌دهد. مقادیر پایین به دست آمده برای n با توجه به تغییرات زیاد ویسکوزیته ظاهری در برابر تغییرات کم درجه برش قابل توجیه است. به عنوان مثال، در نمونه شاهد مقدار ویسکوزیته از حدود 25000 Pa.s در درجه برش 1 s^{-1} به حدود $12/5 \text{ Pa.s}$ در درجه برش 10^5 s^{-1} کاهش پیدا می‌کند، یعنی در این بازه محدود از درجه برش، مقدار ویسکوزیته ظاهری حدود 2000 مرتبه کاهش پیدا کرده است. به طور مشابه، Liu و همکاران (2022) گزارش کردند که ژل‌های امولسیونی حاصل از ایزوله پروتئین آب پنیر-آلژینات سدیم که با استفاده از روش امولسیون لایه به لایه تشکیل شده بودند، بسیار به درجه برش حساس بوده و ویسکوزیته ظاهری با افزایش درجه برش به شدت کاهش پیدا می‌کرد به طوری که مقدار آن از حدود 86000 Pa.s در درجه برش 1 s^{-1} به کمتر از 1000 Pa.s در درجه برش 10^5 s^{-1} می‌رسید. همچنین، مقدار n مشابهی ($0/019$) برای پروتئین‌های فیبریل شده سفیده تخم‌مرغ که از حرارت دادن محلول پروتئینی در شرایط اسیدی با زمان آنکوباسیون ۴۸ ساعت تشکیل شده بود، گزارش شده است (Alavi et al., 2020).

(شکل ۱)

(جدول ۱)

۲-۳- کرنش متغیر

نمودارهای کرنش متغیر به دست آمده نمونه‌های ژل امولسیون به عنوان تابعی از غلظت کاپاکاراگینان در شکل ۲ و نتایج پارامترهای حاصل از این آزمون در جدول ۲ ارائه شده‌اند. طبق نتایج به دست آمده، در آزمون کرنش متغیر می‌توان دو ناحیه را از یکدیگر جدا کرد: (۱) یک ناحیه LVE که در آن G' و G'' تقریباً موازی یکدیگر هستند و مقادیر ثابتی دارند و مقدار G' در این بخش در تمامی نمونه‌ها بالاتر از مقدار G'' است که نشان دهنده رفتار جامد-مانند در نمونه‌ها در مقیاس زمانی 1 Hz است؛ (۲) یک ناحیه غیر خطی که در این بخش مقادیر G' و G'' با افزایش کرنش روند کاهشی پیدا کرده و در نقطه‌ای یکدیگر را قطع می‌کنند و پس از این نقطه مقادیر G'' بالاتر از مقادیر G' می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، مدول ویسکوز بعد از ناحیه خطی در ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند و بنابراین، رفتار نمونه‌ها از نوع جهش ضعیف

با کرنش^۱ است که این رفتار نشان دهنده پیچیدگی ساختاری بالای نمونه‌ها است (Hyun et al., 2002). انجام آزمون‌ها در ناحیه LVE یکنواختی ساختاری نمونه‌ها را تضمین می‌کند و پارامترهای ویسکوالاستیکی به دست آمده در این ناحیه نشان دهنده خواص واقعی نمونه‌ها هستند که می‌تواند برای کنترل کیفیت محصولات غذایی مفید باشد (Moreno et al., 2020).

مقادیر G'_{LVE} و G''_{LVE} در نمونه ژل امولسیون شاهد به ترتیب برابر با $4438/3$ و $751/4$ Pa بود. در تمامی نمونه‌های ژل امولسیون مرکب، مقدار پارامترهای G'_{LVE} و G''_{LVE} بالاتر از نمونه شاهد بوده و با افزایش غلظت صمغ افزایش پیدا می‌کردند و بیشترین مقدار این پارامترها در نمونه حاوی $0/7$ درصد از کاپاکاراگینان به ترتیب برابر با $15883/5$ و $2066/7$ پاسکال بود. این نتایج بیانگر تقویت رفتار شبه جامدی شبکه ژلی ایزوله پروتئین آب پنیر در حضور پلی ساکارید کاپاکاراگینان در مقیاس زمانی ۱ هرترز است.

پارامتر $Tan \delta_{LVE}$ ، که به صورت نسبت G''_{LVE} به G'_{LVE} تعریف می‌شود، بیانگر رفتار فیزیکی نمونه‌ها است. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، مقادیر $0/1 < Tan \delta_{LVE} < 1$ است که بیانگر آن است که نمونه‌ها ژل واقعی نیستند و ساختاری بین بیوپلیمر با غلظت بالا و ژل واقعی^۲ دارند (وجود ساختار الاستیک در ژل بیوپلیمر ضعیف). مقدار $Tan \delta_{LVE}$ در نمونه شاهد برابر با $0/17$ بوده و اضافه کردن صمغ کاپاکاراگینان به طور معنی‌داری مقدار این پارامتر را کاهش می‌دهد و به مقدار $0/13$ در غلظت $0/7$ درصد از این صمغ می‌رسد که نشان دهنده آن است که با افزایش غلظت کاپاکاراگینان، نمونه‌ها به سمت تشکیل ساختار ژل واقعی حرکت می‌کنند ($Tan \delta_{LVE} < 0/1$). مقدار $Tan \delta_{LVE}$ برای صمغ کاپاکاراگینان، در غلظت 1% و در دمای 25 درجه سانتی‌گراد برابر با $0/07$ گزارش شده است (Alghooneh, 2019).

پارامتر γ_L بیانگر طول ناحیه ویسکوالاستیک خطی است و حداکثر کرنشی را نشان می‌دهد که پس از آن مدول الاستیک شروع به کاهش می‌کند. همان‌طور که در جدول ۲ مشخص است، بالاترین مقدار γ_L در نمونه شاهد مشاهده شد ($2/53$ درصد). در حضور کاپاکاراگینان مقدار γ_L کاهش پیدا کرد و با افزایش درصد صمغ شدت کاهش مقدار γ_L مشهودتر بود به طوری که کمترین مقدار γ_L در نمونه ژل امولسیون حاوی $0/7$ درصد کاپاکاراگینان مشاهده شد ($0/86$ درصد). این رفتار نشان می‌دهد که در حضور صمغ کاپاکاراگینان، ساختار ژل امولسیون ایزوله پروتئین آب پنیر نسبت به کرنش در تغییر شکل‌های کوچک‌تر شکننده‌تر می‌شود (Behrouzian and Razavi, 2020). همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، در تمامی نمونه‌ها، مدول‌های الاستیک و ویسکوز به وضوح در ناحیه غیر خطی کاهش پیدا کرده و در نقطه‌ای با یکدیگر تلاقی پیدا می‌کنند. مقدار مدول در نقطه تقاطع (G_f) می‌تواند به عنوان یک شاخص خوب برای توصیف استحکام یک سازه در نقطه شروع جریان مورد استفاده قرار بگیرد (Alghooneh, 2019). مقدار پارامتر G_f با افزایش غلظت کاپاکاراگینان افزایش پیدا کرده و از مقدار $1053/40$ پاسکال در نمونه شاهد به مقدار $2790/08$ در ژل امولسیون مرکب حاوی $0/7$ درصد از صمغ می‌رسید.

1- Weak strain overshoot
2- True gel

پارامتر τ_F بیانگر میزان تنش در نقطه تقاطع است و لذا حداکثر مقاومت سازه را در مقابل تخریب و وقوع جریان نشان می‌دهد (Sun and Gunasekaran, 2009). مقدار این پارامتر در تمامی ژل‌های امولسیون‌ی مرکب بالاتر از مقدار آن در نمونه شاهد بوده (۳۲۷/۷۶ Pa) بوده و بیشترین مقدار آن در نمونه حاوی ۰/۵ درصد از کاپاکاراگینان مشاهده شد (۴۷۵/۸۲). مقدار کرنش در نقطه جریان (γ_F) نیز مورد محاسبه قرار گرفت. در نمونه ژل امولسیون شاهد γ_F برابر با ۲۲/۰۸ درصد بوده و مقدار آن در ژل‌های امولسیون‌ی مرکب تحت تأثیر غلظت پلی ساکارید قرار داشته به طوری که غلظت ۰/۷ درصد کاپاکاراگینان سبب کاهش چشمگیر مقدار این پارامتر شده (۹/۷۳ درصد) که بیانگر تردی بالای این نمونه است.

(شکل ۲)

(جدول ۲)

۳-۳- فرکانس متغیر

آزمون فرکانس متغیر واکنش ماده به یک تغییر شکل ثابت در بازه‌های زمانی مختلف را نشان می‌دهد. نمودارهای فرکانس متغیر نمونه‌های ژل امولسیون در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، در تمامی دامنه فرکانس اعمال شده، مقدار مدول الاستیک بزرگ‌تر از مدول ویسکوز بوده و نمودارهای آنها کاملاً با یکدیگر موازی هستند و در هیچ نقطه‌ای همدیگر را قطع نکرده و نیز وابستگی اندکی به فرکانس از خود نشان می‌دهند. این نتایج تأیید کننده شبکه سه‌بعدی و جامد گونه نمونه‌های ژل امولسیون بوده که حتی در مقادیر بالای فرکانس نیز پایدار است. پارامترهای حاصل از برازش بر داده‌های مدول الاستیک (n' , K') و مدول ویسکوز (n'' , K'') با استفاده از معادله قانون توان در جدول ۴ ارائه شده است. مقادیر بالای R^2 (۰/۹۹ - ۰/۸۶) به دست آمده از این برازش‌ها بیانگر مناسب بودن مدل قانون توان برای پیش‌بینی میزان وابستگی به فرکانس مدول‌های الاستیک و ویسکوز است. نتایج نشان داد که غلظت کاپاکاراگینان اثر بسیار معنی‌داری بر پارامترهای K' و K'' دارد. مقادیر K' و K'' به دست آمده در نمونه شاهد به ترتیب برابر با ۵۳۱۱/۸ و ۹۳۹/۹ Pa بودند. در نمونه‌های ژل امولسیون حاوی پلی کاپاکاراگینان، با افزایش غلظت صمغ از ۰/۱ تا ۰/۷ درصد، مقدار پارامترهای K' و K'' به طور مستقیم افزایش پیدا کرده و به ترتیب در محدوده‌های ۱۵۹۳۹/۴ - ۸۷۶۲/۲ پاسکال و ۲۳۸۸/۷ - ۱۶۲۶/۶ پاسکال قرار داشتند. افزایش مقادیر K' و K'' در حضور کاپاکاراگینان بیانگر افزایش استحکام سیستم ژل امولسیون ایزوله پروتئین آب پنی‌ر به دلیل توانایی این پلی ساکارید در تشکیل شبکه‌های سه‌بعدی قدرتمند است.

پارامترهای n' و n'' می‌توانند برای مشخص کردن خواص ویسکوالاستیک نمونه‌ها مورد بررسی قرار بگیرند به طوری که در ژل‌های کاملاً الاستیک که وابستگی به فرکانس از خود نشان نمی‌دهند، مقدار پارامترهای n' و n'' برابر با صفر است، در حالی که مقادیر n' و n'' بالاتر از صفر نشان دهنده آن است که ژل‌ها به فرکانس وابسته بوده و خاصیت الاستیک کمتری دارند (Razi et al., 2018; Salahi et al., 2022b). طبق جدول ۴، مقدار پارامترهای n' و n'' به ترتیب در محدوده‌های ۰/۰۹۵ - ۰/۰۵۰ و ۰/۱۱۶ - ۰/۰۹۰ متغیر و نزدیک به مقدار مربوط به ژل حقیقی (صفر) بودند. این مقادیر نشان می‌دهد که مدول الاستیک نمونه‌ها تقریباً مستقل از فرکانس است که نشان دهنده

الاستیسیته و قدرت بالای ساختار ژل‌های امولسیون تهیه شده است. این عدم وابستگی با افزایش غلظت کاپاکاراگینان تقویت شد به طوری که کمترین مقدار پارامترهای n' و n'' در نمونه ژل امولسیون حاوی ۰/۷ درصد از این صمغ ثبت شد. مقدار n' در تمامی نمونه‌های ژل امولسیون تهیه شده کمتر از n'' است. این بدان معنی است که با کاهش فرکانس، سرعت کاهش در مقدار K' کمتر از سرعت کاهش در مقدار K'' است (مورنو و همکاران، ۲۰۲۰). مقادیر n' و n'' گزارش شده برای صمغ کاپاکاراگینان در غلظت ۱ درصد و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر با ۰/۰۵، و ۰/۰۸ بودند (Alghooneh, 2019).

نسبت پارامتر K'' به پارامتر K' (K''/K') نیز می‌تواند برای ارزیابی قدرت ژل‌ها مورد استفاده قرار بگیرد به طوری که افزایش شدت رفتار جامد نمونه‌ها با افزایش بیشتر K'' نسبت به K' همراه است. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، مقدار K''/K' در تمامی نمونه‌ها کمتر از ۱ بوده و در محدوده ۰/۱۳ تا ۰/۱۹ قرار دارد که نشان دهنده ساختارهای ژلی قدرتمند در نمونه‌های ژل امولسیون تشکیل شده است. در نمونه شاهد مقدار K''/K' برابر با ۰/۱۸ بوده، با افزایش غلظت کاپاکاراگینان مقدار این پارامتر کاهش پیدا کرده و به مقدار ۰/۱۵ در غلظت ۰/۷ درصد از این پلی‌ساکارید می‌رسد که نشان دهنده تشکیل ساختار ژلی قدرتمند در این نمونه است.

(شکل ۳)

(جدول ۳)

در ادامه، پارامترهای شبکه‌ای نمونه‌های ژل امولسیون تهیه شده شامل قدرت اتصالات (A) و تعداد اتصالات (یا توسعه شبکه) (z) از طریق برازش داده‌های مدول کمپلکس (G^*) در برابر فرکانس با مدل قانون توان، مورد بررسی قرار گرفتند. این پارامترها می‌توانند آگاهی‌های ارزشمندی در زمینه ساختارهای رئولوژیکی و خواص میکروسکوپی در نمونه‌های ژل را نشان دهند به این شکل که ماده به عنوان شبکه‌ای از واحدها در نظر گرفته می‌شود که با یکدیگر بهمکنش داشته و ساختار ژل را تشکیل می‌دهند. تعداد گره‌ها و رشته‌ها، و قدرت بهمکنش بین این اجزاء به منظور ایجاد یک شبکه سه‌بعدی به ترتیب توسط پارامترهای z و A مورد مطالعه قرار می‌گیرند (Anvari and Joyner, 2017; Khubber et al., 2021; Yu et al., 2020). همان‌طور که در جدول ۴ ارائه شده است، مقادیر پارامتر A در نمونه‌های ژل امولسیون مرکب بالاتر از مقدار آن در نمونه شاهد ($5380/1 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{1/2}$) بوده و بیشترین مقدار این پارامتر در نمونه حاوی ۰/۷ درصد از کاپاکاراگینان ($16096/7 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{1/2}$) مشاهده شد. افزایش مقدار پارامتر A در ژل‌های مرکب احتمالاً به دلیل ایجاد بهمکنش‌های مناسب بین ایزوله پروتئین آب‌پنیر و پلی‌ساکاریدها بوده که منجر به افزایش استحکام نمونه‌های ژل امولسیون می‌شود (Khubber et al., 2021; Yu et al., 2020). مقادیر پارامتر z در ژل‌های امولسیون مرکب در بازه ۱۶/۴۱-۱۲/۱۴ ثبت شد که بالاتر از مقدار این پارامتر در نمونه شاهد (۱۰/۰۵) بوده و همانند پارامتر A ، بیشترین مقدار پارامتر z نیز در نمونه حاوی ۰/۷ درصد از کاپاکاراگینان مشاهده شد. مقدار پارامتر z می‌تواند تعیین‌کننده سختی و عدم انعطاف‌پذیری شبکه باشد و افزایش مقدار آن نشان می‌دهد که تعداد گره‌ها و رشته‌های متقابل شبکه ژل امولسیون ایزوله پروتئین افزایش پیدا کرده و شبکه ژلی گسترده‌تر شده است و

افزایش ضریب A نشان می‌دهد که بزرگی برهمکنش‌ها افزایش یافته است (Gabriele et al., 2009; Salahi et al., 2022b). بر این اساس، می‌توان گفت که نمونه حاوی ۰/۷ درصد از کاپاکاراگینان دارای پیچیده‌ترین ساختار و بالاترین سطح برهمکنش‌های بین پروتئین و پلی ساکارید است.

(جدول ۴)

۳-۴- ویژگی‌های مکانیکی بافتی

۳-۴-۱- مدول ظاهری الاستیسیته

مدول ظاهری الاستیسیته معیاری برای بیان سفتی ژل‌ها است (Oliver et al., 2015). مقدار این پارامتر در نمونه ژل امولسیون شاهد برابر با $23/22$ kPa بود (جدول ۵). نتایج نشان داد که در حضور صمغ کاپاکاراگینان و با افزایش غلظت آن از ۰/۱ تا ۰/۷ درصد، مقدار مدول ظاهری الاستیسیته به طور مستقیم افزایش پیدا کرده و در محدوده $30/62-58/96$ kPa قرار داشت. با افزایش غلظت پلی ساکاریدها و افزایش دافعه بین پروتئین‌ها و پلی ساکاریدها، غلظت موضعی و اتصال بین تجمعات پروتئینی افزایش پیدا کرده که می‌تواند دلیلی برای افزایش سفتی ژل‌ها باشد (Munialo et al., 2016). van de Velde و de Jong (۲۰۰۷) گزارش کردند که در ژل‌های مخلوط پروتئین آب پنیر و پلی ساکاریدها با چگالی بار متفاوت تهیه شده با روش ژل سازی سرد القاء شده با اسید، سفتی ژل‌ها با ریزساختار آنها مرتبط بوده به طوری که نتایج نشان داد که تعداد رشته‌های مؤثر^۱ و مدول رشته‌ها^۲ با مدول ظاهری الاستیسیته آنها رابطه مستقیمی دارد.

۳-۴-۲- تنش شکست واقعی

مقدار تنش شکست واقعی در نمونه شاهد برابر با $10/39$ kPa بود (جدول ۵). در حضور صمغ کاپاکاراگینان به غیر از غلظت ۰/۳ درصد که کمترین میزان تنش شکست واقعی را در بین تمام نمونه‌ها داشت ($9/67$ kPa)، در سایر سطوح غلظتی کاپاکاراگینان، مقدار این پارامتر افزایش پیدا کرده و بیشترین مقدار آن در غلظت ۰/۷ درصد از این پلی ساکارید مشاهده شد. در این نوع از ژل‌های مرکب، افزایش تنش شکست ممکن است ناشی از کاهش تخلخل و افزایش همگنی شبکه ژلی با افزایش درصد پلی ساکاریدها (Jang and Matsubara, 2005; Babaei et al., 2019) و یا افزایش غلظت موضعی و اتصالات بین تجمعات پروتئین‌ها (Çakır and Foegeding, 2011) باشد. Munialo و همکاران (۲۰۱۶) دریافتند که در ژل‌های مخلوط ایزوله پروتئین آب پنیر و پولولان، با افزایش سطح صمغ از ۰ تا ۰/۱ درصد، مقدار تنش شکست نمونه افزایش و با افزایش غلظت صمغ از ۰/۱ تا ۰/۲ درصد، تنش شکست نمونه‌ها به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کرد. آنها بیان کردند که کاهش تنش شکست

1- Number of effective strands

2- Modulus of the strands

نشان دهنده آن است که حضور پولولان ساختار شبکه سه‌بعدی ژل را مختل می‌کند. آنها همچنین بیان کردند که کاهش تنش شکست ژل‌ها ممکن است به تجمع استرس در نقاط تماس بین مولکول‌های پروتئین و پلی ساکارید نسبت داده شود که باعث افزایش ناهمگنی در ماتریکس ژل و در نتیجه کاهش تنش شکست می‌شود.

۳-۴-۳- کرنش شکست واقعی

کرنش شکست انعکاسی از ضعیف‌ترین نقطه در شبکه فضایی فاز جامد است و می‌تواند به عنوان معیاری برای تغییر شکل‌پذیری ژل‌ها در نظر گرفته شود (Vilela et al., 2011; Munialo et al., 2016). مقدار کرنش شکست واقعی در نمونه شاهد برابر با ۰/۵۷ بود (جدول ۵). در غلظت ۰/۱ درصد از صمغ کاپاکاراگینان، مقدار کرنش شکست نسبت به نمونه شاهد اندکی کاهش پیدا کرد (۰/۵۶) ($P > 0.05$) اما در غلظت ۰/۳ درصد از این پلی ساکارید، مقدار کرنش شکست به مقدار بسیار قابل توجهی کاهش پیدا کرد ($P < 0.05$) و به مقدار ۰/۲۴ رسید. در غلظت‌های ۰/۵ و ۰/۷ درصد کاپاکاراگینان، مقدار کرنش شکست واقعی مشابه بوده و وابستگی قابل توجهی به غلظت صمغ نداشت و از نظر آماری بین این دو نمونه اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد ($P > 0.05$) که این امر نشان می‌دهد نمونه‌ها از نظر مقدار کرنش شکست به تعادل رسیده‌اند. به طور مشابه، Vilela و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه خود روی ژل‌های مخلوط ایزوله پروتئین سویا-صمغ ژلان القاء شده با نمک CaCl_2 دریافتند که مقادیر کرنش شکست مستقل از افزایش غلظت پلی ساکارید از ۰/۳ تا ۰/۷ درصد است که نشان می‌دهد این ویژگی تنها به وسیله برهمکنش‌های رخ داده بین بیوپلیمرها کنترل می‌شود.

۳-۴-۴- انرژی شکست

این پارامتر به عنوان مقدار انرژی مورد نیاز برای فشرده‌سازی نمونه تا نقطه شکست محاسبه می‌شود. مقدار پارامتر انرژی شکست در نمونه شاهد برابر با ۲۴/۶۵ mJ بود (جدول ۵). در حضور غلظت ۰/۱ درصد از صمغ کاپاکاراگینان، مقدار انرژی شکست افزایش پیدا می‌کند، اما با ادامه افزایش غلظت این صمغ به ۰/۳ درصد، مقدار این پارامتر کاهش پیدا کرده برابر با ۹/۱۵ mJ می‌شود. کاهش شدید میزان انرژی شکست در غلظت ۰/۳ درصد به دلیل کاهش قابل توجه انرژی شکست در این نمونه‌ها است. در ادامه، با افزایش غلظت صمغ به سطح ۰/۵ و ۰/۷ درصد، مجدداً میزان انرژی شکست روند افزایش پیدا کرده و در غلظت ۰/۷ درصد به مقدار ۱۹/۷۰ mJ می‌رسد. ژل‌های با انرژی شکست کمتر در طی فرآوری دهانی راحت‌تر به قطعات کوچک‌تر تجزیه شده و به تعداد سیکل‌های جویدن کمتری نیاز دارند (Luo et al., 2020).

۳-۵- ظرفیت نگهداری آب

ظرفیت نگهداری آب نقش مهمی در ارزیابی کیفیت ژل دارد و به ریزساختار، فعل و انفعالات بین ماتریکس ژل و آب و برهمکنش‌های بین پروتئین و پلی ساکارید مرتبط است (Zhao et al., 2020; Yang et al., 2021). شکل ۴ ظرفیت نگهداری نمونه‌های ژل امولسیون را به عنوان

تابعی از غلظت کاپاکاراگینان نشان می‌دهد. در نمونه شاهد میزان ظرفیت نگهداری آب برابر با ۷۵/۴۹٪ بود. نتایج نشان داد که نمونه‌های ژل امولسیون حاوی ۰/۱ و ۰/۳ درصد به ترتیب دارای بیشترین (۷۷/۰۶ درصد) و کمترین (۷۳/۲۱ درصد) میزان ظرفیت نگهداری آب نسبت به نمونه شاهد هستند (۷۵/۴۹ درصد). با این حال از نظر آنالیز آماری، غلظت‌های مختلف کاپاکاراگینان تأثیر معنی‌داری بر این پارامتر نداشتند ($P > 0.05$). پلی ساکاریدها می‌توانند اثرات متفاوتی بر ظرفیت نگهداری ژل‌های مبتنی بر پروتئین داشته باشند. به عنوان مثال **Vardhanabhuti و Zhang** (۲۰۱۴)، **Çakır و Foegeding** (۲۰۱۱)، **van den Berg و همکاران** (۲۰۰۷) و **Salahi و همکاران** (۲۰۲۲b) گزارش کردند که، به ترتیب، در ژل‌های مرکب حاصل از ایزوله پروتئین آب پنیر با پلی ساکاریدهای پکتین با متوکسیل پایین، کاپاکاراگینان، ژلان با متوکسیل پایین و آگار، ظرفیت نگهداری آب در حضور پلی ساکاریدها کاهش پیدا می‌کند. این پژوهشگران اظهار داشتند که تفاوت در ظرفیت این ژل‌های مرکب در حفظ فاز آبی در شبکه خود در طول سانتریفیوژ با تفاوت‌های مشاهده شده در برهمکنش‌های پروتئین-پلی ساکارید و ویژگی‌های ریزساختاری آنها مطابقت دارد؛ به طوری که با افزایش غلظت پلی ساکارید تغییری در ریزساختار ژل‌ها از حالت هموژن در نمونه شاهد به حالت دوپوسته^۱ در ژل‌های مرکب مشاهده شده است. در طرف مقابل، **Razi و همکاران** (۲۰۱۸) و **Salahi و همکاران** (۲۰۲۲a) گزارش کردند صمغ دانه ریحان باعث افزایش ظرفیت نگهداری آب به ترتیب در ژل‌های مبتنی بر ایزوله پروتئین آب پنیر و آلومین تخم مرغ می‌شود که به دلیل تعامل بین مولکولی قدرتمند بین سیستم‌های پروتئین-پلی ساکارید بود.

(شکل ۴)

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش امکان تولید ژل‌های پر شده امولسیونی به روش سرد مبتنی بر ایزوله پروتئین آب پنیر به عنوان تابعی از غلظت پلی ساکارید کاپاکاراگینان بررسی شد. نمونه‌های تهیه شده تحت آزمون‌های برشی پایا، کرنش متغیر، فرکانس متغیر، TPA و ظرفیت نگهداری آب قرار گرفتند. نتایج حاصل از آزمون برشی پایا و برازش داده‌ها با مدل قانون توان، بیانگر رفتار به شدت غیر نیوتنی و تضعیف شونده با برش نمونه ژل امولسیون شاهد بوده امولسیون بوده ($n=0.064$) و استفاده از صمغ کاپاکاراگینان در تمامی سطوح غلظتی مورد مطالعه ۰/۷-۰/۱ درصد این رفتار تضعیف شونده با برش را تشدید می‌کرد ($0.038 < n < 0.019$) که می‌تواند باعث احساس دهانی مطلوب شود. بر پایه اطلاعات به دست آمده از آزمون‌های برشی ناپایا (کرنش متغیر و فرکانس متغیر) می‌توان بیان کرد که حضور کاپاکاراگینان منجر به تقویت ساختمان شبکه ژل امولسیون ایزوله پروتئین آب پنیر و توسعه رفتار شبه جامد آن شده به طوری که بیشترین مقدار مدول الاستیک و کمترین مقدار مدول اتلاف در آزمون کرنش متغیر و بیشترین مقدار K' و کمترین مقدار n' در آزمون فرکانس متغیر در نمونه ژل امولسیون حاوی ۰/۷ درصد کاپاکاراگینان مشاهده شد. طبق نتایج آزمون TPA، به طور میانگین، در حضور صمغ کاپاکاراگینان مدول ظاهری الاستیسیته و تنش شکست واقعی افزایش و مقدار کرنش شکست

واقعی و انرژی شکست کاهش پیدا کرد که بیانگر افزایش تردی نمونه‌های ژل امولسیون است. از نظر آماری، غلظت‌های مختلف کاپاکارگینان تاثیر معنی داری بر مقدار پارامتر ظرفیت نگهداری آب نداشت. نتایج این پژوهش می‌تواند در طراحی سیستم‌های غذایی نوین از نظر بافتی و نیز حفظ، انتقال و رهایش ترکیبات ریزمغذی و طعمی در محیط دهان و دستگاه گوارش مفید باشد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تعارض منافی ندارند.

منابع

1. Alavi, F., Emam-Djomeh, Z., Mohammadian, M., Salami, M., Moosavi-Movahedi, A. A. (2020). Physico-chemical and foaming properties of nanofibrillated egg white protein and its functionality in meringue batter. *Food Hydrocolloids*, 101, 105554. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105554>
2. Alghooneh, A. (2019). *Biopolymers identification and clustering based on rheological, thermal, and structural properties*. (PhD thesis), Ferdowsi University of Mashhad (in Persian).
3. Anvari, M., Joyner, H. S. (2017). Effect of fish gelatin-gum arabic interactions on structural and functional properties of concentrated emulsions. *Food Research International*, 102, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.085>
4. Babaei, J., Mohammadian, M., Madadlou, A. (2019). Gelatin as texture modifier and porogen in egg white hydrogel. *Food Chemistry*, 270, 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.109>
5. Bao, H., Ni, Y., Dong, H., Liang, L. (2020). α -Tocopherol and resveratrol in emulsion-filled whey protein gels: Co-encapsulation and in vitro digestion. *International Dairy Journal*, 104, 104649. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104649>
6. Behrouzain, F., Razavi, S. M. A. (2020). Structure-rheology relationship of basil seed gum-whey protein isolate mixture: Effect of thermal treatment and biopolymer ratio. *Food Hydrocolloids*, 102, 105608. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105608>
7. Çakır, E., Foegeding, E. A. (2011). Combining protein micro-phase separation and protein-polysaccharide segregative phase separation to produce gel structures. *Food Hydrocolloids*, 25(6), 1538-1546. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.02.002>
8. Chen, H., Mao, L., Hou, Z., Yuan, F., Gao, Y. (2020). Roles of additional emulsifiers in the structures of emulsion gels and stability of vitamin E. *Food Hydrocolloids*, 99, 105372. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105372>
9. de Jong, S., van de Velde, F. (2007). Charge density of polysaccharide controls microstructure and large deformation properties of mixed gels. *Food Hydrocolloids*, 21(7), 1172-1187. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.09.004>
10. Farjami, T., Madadlou, A. (2019). An overview on preparation of emulsion-filled gels and emulsion particulate gels. *Trends in Food Science and Technology*, 86, 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.043>

11. Gabriele, D., Migliori, M., Di Sanzo, R., Rossi, C. O., Ruffolo, S. A., De Cindio, B. (2009). Characterisation of dairy emulsions by NMR and rheological techniques. *Food Hydrocolloids*, 23(3), 619-628. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.05.002>
12. Hyun, K., Kim, S. H., Ahn, K. H., Lee, S. J. (2002). Large amplitude oscillatory shear as a way to classify the complex fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 107: 51-65. [https://doi.org/10.1016/S0377-0257\(02\)00141-6](https://doi.org/10.1016/S0377-0257(02)00141-6)
13. Jang, B.-K., Matsubara, H. (2005). Influence of porosity on hardness and Young's modulus of nanoporous EB-PVD TBCs by nanoindentation. *Materials Letters*, 59(27), 3462-3466. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.06.014>
14. Jiang, S., Altaf hussain, M., Cheng, J., Jiang, Z., Geng, H., Sun, Y., et al. (2018). Effect of heat treatment on physicochemical and emulsifying properties of polymerized whey protein concentrate and polymerized whey protein isolate. *LWT-Food Science and Technology*, 98, 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.08.028>
15. Kazemi-Taskooh, Z., Varidi, M. (2021). Designation and characterization of cold-set whey protein-gellan gum hydrogel for iron entrapment. *Food Hydrocolloids*, 111, 106205. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106205>
16. Khubber, S., Chaturvedi, K., Thakur, N., Sharma, N., Yadav, S. K. (2021). Low-methoxyl pectin stabilizes low-fat set yoghurt and improves their physicochemical properties, rheology, microstructure and sensory liking. *Food Hydrocolloids*, 111, 106240. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106240>
17. Liu, F., Liang, X., Yan, J., Zhao, S., Li, S., Liu, X., . . . McClements, D. J. (2022). Tailoring the properties of double-crosslinked emulsion gels using structural design principles: Physical characteristics, stability, and delivery of lycopene. *Biomaterials*, 280, 121265. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2021.121265>
18. Liu, K., Stieger, M., van der Linden, E., van de Velde, F. (2015). Fat droplet characteristics affect rheological, tribological and sensory properties of food gels. *Food Hydrocolloids*, 44, 244-259. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.09.034>
19. Lu, Y., Mao, L., Hou, Z., Miao, S., Gao, Y. (2019). Development of Emulsion Gels for the Delivery of Functional Food Ingredients: from Structure to Functionality. *Food Engineering Reviews*, 11(4), 245-258. <https://doi.org/10.1007/s12393-019-09194-z>
20. Luo, N., Ye, A., Wolber, F. M., Singh, H. (2020). In-mouth breakdown behaviour and sensory perception of emulsion gels containing active or inactive filler particles loaded with capsaicinoids. *Food Hydrocolloids*, 108,106076. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106076>
21. Maltais, A., Remondetto, G. E., Subirade, M. (2010). Tableted soy protein cold-set hydrogels as carriers of nutraceutical substances. *Food Hydrocolloids*, 24, 518–524. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.11.016>
22. Mao, L., Miao, S., Yuan, F., Gao, Y. (2018). Study on the textural and volatile characteristics of emulsion filled protein gels as influenced by different fat substitutes. *Food Research International*, 103, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.10.024>
23. Marcotte, M., Hoshahili, A. R. T., Ramaswamy, H. S. (2001). Rheological properties of selected hydrocolloids as a function of concentration and temperature. *Food Research International*, 34(8), 695-703. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(01\)00091-6](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(01)00091-6)
24. Moreno, H. M., Domínguez-Timón, F., Díaz, M. T., Pedrosa, M. M., Borderías, A. J., Tovar, C. A. (2020). Evaluation of gels made with different commercial pea protein isolate: Rheological, structural and functional properties. *Food Hydrocolloids*, 99, 105375. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105375>

25. Munialo, C. D., van der Linden, E., Ako, K., Nieuwland, M., Van As, H., de Jongh, H. H. J. (2016). The effect of polysaccharides on the ability of whey protein gels to either store or dissipate energy upon mechanical deformation. *Food Hydrocolloids*, 52, 707-720. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.08.013>
26. Oliver, L., Scholten, E., van Aken, G. A. (2015). Effect of fat hardness on large deformation rheology of emulsion-filled gels. *Food Hydrocolloids*, 43, 299-310. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.05.031>
27. 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. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.01.013>
28. Salahi, M. R., Razavi, S. M. A., Mohebbi, M. (2022a). Physicochemical, Rheological and Structural Properties of Cold-set Emulsion-filled Gels Based on Whey Protein Isolate-basil Seed Gum Mixed Biopolymers. *Food Biophysics*, 17(4), 635-649. <https://doi.org/10.1007/s11483-022-09751-w>
29. Salahi, M. R., Razavi, S. M. A., Mohebbi, M. (2022b). Analyzing the Effects of Agar gum on the Textural and Rheological Properties of Cold-set whey Protein Isolate Emulsion-filled Gel. *Research and Innovation in Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.22101/JRIFST.2022.318480.1303>
30. Sun, A., Gunasekaran, S. (2009). Yield stress in foods: measurements and applications. *International Journal of Food Properties*, 12(1), 70-101. <https://doi.org/10.1080/10942910802308502>
31. Urbonaite, V., De Jongh, H. H. J., Van der Linden, E., Pouvreau, L. (2014). Origin of water loss from soy protein gels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(30), 7550-7558. <https://doi.org/10.1021/jf501728t>
32. van den Berg, L., van Vliet, T., van der Linden, E., van Boekel, M. A. J. S., van de Velde, F. (2007). Serum release: The hidden quality in fracturing composites. *Food Hydrocolloids*, 21(3), 420-432. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.05.002>
33. Vilela, J. A. P., Cavallieri, A. L. F., Da Cunha, R. L. (2011). The influence of gelation rate on the physical properties/structure of salt-induced gels of soy protein isolate-gellan gum. *Food Hydrocolloids*, 25(7), 1710-1718. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.03.012>
34. Xiong, W., Ren, C., Tian, M., Yang, X., Li, J., Li, B. (2017). Complex coacervation of ovalbumin-carboxymethylcellulose assessed by isothermal titration calorimeter and rheology: Effect of ionic strength and charge density of polysaccharide. *Food Hydrocolloids*, 73, 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.06.031>
35. Yang, Q., Wang, Y.-R., Li-Sha, Y.-J., Chen, H.-Q. (2021). The effects of basil seed gum on the physicochemical and structural properties of arachin gel. *Food Hydrocolloids*, 110, 106189. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106189>
36. Yu, B., Zheng, L., Cui, B., Zhao, H., Liu, P. (2020). The effects of acetylated distarch phosphate from tapioca starch on rheological properties and microstructure of acid-induced casein gel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 159, 1132-1139. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.049>
37. Zhang, S., Vardhanabhuti, B. (2014). Acid-induced gelation properties of heated whey protein-pectin soluble complex (Part II): Effect of charge density of pectin. *Food Hydrocolloids*, 39, 95-103. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.12.020>

38. Zhao, H., Chen, J., Hemar, Y., Cui, B. (2020). Improvement of the rheological and textural properties of calcium sulfate-induced soy protein isolate gels by the incorporation of different polysaccharides. *Food Chemistry*, 310, 125983. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125983>

جدول ۱. پارامترهای رئولوژیکی برشی ثابت ژل‌های پر شده با امولسیون در غلظت‌های مختلف کاپاکاراگینان بر اساس مدل قانون توان

Table 1. Steady shear rheological parameters of emulsion-filled gels at different concentrations of *k*-Carrageenan based on the power-law model

<i>k</i> -Carrageenan (%)	$k (Pa \cdot s^n)$	$n (-)$	R^2
0.0	339.9 ± 24.03 ^b	0.064 ± 0.005 ^a	0.999
0.1	468.4 ± 19.9 ^a	0.019 ± 0.003 ^c	0.999
0.3	497.5 ± 35.2 ^a	0.023 ± 0.003 ^{bc}	0.999
0.5	513.2 ± 36.3 ^a	0.038 ± 0.005 ^b	0.994
0.7	545.7 ± 40.1 ^a	0.032 ± 0.004 ^{bc}	0.995

بالانویس‌های مختلف در هر ستون نشان دهنده تفاوت قابل توجهی در $P < 0.05$ است. داده‌ها میانگین ± انحراف معیار هستند.

Different superscripts in each column represent a significant difference at $P < 0.05$. Data are means ± standard deviation.

نسخه پیلز انتشار

جدول ۲. پارامترهای رئولوژیکی دینامیکی ژل‌های پر شده امولسیون‌ی تعیین شده توسط آزمون کرنش متغیر

Table 2. Dynamic rheological parameters of emulsion-filled gels determined by the strain sweep test

<i>k</i> -Carrageenan (%)	$G'_{(LVE)}$ (Pa)	$G''_{(LVE)}$ (Pa)	Tan δ_{LVE} (-)	γ_L (%)	G_f (Pa)	τ_f (Pa)	γ_F (%)
0.0	4438.3 ± 313.8 ^e	751.4 ± 53.1 ^d	0.17 ± 0.01 ^a	2.53 ± 0.16 ^a	1053.4 ± 59.6 ^c	327.76 ± 15.30 ^d	22.08 ± 0.94 ^a
0.1	8875.3 ± 313.8 ^d	1512.8 ± 59.9 ^c	0.17 ± 0.01 ^a	1.51 ± 0.10 ^b	1364.2 ± 77.2 ^{bc}	407.23 ± 16.13 ^{bc}	22.93 ± 0.65 ^a
0.3	11426.7 ± 646.4 ^c	1736.1 ± 61.4 ^{bc}	0.15 ± 0.01 ^{ab}	1.24 ± 0.08 ^{bc}	1447.9 ± 92.1 ^b	454.39 ± 15.42 ^{ab}	22.85 ± 0.97 ^a
0.5	13548.9 ± 574.8 ^b	1883.8 ± 53.3 ^{ab}	0.14 ± 0.00 ^b	1.13 ± 0.09 ^{bc}	1706.2 ± 72.4 ^b	475.82 ± 23.55 ^a	17.52 ± 0.62 ^b
0.7	15883.5 ± 629.0 ^a	2066.7 ± 76.0 ^a	0.13 ± 0.00 ^b	0.86 ± 0.05 ^c	2790.1 ± 125.3 ^a	344.37 ± 9.74 ^{cd}	9.73 ± 0.48 ^c

بالانویس‌های مختلف در هر ستون نشان دهنده تفاوت قابل توجهی در $P < 0.05$ است. داده‌ها میانگین ± انحراف معیار هستند.

Different superscripts in each column represent a significant difference at $P < 0.05$. Data are means ± standard deviation.

جدول ۳. پارامترهای رئولوژیکی دینامیکی ژل‌های پر شده امولسیون تعیین شده با آزمون فرکانس متغیر

Table 3. Dynamic rheological parameters of emulsion-filled gels determined by the frequency sweep test

k-Carrageenan (%)	$G' = K' \times (\omega)^{n'}$			$G'' = K'' \times (\omega)^{n''}$			$K''/K'(-)$
	K' (Pa)	n' (-)	R^2	K'' (Pa)	n'' (-)	R^2	
0.0	5311.8 ± 187.8 ^d	0.095 ± 0.005 ^a	0.988	939.9 ± 33.2 ^c	0.116 ± 0.009 ^a	0.934	0.18 ± 0.01 ^a
0.1	8767.2 ± 248.0 ^c	0.079 ± 0.004 ^b	0.986	1626.6 ± 69.0 ^b	0.117 ± 0.007 ^a	0.941	0.18 ± 0.01 ^a
0.3	11212.7 ± 412.3 ^b	0.070 ± 0.003 ^{bc}	0.983	1865.7 ± 92.3 ^b	0.120 ± 0.005 ^a	0.913	0.17 ± 0.01 ^{ab}
0.5	12298.5 ± 434.8 ^b	0.060 ± 0.003 ^{cd}	0.995	1922.1 ± 68.2 ^b	0.110 ± 0.003 ^{ab}	0.888	0.16 ± 0.01 ^{ab}
0.7	15939.4 ± 721.3 ^a	0.050 ± 0.002 ^d	0.996	2388.7 ± 94.6 ^a	0.090 ± 0.004 ^b	0.863	0.15 ± 0.01 ^b

بالانویس‌های مختلف در هر ستون نشان دهنده تفاوت قابل توجهی در $P < 0.05$ است. داده‌ها میانگین ± انحراف معیار هستند.

Different superscripts in each column represent a significant difference at $P < 0.05$. Data are means ± standard deviation.

جدول ۴. پارامترهای قدرت شبکه (A) و گسترش شبکه (z) ژل‌های پر شده امولسیون

Table 4. The parameters of strength of network (A) and the network extension (z) of emulsion-filled gels

k-Carrageenan (%)	A (Pa. s ^{1/z})	z (-)	R ²
0.0	5380.1 ± 228.3 ^d	10.05 ± 0.38 ^c	0.977
0.1	8929.4 ± 315.7 ^c	12.14 ± 0.34 ^b	0.994
0.3	11313.3 ± 480.5 ^b	12.72 ± 0.54 ^b	0.997
0.5	12446.7 ± 352.0 ^b	15.73 ± 0.56 ^a	0.994
0.7	16096.7 ± 637.4 ^a	16.41 ± 0.56 ^a	0.995

بالانویس‌های مختلف در هر ستون نشان دهنده تفاوت قابل توجهی در $P < 0.05$ است. داده‌ها میانگین ± انحراف معیار هستند.

Different superscripts in each column represent a significant difference at $P < 0.05$. Data are means ± standard deviation.

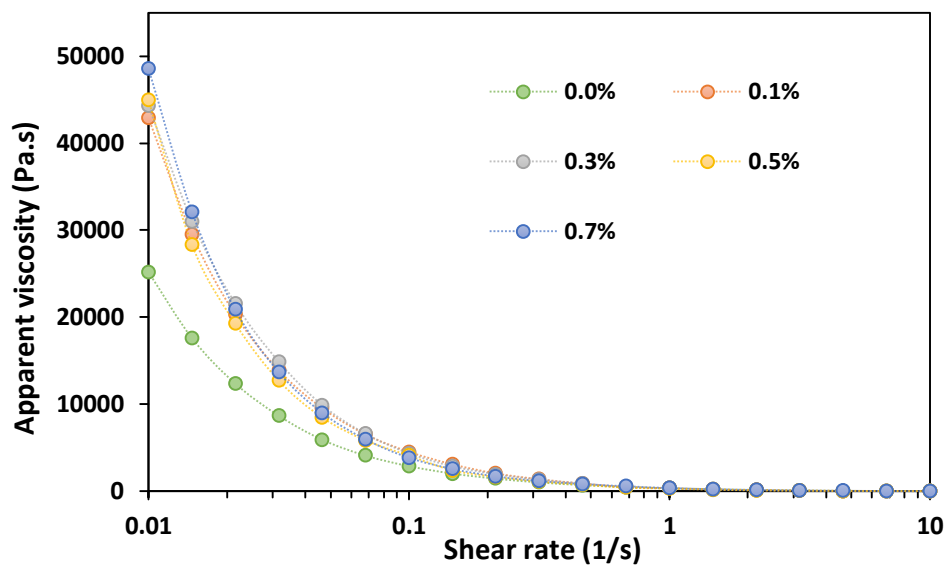
جدول ۵. خواص مکانیکی ژل‌های پر شده امولسیون‌ی اندازه‌گیری شده توسط آزمون فشاری تک محوره

Table 5. Mechanical properties of emulsion-filled gels measured by the uniaxial compression test

<i>k</i> -Carrageenan (%)	Initial tangent modulus (kPa) مدول ظاهری الاستیسیته	True fracture stress (kPa) تنش شکست واقعی	True fracture strain (-) کرنش شکست واقعی	Fracture energy (mJ) انرژی شکست
0.0	23.22 ± 1.16 ^d	10.39 ± 0.83 ^{cd}	0.58 ± 0.04 ^a	22.65 ± 2.97 ^b
0.1	30.58 ± 2.62 ^c	11.17 ± 0.57 ^c	0.56 ± 0.03 ^a	27.57 ± 2.42 ^a
0.3	46.51 ± 2.59 ^b	9.67 ± 0.76 ^d	0.24 ± 0.03 ^c	9.15 ± 1.54 ^e
0.5	49.29 ± 3.72 ^b	12.99 ± 1.17 ^b	0.31 ± 0.02 ^b	13.60 ± 1.29 ^d
0.7	62.96 ± 2.76 ^a	16.78 ± 1.22 ^a	0.34 ± 0.03 ^b	19.70 ± 2.71 ^c

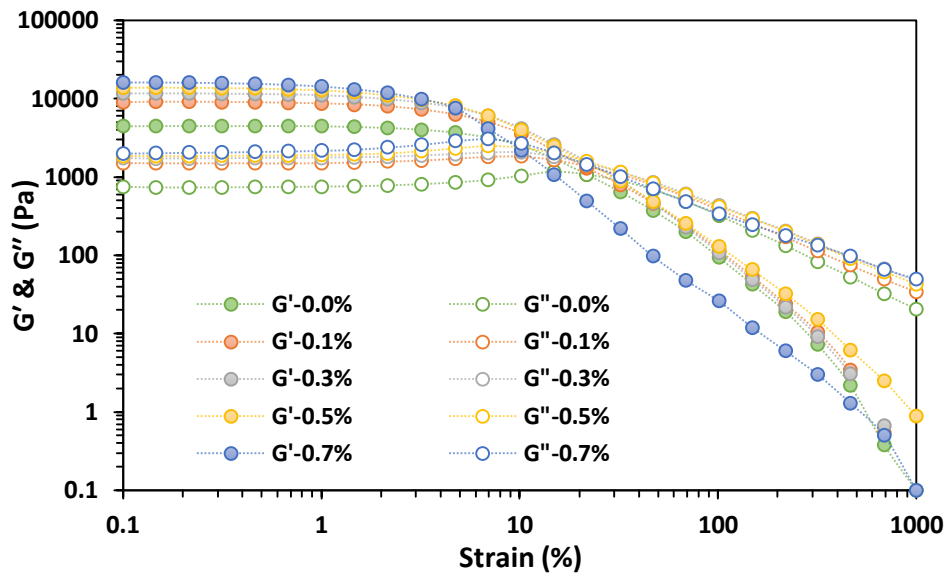
بالانویس‌های مختلف در هر ستون نشان دهنده تفاوت قابل توجهی در $P < 0.05$ است. داده‌ها میانگین ± انحراف معیار هستند.

Different superscripts in each column represent a significant difference at $P < 0.05$. Data are means ± standard deviation.



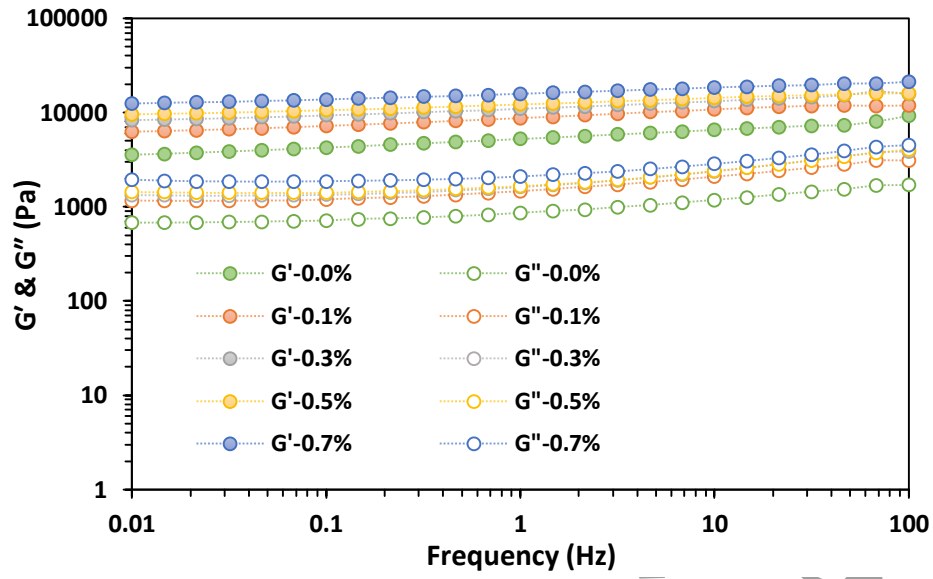
شکل ۱. اثر غلظت کاپاکاراگینان بر ویسکوزیته ظاهری ژل‌های پر شده امولسیون

Fig. 1. Effect of *k*-Carrageenan concentration on the apparent viscosity of emulsion-filled gels



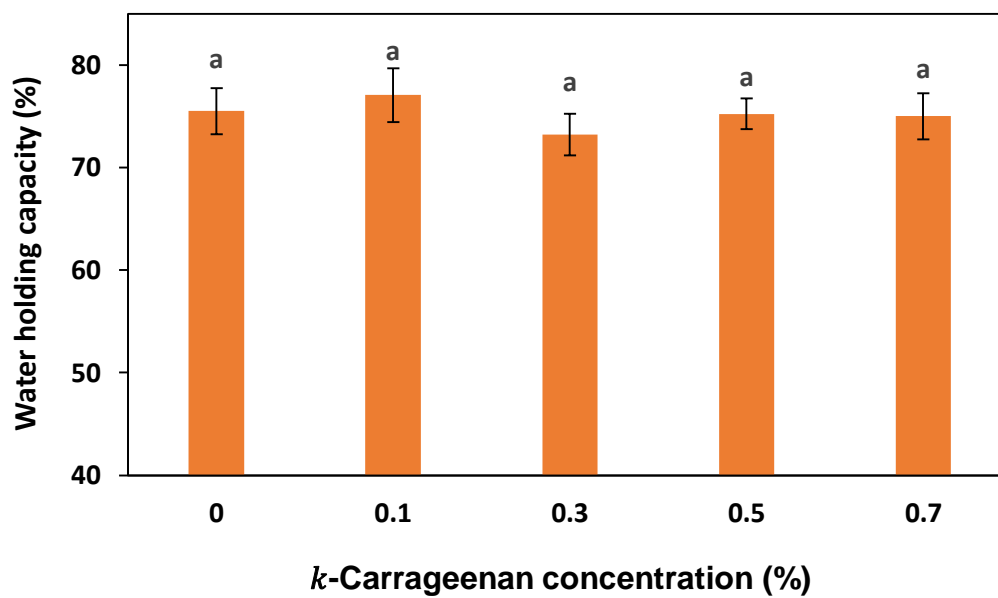
شکل ۲. وابستگی به کرنش متغیر مدول الاستیک (G') و مدول ویسکوز (G'') ژل‌های پر شده امولسیون به عنوان تابعی از غلظت کاپا کاراژینان

Fig. 2. Strain sweep dependency of elastic modulus (G') and viscose modulus (G'') of emulsion-filled gels as a function of the k -Carrageenan concentration



شکل ۳. وابستگی به فرکانس متغیر مدول الاستیک (G') و مدول ویسکوز (G'') ژل‌های پر شده امولسیون به عنوان تابعی از غلظت کاپاکاراگینان

Fig. 3. Frequency sweep dependency of elastic modulus (G') and viscous modulus (G'') of emulsion-filled gels as a function of the k -Carrageenan concentration



شکل ۴. اثر غلظت کاپاکاراگینان بر ظرفیت نگهداری آب ژله‌های پر شده امولسیون

Fig. 5. Effect of *k*-Carrageenan concentration on the water holding capacity of emulsion-filled gels