

Evaluation of rheological and textural properties of hybrid hydrogel containing Whey protein isolate – *Opuntia*

Paniz Kavooosi¹, Mahboobeh kashiri^{2*}, Morteza Khomeiri³,
Mohammad Ghorbani⁴, Samira Eshghinia⁵

¹MSc Student, Department of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

²Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, Email: mkashiri@gau.ac.ir

³Professor, Department of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

⁴Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

⁵Department of Metabolic Disorders Research, Golestan University of Medical Sciences and Health Services, Gorgan, Iran

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2021-11-10
Revised: 2021-12-24
Accepted: 2022-04-18

Keywords:
Hybrid Hydrogel
Opuntia Fruit
Whey protein isolate
Thickening agent

ABSTRACT

Background and Objective: cactus pear (*Opuntia stricta*) is known as a source of polysaccharide compounds (mucilage) that can trap water by the three-dimensional network. Hydrogels are three-dimensional polymer networks with cross-links that absorb large amounts of water. In recent years, the use of these compounds as a thickening or gelling agent has increased. In these systems, whey protein hydrogel due to its high nutritional value, good functional properties, and biocompatibility has attracted the attention of the food industry. In this study, the production of new hydrogels (hybrid hydrogels) in combination with a polysaccharide component for improving the functional properties of whey protein was investigated. The purpose of this study was to evaluate the behavior of Whey Protein Isolated-*Opuntia* hybrid hydrogels in terms of rheological behavior and textural properties as a subordinate of protein and polysaccharide concentrations.

Materials and Methods: *Opuntia* fruit powder was prepared from the fruit pulp with a hot air dryer. To prepare the main/final mixture of the hydrogel, two hydrogel bases including *Opuntia* pulp hydrogel (Op) (20% w/w) and whey protein isolate hydrogel (W) (15% w/w) were mixed in different ratios (W/Op: 80-20, 70-30, 60-40, 50-50) by an electric mixer at low speed for 1 minute. Finally, textural properties including (viscosity, consistency, hardness and adhesiveness), water holding capacity, swelling ratio and rheological properties were tested. Data were analyzed using SAS software and the mean values were compared using Duncan's multiple range test at 5% level.

Results: Increasing ratio of *Opuntia* hydrogel to Whey protein hydrogel caused a significant increase in Viscosity, Consistency, Hardness, and Adhesiveness of hybrid hydrogels (W-Op H) compared to protein control (Whey protein) ($p \leq 0.05$). Also, Water Holding Capacity and Swelling ratio increased with increasing the ratio of *Opuntia* hydrogel in the samples ($p \leq 0.05$). *Opuntia* and Whey Protein Isolate hydrogel had the highest (694.71 ± 42.89 %) and lowest (340.22 ± 7.19 %) swelling ratios among the other samples, respectively. On the other hand, adding *Opuntia* hydrogel to Whey Protein Isolate hydrogel enhanced the viscoelastic behavior of the

mixture, so that with increasing *Opuntia* hydrogel ratio, the storage and loss modulus was increased. The loss factor of hydrogel samples was between 0.24-0.36, which can be obtained as semi-gel material and the elastic behavior was more dominant than the viscose behavior.

Conclusion: hybrid hydrogel (W/Op: 60-40) due to its highest viscosity, maximum water holding capacity, and swelling ratio, as well as the presence of appropriate rheological behavior, was suggested as the best sample for thickening agent and texture improvement in food products such as ice cream, sauces, meat products, dairy products, Tofu, Noodles, etc.

Cite this article: Kavooosi, P., Kashiri, M., Khomeiri, M., Ghorbani, M., Eshghinia, S. 2022. Evaluation of rheological and textural properties of hybrid hydrogel containing Whey protein isolate – *Opuntia*. *Food Processing and Preservation Journal*, 14 (3), 125-140.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/EJFPP.2022.19662.1687

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی و بافتی هیدروژل هیبریدی حاوی ایزوله پروتئین آب پنیر-آپونتیا

پانید کاوسی^۱، محبوبه کشیری^{۲*}، مرتضی خمیری^۳، محمد قربانی^۴، سمیرا عشقی‌نیا^۵

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۲. استادیار، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، ایمان: mkashiri@gau.ac.ir
۳. استاد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۴. دانشیار، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۵. استادیار، گروه تحقیقات اختلالات متابولیک، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی گلستان، گرگان، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>سابقه و هدف: میوه آپونتیا (<i>Opuntia stricta</i>) با نام متداول گلابی کاکتوس به عنوان منبعی جهت تولید ترکیبات پلی ساکاریدی (موسیلاز) شناخته می‌شود که دارای خاصیت ژل کنندگی می‌باشد. هیدروژل‌ها شبکه‌های پلی مری سه بعدی همراه با اتصالات عرضی هستند که دارای قابلیت جذب مقدار زیادی آب بوده و در سال‌های اخیر استفاده از این ترکیبات به عنوان عامل سفت کننده و یا ژل دهنده در محصولات غذایی افزایش یافته است. در میان سیستم‌های هیدروژلی، هیدروژل پروتئین آب پنیر به دلیل ارزش تغذیه‌ای بالا، خواص عملکردی مناسب و سازگاری زیستی، مورد استقبال صنعت غذا قرار گرفته است. با توجه به اهمیت بهبود ویژگی‌های عملکردی پروتئین آب پنیر، در این مطالعه تولید هیدروژل نوین (هیدروژل‌های هیبریدی) در ترکیب با هیدروژل آپونتیا (دارای ترکیبات پلی ساکاریدی) مورد بررسی قرار گرفت. لذا هدف از این مطالعه بررسی رفتار هیدروژل هیبریدی ایزوله پروتئین آب پنیر-پالپ آپونتیا (W-Op H) به لحاظ رفتار رئولوژیکی و ویژگی‌های بافتی به عنوان تابعی از غلظت پروتئین و پلی ساکارید بود.</p>	<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۱۹ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۰/۱۰/۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱/۲۹</p> <p>واژه‌های کلیدی: هیدروژل هیبریدی میوه آپونتیا ایزوله پروتئین آب پنیر سفت کننده بافت دهنده</p>
<p>مواد و روش‌ها: پودر میوه آپونتیا طی فرایند خشک کردن غیرمستقیم (خشک کن هوای گرم) از پالپ میوه فراهم گردید و سپس هیدروژل‌های پایه شامل هیدروژل پالپ آپونتیا (Op) (۲۰ درصد وزنی- وزنی) و هیدروژل ایزوله پروتئین آب پنیر (W) (۱۵ درصد وزنی- وزنی) تهیه و در نسبت‌های مختلف هیدروژلی (۲۰-۸۰، ۳۰-۷۰، ۴۰-۶۰، ۵۰-۵۰) Op/W با کمک همزن برقی با دور آهسته به مدت ۱ دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند و در نهایت ویژگی‌های بافتی (ویسکوزیته، چسبندگی، سفتی و قوام)، ظرفیت نگهداری آب، نرخ تورم و خواص رئولوژیکی آن‌ها بررسی شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد صورت گرفت.</p>	
<p>یافته‌ها: افزایش نسبت هیدروژل آپونتیا به هیدروژل پروتئین آب پنیر سبب افزایش معنا دار ویسکوزیته، انسجام و پیوستگی، سختی و چسبندگی هیدروژل‌های هیبریدی (W-Op H) در مقایسه با شاهد پروتئینی (پروتئین آب پنیر) در سطح اطمینان ۹۵ درصد گردید. همچنین ظرفیت نگهداری آب و نرخ تورم با افزایش نسبت هیدروژل آپونتیا در مخلوط هیدروژلی افزایش یافت ($P \leq 0.05$). به طوری که</p>	

نمونه هیدروژل آپونتیا (شاهد پلی ساکاریدی) و هیدروژل ایزوله پروتئین آب پنیر (شاهد پروتئینی) به ترتیب دارای بیشترین ($42/89 \pm 694/71$ درصد) و کمترین نرخ تورم ($7/19 \pm 340/22$ درصد) در بین سایر نمونه‌ها بودند. از طرفی افزودن هیدروژل آپونتیا به هیدروژل ایزوله پروتئین آب پنیر سبب تقویت رفتار ویسکوالاستیک مخلوط گردیده به گونه‌ای که با افزایش نسبت هیدروژل آپونتیا، مدول‌های ذخیره و افت در نمونه‌های هیدروژل هیبریدی افزایش یافت. تانژانت اتلاف مربوط به تمامی نمونه‌های هیدروژل بین $0/24$ تا $0/36$ بود که می‌توان دریافت نمونه‌های تولیدی، شبه ژل بوده و رفتار الاستیک در آن‌ها غالب‌تر از رفتار ویسکوز بود.

نتیجه‌گیری: هیدروژل هیبریدی ($Op/W: 60-40$) به دلیل دارا بودن بالاترین ویسکوزیته ($N.sec$) $34/26$ ، بیشترین ظرفیت نگهداری آب ($99/93$ درصد) و نرخ تورم مناسب ($495/66$ درصد) به‌عنوان بهترین نمونه در جهت تغلیظ کنندگی و بهبود بافت مواد غذایی پیشنهاد گردید. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن ترکیبات پلی ساکاریدی نظیر هیدروژل آپونتیا به هیدروژل پروتئین آب پنیر سبب بهبود رفتار رئولوژیکی نمونه‌ها (افزایش مدول ذخیره و افت) گردید.

استناد: کاوسی، پ.، کشیری، م.، خمیری، م.، قربانی، م.، عشقی‌نیا، س. (۱۴۰۱). بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی و بافتی هیدروژل هیبریدی حاوی ایزوله پروتئین آب پنیر - آپونتیا. *فراآوری و نگهداری مواد غذایی*، ۱۴ (۳)، ۱۴۰-۱۲۵.

DOI: 10.22069/EJFPP.2022.19662.1687



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

هیدروژل‌ها شبکه‌های پلی مری سه بعدی همراه با اتصالات عرضی هستند که دارای قابلیت جذب مقدار زیادی آب می‌باشند (۱). از هیدروژل‌ها بسته به وسعت برهم‌کنش بین مولکولی (استحکام شبکه سه بعدی) به عنوان عامل تغلیظ‌کننده و یا ژل‌دهنده در دسرهای لبنی، مربا، توفو، نودل و برخی از فراورده‌های گوشتی استفاده می‌گردد (۲). جهت تولید هیدروژل‌های طبیعی از ترکیبات مختلفی نظیر پروتئین‌ها (کلاژن، ژلاتین و...) و ترکیبات پلی ساکاریدی (نشاسته، کیتوزان، آلژینات و...) استفاده می‌شود (۳). در میان این سیستم‌ها، هیدروژل‌های مبتنی بر پروتئین به خصوص پروتئین آب پنیر به دلیل ارزش تغذیه‌ای بالا، خواص عملکردی مناسب و سازگاری زیستی، بیشتر مورد استقبال صنعت غذا قرار گرفته است (۴). در سال‌های اخیر استفاده ترکیبی از پروتئین و پلی ساکارید جهت بهبود ویژگی‌های عملکردی پروتئین آب پنیر و توسعه سیستم‌های هیدروژلی نوین (هیدروژل‌های هیبریدی) مورد توجه قرار گرفته است. پلی ساکاریدها بسته به عواملی نظیر ساختار، غلظت، جرم مولکولی، بار الکتریکی، pH و قدرت یونی دارای برهم‌کنش‌های متفاوت با پروتئین می‌باشند. لذا افزودن پلی ساکاریدها به ترکیبات پروتئینی سبب کنترل برخی از ویژگی‌های هیدروژل نظیر قدرت انتشار (۵) و در نهایت منجر به پدید آمدن خواص رئولوژیکی و بافتی منحصر به فرد در مواد غذایی می‌گردند (۶). بنابراین از این حیث مطالعه برهم‌کنش پروتئین-پلی ساکارید بسیار حائز اهمیت است.

میوه *آپونتیا (Opuntia stricta)* با نام متداول گل‌ابی کاکتوس به عنوان منبع تولید ترکیبات پلی ساکاریدی تحت عنوان موسیلاژ شناخته می‌شود. بخش موسیلاژ میوه *آپونتیا* نوعی شبکه سه‌بعدی به وجود

آمده از ترکیبات پلی ساکاریدی نظیر آرابینوز، گالاکتوز، رامنوز، زایلوز و پکتین می‌باشد که دارای خواص اسمزی بوده و توانایی بالایی در به دام انداختن آب دارد (۷). بنابراین از این ترکیب می‌توان به عنوان عامل سفت کننده در صنعت غذا بهره برد (۸). نتایج تحقیقات وی و همکاران (۲۰۱۴) و سائو و همکاران (۲۰۲۰) نیز نشان داد که با افزایش نسبت ترکیبات پلی ساکاریدی به پروتئین آب پنیر، ویسکوزیته مخلوط افزایش و سبب بهبود ساختار هیدروژلی پروتئین آب پنیر گردید (۹ و ۱۰). تاکنون مطالعات زیادی در زمینه برهم‌کنش پروتئین آب پنیر با ترکیبات پلی ساکاریدی انجام شده است. با این وجود گزارشی مبنی بر مطالعه برهم‌کنش ایزوله پروتئین آب پنیر-*آپونتیا* تحت عنوان هیدروژل‌های هیبریدی، موجود نمی‌باشد. لذا هدف از این مطالعه بررسی رفتار هیدروژل هیبریدی ایزوله پروتئین آب پنیر-*آپونتیا* (W-Op H) به لحاظ رفتار رئولوژیکی و ویژگی‌های بافتی به عنوان تابعی از غلظت پروتئین و پلی ساکارید بود.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه: مواد مورد استفاده در فرمولاسیون هیدروژل هیبریدی شامل ایزوله پروتئین آب پنیر با خلوص ۹۰ درصد (برند ژن استار، ایزوگلد) و میوه *آپونتیا (Opuntia stricta)* از مزارع نکاء در استان مازندران در ایران فراهم گردید. معرف فولین سیو کالتو، اتانول ۹۶ درصد، سولفات مس، سولفات سدیم، دی اکسید سلنیوم، سولفوریک اسید، سدیم هیدروکسید، بوریک اسید، متیل رد، هیدروکلریدریک اسید و پودر روی از شرکت مرک آلمان و سدیم کربنات از شرکت دائجانگ کره جهت اندازه‌گیری ترکیبات فنولی کل و پروتئین تهیه شدند. در شکل ۱ میوه و پودر پالپ میوه *آپونتیا* نشان داده شده است.



شکل ۱- میوه و پودر میوه آپونتیا
Figure 1. *Opuntia* fruit and fruit powder

ویژگی‌های بافتی: برای ارزیابی ویژگی‌های بافتی هیدروژل‌های هیبریدی از دستگاه بافت سنج (مدل TA-XT Plus، انگلستان) استفاده شد. در این آزمون مقداری از هیدروژل (با عمق ۵۰ میلی‌متر) درون کاپ مخصوص آزمون (بک اکستروژن مدل پس-رو) قرار داده شد و پروب استوانه‌ای (سرعت قبل از ورود ۱ mm/s، سرعت ورود ۱ mm/s، سرعت خروج ۱۰ mm/s و عمق نفوذ ۴۰ mm) وارد کاپ مخصوص گردید و ویژگی‌های بافتی نمونه نظیر سختی، قوام، چسبندگی و شاخص ویسکوزیته اندازه‌گیری شد (۱۴).

میزان تورم هیدروژل: جهت اندازه‌گیری میزان تورم در نمونه‌های هیدروژل، ابتدا نمونه‌های فاقد آب (زیروژل) با خشک کردن ۲۰ گرم نمونه هیدروژل به مدت ۷۲ ساعت در دستگاه خشک کن انجمادی تهیه گردید. سپس ۰/۱ گرم از نمونه زیروژل در ۳۰ میلی‌لیتر محلول بافر فسفات با pH=۷ غوطه‌ور شدند و ۲۴ ساعت در دمای اتاق به منظور تورم نگهداری و سپس آب اضافی توسط دستمال فیلتر جدا گردیده و هیدروژل‌های حاصل مجدداً وزن شدند و درصد تورم با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید (۱۵).

$$S\% = \frac{W_t - W_i}{W_i} \times 100 \quad \text{معادله ۱}$$

W_t = وزن نمونه‌ها بعد از تورم، W_i = وزن نمونه زیروژل

ظرفیت نگهداری آب هیدروژل: جهت اندازه‌گیری ظرفیت نگهداری آب نمونه‌های هیدروژل، ۵ گرم نمونه داخل لوله فالکون قرار گرفت و با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ (۵۵۰۰ rpm به مدت ۱۵ min در دمای ۲۵°C) آب آزاد گردید و درصد ظرفیت نگهداری آب با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید (۱۶).

فرمولاسیون هیدروژل هیبریدی (W-Op H): پالپ میوه آپونتیا پس از پوست‌گیری و جداسازی دانه‌ها، به مدت ۷۳ ساعت با استفاده از خشک کن هوای گرم (خشک کردن غیر مستقیم، دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت) و توسط آسیاب نیمه صنعتی (مدل Best 100) به صورت پودر درآمده و از الک با مش ۴۰ عبور داده شدند. هیدروژل‌های پایه آپونتیا (غلظت ۲۰ درصد وزنی-وزنی) و ایزوله پروتئین آب پنیر (غلظت ۱۵ درصد وزنی-وزنی) بر اساس روش اوچیو و همکاران (۲۰۱۶) با اعمال حرارت در دمای ۹۰°C به مدت ۶ دقیقه تهیه شدند (۵). در ادامه با نسبت‌های مختلف (۲۰-۸۰، ۳۰-۷۰، ۴۰-۶۰ و ۵۰-۵۰ W/Op) و با استفاده از همزن برقی (برند تفال) با دور آهسته به مدت ۱ دقیقه ترکیب شدند. هیدروژل هیبریدی حاصل جهت بررسی بر هم‌کنش پروتئین-پلی‌ساکارید به مدت ۲ ساعت در دمای ۴°C در یخچال نگهداری شد.

آزمون‌های پودر میوه آپونتیا: ویژگی‌های اولیه پودر میوه آپونتیا نظیر رطوبت، خاکستر، pH و اندازه ذرات پودر به ترتیب مطابق استانداردهای ۱۱۰۷۴، ۱۱۹۷، ۱۷۲۰۲ و ISO 8130-1 تعیین شد. محتوی فنولی کل نیز مطابق روش اکسیداسیون و احیاء معرف فولین سیو کالتو صورت گرفت (۱۱). میزان پروتئین بر اساس روش ماهر و همکاران (۲۰۱۸) و کربوهیدرات و چربی بر اساس روش شهنواز و همکاران (۲۰۰۹) اندازه‌گیری شدند (۱۳ و ۱۲).

$$\text{معادله ۲} \quad \text{WHC} = \frac{\text{WS}-\text{WR}}{\text{WR}} \times 100$$

WS = وزن نمونه‌ها پس از سانتریفیوژ و جداسازی آب،
WR = وزن نمونه‌ها قبل از سانتریفیوژ

ویژگی‌های رئولوژیکی مخلوط هیدروژلی: جهت بررسی خصوصیات ویسکوالاستیک هیدروژل‌ها از دستگاه رئومتر آنتون پار (مدل MCR 302، اتریش) و آزمون روبشی-فرکانس استفاده گردید. قبل از انجام هر آزمون برای نمونه‌های هیدروژل، جهت تعیین حد بالای منطقه ویسکوالاستیک خطی برای کرنش ۰/۳، تست رفت و برگشتی کرنش در فرکانس ثابت ۱ (rad/s) انجام شد. جهت بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی نمونه‌ها از اسپیندل مخروط و صفحه با زاویه مخروط ۴° و قطر صفحه ۱۹/۵۷ میلی‌متر استفاده شد. مقدار ۲۵ گرم از نمونه بین مخروط و صفحه قرار داده شده و نرخ برش (s⁻¹) ۳۰۰-۰/۳، دما ۴ درجه سانتی‌گراد، گپ پروب مخروط با صفحه ۱ میلی‌متر، کرنش ۱۰۰-۰/۰۰۱ درصد و فرکانس ۱ (rad/s) تنظیم گردید. در نهایت پارامترهای مدول الاستیک، مدول ویسکوز، ویسکوزیته کمپلکس و تانژانت اتلاف اندازه‌گیری شد (۱۷).

اندازه‌گیری شاخصه‌های رنگی پودر پالپ میوه آپونتیا: ارزیابی ویژگی‌های رنگی پودر پالپ آپونتیا با استفاده از دستگاه لایویند صورت گرفت و نتایج رنگ سنجی به صورت شاخص‌های رنگی *L، *a، *b بیان شد. فضای رنگی از سه مولفه *L که معادل روشنایی تصویر (بین ۰ معادل مشکی و ۱۰۰ معادل انعکاس کامل نور)، مولفه *a دارای مقادیر نامحدود (مقادیر مثبت معادل رنگ قرمز و مقادیر منفی معادل رنگ سبز) و مقادیر مولفه *b نیز نامحدود می‌باشد (مقادیر مثبت معادل رنگ زرد و مقادیر منفی معادل رنگ آبی) (شهیدی و همکاران، ۱۳۸۷).

اندازه‌گیری pH: جهت اندازه‌گیری pH نمونه‌های هیدروژل طبق استاندارد ۱۷۲۰۲ عمل گردید.

تجزیه و تحلیل آماری: تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (SAS Enterprise Guide) نسخه ۹/۴ و در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی و با استفاده از آنالیز واریانس در سه تکرار صورت گرفت. سپس میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد با یکدیگر مقایسه شدند.

نتایج و بحث

ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پودر میوه آپونتیا: با توجه به اهمیت نقش ترکیبات تشکیل دهنده پودر میوه آپونتیا در محصول نهایی، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی پودر میوه آپونتیا (بر مبنای وزن خشک) در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون‌ها نشان داد که پودر میوه آپونتیا دارای رطوبت ۷/۳۳±۰/۰۰۵ (%، ماده خشک ۸/۳۳±۰/۰۰۵ (%، خاکستر ۹۲/۰±۶۷/۵۷ (%، پروتئین ۱۳/۴±۰/۰۷ (%، کربوهیدرات ۷۵/۴۹±۰/۰۵ (%، چربی ۳/۰±۶۶/۰۹ (%، pH برابر با ۳/۲۳ و ترکیبات فنولی کل برابر با ۳۸۷/۰۰ بر مبنای اسید گالیک بود. همچنین اندازه ذرات پودر برابر با ≥ 25 میکرون تعیین گردید. شاخص‌های رنگ‌سنجی پودر نشان داد که مقادیر *a برابر با $16/23 \pm 0/46$ ، *b برابر با $2/4 \pm 0/0$ و *L برابر با $31/0 \pm 0/4$ بود که نشان دهنده وجود رنگ قرمز روشن (صورتی) در پودر میوه آپونتیا بود.

ارزیابی ویژگی‌های بافتی هیدروژل‌های هیبریدی ایزوله پروتئین آب پنیر-پالپ آپونتیا (W-Op H): نتایج آنالیز آماری نشان داد که افزایش نسبت هیدروژل آپونتیا (Op) به هیدروژل پروتئین آب پنیر (W) در نمونه‌های هیدروژل هیبریدی، سبب افزایش معنادار ویسکوزیته در مقایسه با نمونه شاهد (هیدروژل پروتئین آب پنیر) گردیده است ($P \leq 0/05$). ویسکوزیته مخلوط‌های هیدروژلی به عواملی نظیر میزان برهمکنش

الکترواستاتیک بین گروه‌های کروکسیل مربوط به ترکیبات پلی ساکاریدی و پروتئین آب پنیر و همینطور ساختار امولسیون وابسته است. در حقیقت هیدروژل آپونتیا در ترکیب W-Op H دارای مقدار فراوانی آرابینوگالکتان بوده که این ترکیب در محدوده $\text{pH} < 7$ و $3/5 < \text{Op/W}$ دارای بار منفی می‌باشد (۱۸). از آنجایی که نقطه ایزوالکتریک پروتئین آب پنیر برابر با $4/8$ بوده (۱۹) و در این نقطه تعداد بارهای مثبت و منفی پروتئین آب پنیر برابر شده و به تبع آن رسوب رخ می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که در این pH میزان ویسکوزیته مخلوط پروتئینی افزایش می‌یابد. همانطور که در جدول ۱ ذکر شده است، به ترتیب بیشترین و کمترین میزان ویسکوزیته متعلق به هیدروژل هیبریدی ($3/68 \text{ N.sec}$) و $62 \pm 34 \text{ N.sec}$ C و $29/54 \pm 4/34 \text{ N.sec}$ B بود. بنابراین می‌توان گفت ویسکوزیته مخلوط هیدروژلی با pH این ترکیب در ارتباط است. میزان pH مربوط به هیدروژل‌ها در جدول ۱ آورده شده است. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که با افزایش نسبت Op به W در ترکیب W-Op H، pH نمونه‌ها به صورت معناداری کاهش یافت ($P \leq 0/05$). هیدروژل هیبریدی ($60-40$) Op/W : C دارای pH برابر با $4/34 \pm 0/6$ بود. در این pH، تراکم بارهای مثبت ناشی از پروتئین آب پنیر و به دنبال آن برهمکنش بین مولکول‌های پروتئین و ترکیبات پلی ساکاریدی هیدروژل آپونتیا با بار منفی افزایش یافته و همزمان با برقراری پیوند، مولکول‌های آب به دام می‌افتد که در نتیجه سبب افزایش ویسکوزیته گردیده است. نتایج این پژوهش با تحقیقات وی و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت داشت. این محققین اظهار داشتند که کاهش pH تا محدوده $4/3$ سبب افزایش برهمکنش بین ایزوله پروتئین آب پنیر و صمغ پوکا گردیده و لذا میزان ویسکوزیته در سوسپانسیون افزایش یافت. نمونه $20-80 \text{ Op/W}$: A دارای pH برابر با $4/94$ و دارای بیشترین نسبت

هیدروژل ایزوله پروتئین آب پنیر نسبت به سایر نمونه‌ها بود. از این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که در pH بالاتر از نقطه ایزوالکتریک، مولکول‌های پروتئین آب پنیر دارای بار منفی بوده و در نتیجه دافعه الکترواستاتیک بین مولکول‌های پلی ساکارید و پروتئین افزایش یافت که تا حدودی این امر منجر به باز شدن رشته‌های پروتئینی، گسترده‌تر شدن شعاع چرخش مولکول‌های پروتئین آب پنیر و قرارگیری مولکول‌های آب در لابه لای شبکه پروتئین-پلی ساکارید گردیده که در نهایت سبب افزایش ویسکوزیته نمونه A نسبت به نمونه B گردیده است (۲۰). از طرفی ویسکوزیته نمونه A و B در مقایسه با سایر نمونه‌ها کمتر بود که می‌توان نتیجه گرفت با افزایش غلظت هیدروژل W به Op، بر همکنش الکترواستاتیک بین پروتئین و پلی ساکارید کاهش یافته که در نتیجه ویسکوزیته ترکیب W-Op H به دلیل حضور مقادیر بالای پروتئین در محیط، لخته شدن و کاهش پایداری استریک^۱ کاهش یافت (۹). سائو و همکاران (۲۰۲۰) نیز در ارتباط با تاثیر غلظت بر ویسکوزیته اظهار داشتند که با افزایش غلظت پروتئین آب پنیر نسبت به پکتین در مخلوط هیدروژلی، میزان ویسکوزیته کاهش یافته است. در نمونه D نیز به دلیل کاهش شدید pH تا محدوده ۴ بخشی از پروتئین‌های آب پنیر دناتوره شده و قابلیت جذب آب و برهمکنش الکترواستاتیک خود را از دست داده‌اند. بنابراین میزان ویسکوزیته نسبت به نمونه C کاهش یافته است. نتایج این پژوهش با تحقیقات وی و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت داشت. بر اساس نتایج به دست آمده از این تحقیق، نمونه هیدروژل آپونتیا و نمونه $60-40 \text{ Op/W}$: C، دارای بیشترین انسجام و پیوستگی بودند. از آنجایی که انسجام و پیوستگی تابعی از ویسکوزیته می‌باشد (۲۱)، بنابراین در هیدروژل‌هایی که ویسکوزیته افزایش یافته، انسجام و پیوستگی نیز افزایش یافت.

1. Steric stabilization

نمونه (Op/W: ۶۰-۴۰) دارای بیشترین میزان سفتی (۱/۰±۶۱/۲۷ N) در بین سایر نمونه‌ها بود و کمترین میزان سفتی متعلق به نمونه W (۰/۰±۰۲/۰۰۱ N) بود که این امر نشان دهنده وجود انسجام کمتر در ساختار هیدروژلی پروتئین آب پنیر در مقایسه با هیدروژل آپونتیا بود. نتایج این پژوهش با یافته‌های گلیبوفسکی و همکاران (۲۰۰۹) مطابقت داشت. این محققین اظهار داشتند که افزایش نسبت اینولین به پروتئین آب پنیر در مخلوط هیدروژلی سبب افزایش سفتی بافت و ویسکوزیته در مقایسه با نمونه شاهد (پروتئین آب پنیر) گردیده است.

افزایش نسبت هیدروژل آپونتیا به هیدروژل ایزوله پروتئین آب پنیر سبب افزایش میزان چسبندگی در تمامی تیمارها در مقایسه با هیدروژل ایزوله پروتئین آب پنیر گردیده است. تحقیقات فنگ و همکاران (۲۰۱۸) نیز نشان داد که افزودن ترکیبات پلی ساکاریدی نظیر صمغ زانتان به پروتئین سویا به صورت قابل توجهی سبب افزایش چسبندگی پروتئین سویا گردیده است (۲۲). مقایسه میانگین بین سفتی نمونه‌ها نشان داد که بین سفتی بافت نمونه‌های Op (۲۰ درصد وزنی - وزنی) و C در مقایسه با سایر هیدروژل‌های هیبریدی اختلاف معنادار ($P \leq 0/05$) وجود دارد (جدول ۴-۲).

جدول ۱- مقایسه میانگین pH، ویسکوزیته، انسجام، سفتی و چسبندگی بافت هیدروژل‌ها

Table 2- Comparison of average of pH, viscosity, cohesion, hardness and tissue adhesion of hydrogels

چسبندگی adhesiveness (N.sec)	سختی hardness (N)	انسجام consistency (N.sec)	ویسکوزیته Viscosity (N.sec)	pH	تیمار Treatment
-4.86±0.00 ^a	1.64±0.02 ^a	37.45±0.03 ^a	37.24±0.06 ^a	3.43±0.17 ^f	هیدروژل آپونتیا (Op)
-0.31±0.02 ^c	0.02±0.001 ^c	4.01±0.01 ^c	3.72±0.00 ^c	6.96±0.00 ^a	هیدروژل ایزوله پروتئین آب پنیر (W)
-3.90±0.27 ^b	1.18±0.18 ^b	31.12±2.26 ^b	33.05±2.51 ^{ab}	4.94±0.01 ^b	A (Op/W: 20-80)
-4.15±0.23 ^b	1.27±0.17 ^b	30.15±4.49 ^b	29.54±4.34 ^b	4.6±0.03 ^c	B (Op/W: 30-70)
-4.76±0.5 ^a	1.61±0.27 ^{ab}	36.07±4.26 ^a	34.62±3.68 ^{ab}	4.34±0.06 ^d	C (Op/W: 40-60)
-4.46±0.46 ^{ab}	1.42±0.23 ^{ab}	33.72±4.89 ^{ab}	30.29±6.40 ^{ab}	4.1±0.06 ^e	D (Op/W: 50-50)

* اعداد به صورت میانگین ± انحراف معیار سه تکرار آزمون گزارش شده است. حروف لاتین کوچک متفاوت در هر ستون نشان دهنده اختلاف معنادار آماری در سطح ۵ درصد می‌باشد.

*Data reported as mean ± standard division of triplicate analysis. Different lowercase letters in each column indicate a significant difference ($p < 0.05$).

ایزوله پروتئین آب پنیر به صمغ دانه میوه خارگیل^۱ سبب کاهش ظرفیت نگهداری آب نمونه نسبت به صمغ این میوه به تنهایی گردیده است (۲۳). ظرفیت نگهداری آب توسط پلی مر به عواملی نظیر شرایط ترکیب شدن پروتئین و پلی ساکارید (pH اسیدی، حرارت و...)، میزان برقراری پیوند بین پروتئین و پلی ساکارید و آب‌گریزی سطحی پلی مر بستگی دارد (۱۳). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه

ارزیابی ظرفیت نگهداری آب هیدروژل‌های هیبریدی ایزوله پروتئین آب پنیر-پالپ آپونتیا (W-Op H): نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش نسبت هیدروژل آپونتیا، ظرفیت نگهداری آب در تمامی نمونه‌های هیدروژل هیبریدی به صورت معناداری ($P \leq 0/05$) در مقایسه با شاهد پروتئینی (پروتئین آب پنیر) افزایش یافت (جدول ۲). نتایج این پژوهش با تحقیقات طباطبایی و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت داشت. این محققین اظهار داشتند که افزودن

هیدروژل آپونتیا که محتوی مقادیر بالایی از ترکیبات پلی ساکاریدی بود، به دام افتادن آب توسط شبکه سه بعدی سبب کاهش میزان آنروپی بین مولکولی گردیده و در نتیجه کاهش تحرک مولکولی و افزایش میزان پیوندهای هیدروژنی با مولکول‌های مجاور منجر به تشکیل ساختار سه بعدی بزرگتر با چگالی کمتر شد که می‌تواند سبب کاهش فشار اسمزی و کشش مولکول‌های آب به داخل شبکه گردیده و در نهایت سبب افزایش ظرفیت جذب آب در نمونه (۶۰-۴۰) C (Op/W) نسبت به سایر نمونه‌ها شود (۲۴). بر اساس نتایج به دست آمده از این تحقیق pH پایین هیدروژل آپونتیا دارای اثر منفی بر ظرفیت نگهداری هیدروژل‌های هیبریدی (W-Op H) نبود.

تاثیر افزایش نسبت هیدروژل آپونتیا در میزان تورم هیدروژل‌های هیبریدی (W-Op H): همانطور که در جدول ۲ نشان داده شد، افزایش نسبت هیدروژل آپونتیا به ایزوله پروتئین آب پنی سبب افزایش معنادار نرخ تورم نمونه‌ها گردید ($P \leq 0/05$). به گونه‌ای که نمونه هیدروژل آپونتیا و هیدروژل ایزوله پروتئین آب پنی به ترتیب دارای بیشترین ($42/89 \pm 694/71$) درصد و کمترین نرخ تورم ($7/19 \pm 340/22$ درصد) در بین سایر نمونه‌ها بودند. همچنین ارتباط معناداری بین میزان ظرفیت نگهداری آب و تورم مخلوط‌های هیدروژلی مشاهده شد. به طوری که با افزایش ظرفیت نگهداری آب، میزان تورم در نمونه‌های هیدروژل افزایش یافت. ژائو و همکاران (۲۰۲۱) نیز بیان کردند خاصیت تورم ژل دارای ارتباط تنگاتنگ با ظرفیت جذب آب نمونه‌های پلی مری می‌باشد (۲۵). علت کاهش درصد تورم در نمونه (Op/W: ۲۰-۸۰) A را می‌توان به مقادیر بالای ایزوله پروتئین آب پنی نسبت داد. طبق تئوری فلوری-رهنر^۱ در غلظت‌های بالای پروتئین، چگالی شبکه پروتئین افزایش یافته که در

نتیجه منجر به کاهش نرخ تورم می‌گردد (۲۶). از طرفی هیدروژل آپونتیا دارای بیشترین ظرفیت نگهداری آب بوده و بنابراین بدیهی است که با افزایش نسبت این هیدروژل در ترکیب هیدروژل‌های هیبریدی ظرفیت جذب و نگهداری آب و نرخ تورم افزایش یابد. در شکل ۲ زیروژل و هیدروژل تورم یافته نشان داده شده است.

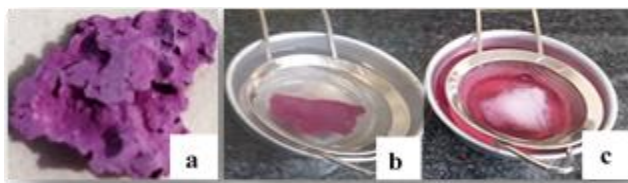
ارزیابی ویژگی‌های رئولوژیکی هیدروژل‌های

هیبریدی ایزوله پروتئین آب پنی-آپونتیا (W-OpH):

تغییرات مدول الاستیک و ویسکوز به عنوان تابعی از فرکانس در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود، مقادیر مدول الاستیک در تمامی نمونه‌ها از مدول ویسکوز بیشتر بود. بالاتر بودن مقادیر مدول الاستیک نسبت به مدول ویسکوز نشان دهنده رفتار شبه جامد نمونه‌های هیدروژل بود. به عبارتی هیدروژل‌هایی با مدول الاستیک بالاتر دارای برهمکنش‌های بیشتر و پایداری بالاتری در محدوده ویسکوالاستیک خطی و محدوده ویسکوالاستیک خطی گسترده‌تری داشتند (۱۷).

نتایج این تحقیقات با یافته‌های مدینا-تورس و همکاران (۲۰۰۰) مطابقت داشت. این محققین اظهار داشتند که با افزایش غلظت صمغ موسیلاژ آپونتیا فیکوس/یندیکا در محلول آبی، همواره میزان مدول ذخیره از مدول ویسکوز بیشتر و تمایل مولکول‌ها به تشکیل ماکرومولکول و ایجاد شبکه سه بعدی افزایش یافت که این امر منجر به تقویت رفتار الاستیک صمغ موسیلاژ آپونتیا در غلظت‌های بالا گزارش گردید (۲۷). در بین هیدروژل‌های هیبریدی، نمونه (Op/W: ۲۰-۸۰) A و (Op/W: ۴۰-۶۰) C بالاترین مقدار G' و G'' و نمونه (Op/W: ۵۰-۵۰) D کمترین مقدار مدول ذخیره و افت را به خود اختصاص دادند.

1. Flory- rehner, s swelling ratio theory



شکل ۲- a: زیروژل، b: تورم در ساعت صفر، c: تورم پس از ۲۴ ساعت
Figure 2- a: Xerogel; b: Swelling Ratio at the start time; c: Swelling Ratio after 24 hours

جدول ۲- ظرفیت نگهداری آب و نرخ تورم هیدروژل‌های هیبریدی

Table 2. Water holding capacity and swelling ratio of hybrid hydrogels

نرخ تورم Swelling Ratio (%)	ظرفیت نگهداری آب Water Holding Capacity (%)	تیمار Treatment
694.71±42.89 ^a	100±0 ^a	هیدروژل آپونتیا (Op)
340.22±7.19 ^e	64.22±2.25 ^b	هیدروژل ایزوله پروتئین آب پنیر (W)
393.33±40.41 ^{de}	98.6±0.52 ^a	A (Op/W: 20-80)
427.00±63.92 ^{cd}	99.53±0.23 ^a	B (Op/W : 30-70)
495.66±30.92 ^{bc}	99.93±0.11 ^a	C (Op/W : 40-60)
543.66±43.89 ^b	100±0 ^a	D (Op/W : 50-50)

* اعداد به صورت میانگین ± انحراف معیار سه تکرار آزمون گزارش شده است. حروف لاتین کوچک متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف معنادار آماری در سطح ۵ درصد می‌باشد.

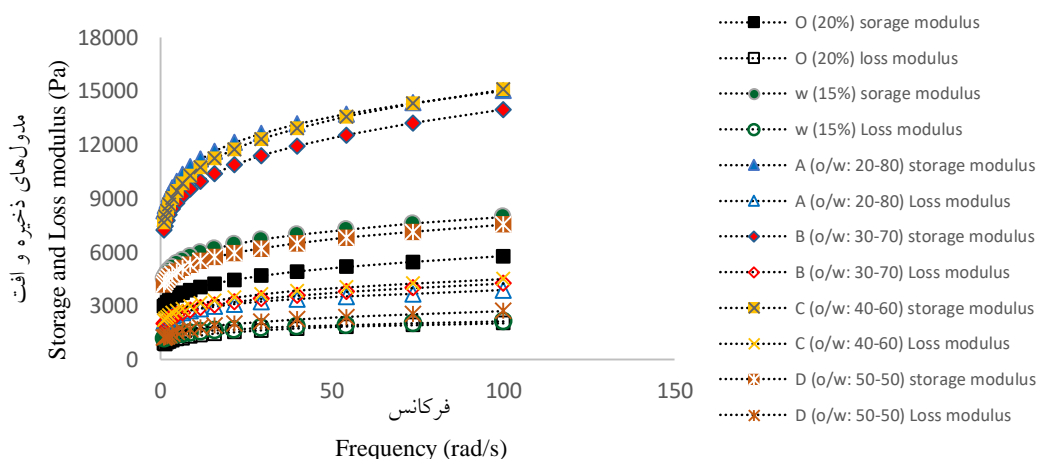
* Data reported as mean ± standard division of triplicate analysis. Different lowercase letters in each column indicate a significant difference ($p>0.05$).

هیدروژل آپونتیا بود و چنین به نظر می‌رسد که افزودن هیدروژل ایزوله پروتئین آب پنیر به هیدروژل آپونتیا سبب تقویت رفتار الاستیک در هیدروژل‌های هیبریدی (W-Op H) گردیده است. در تحقیقی مشابه، تاواریس و داسیلوا (۲۰۰۳) اثر گالاکتومانان بر ویژگی‌های رئولوژیکی پروتئین آب پنیر در pH اسیدی و خنثی را مورد بررسی قرار دارند. این محققین اظهار داشتند که ژل پروتئینی در pH خنثی دارای رفتار ویسکوالاستیک بوده و رفتار الاستیک پروتئین با افزودن گالاکتومانان تقویت گردید (۱۴). تانژانت اتلاف ($\tan \delta$) به صورت نسبت مدول ذخیره به مدول افت تعریف می‌شود که روشی برای ارزیابی رفتار ویسکوالاستیک هیدروژل‌ها می‌باشد. همانطور که می‌دانیم تانژانت افت کمتر و بیشتر از یک به ترتیب بیانگر رفتار الاستیک و ویسکوز غالب می‌باشد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، تانژانت اتلاف مربوط به تمامی نمونه‌های هیدروژل بین ۰/۲۴

به نظر می‌رسد که این امر به دلیل وجود دافعه الکترواستاتیک ناشی از دور بودن pH نمونه‌ها از نقطه ایزوالکتریک پروتئین که زمینه را جهت افزایش فضا برای به دام انداختن مولکول‌های آب در شبکه مهیا نموده، باشد. در این پژوهش با توجه به کاهش آب آزاد در محصول، نمونه‌ها از نرمی کمتر و یا به عبارتی از الاستیسیته بیشتری برخوردار بودند. نتایج تحقیقات خالصی و همکاران (۱۳۹۵) در زمینه تاثیر صمغ فارسی بر ویژگی‌های رئولوژیکی ژل سرد کنسانتره پروتئین آب پنیر در شرایط خنثی و اسیدی نیز نشان داد که ژل‌های اسیدی به دلیل ایجاد پیوندهای الکترواستاتیک، خواص الاستیک بیشتری نسبت به ژل‌های مشابه در pH خنثی دارند. اما در نمونه D به دلیل کاهش شدید pH، شبکه ژلی ضعیف با خاصیت الاستیسیته پایین‌تر و نرمی بیشتر تشکیل شده است (۲۶). علاوه بر این نمونه هیدروژل ایزوله پروتئین آب پنیر دارای خاصیت الاستیسیته بالاتری نسبت به نمونه

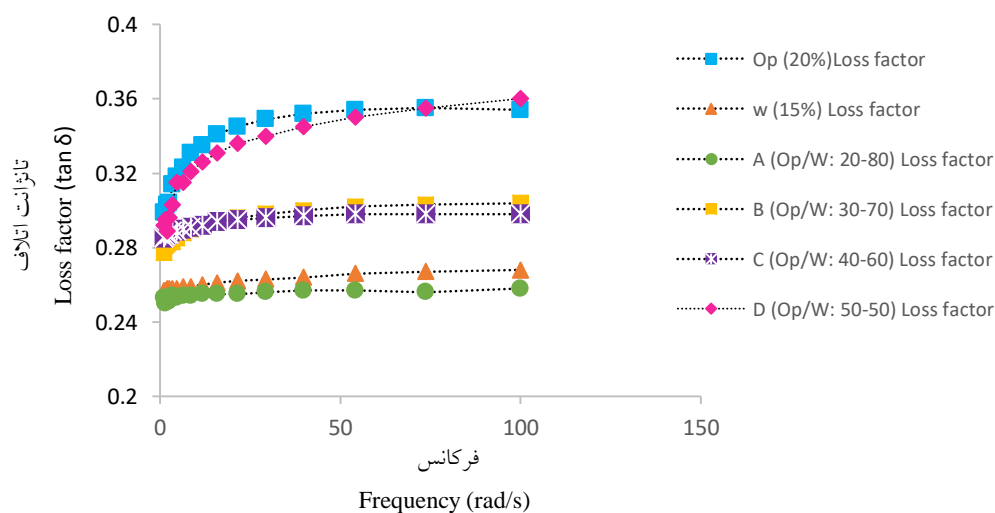
(۲۹). نتایج ارتباط بین ویسکوزیته کمپلکس (η^*) مخلوط‌های هیدروژلی با فرکانس در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش فرکانس، ویسکوزیته کمپلکس نمونه‌ها کاهش یافت که این امر نشان‌دهنده رفتار غیرنیوتنی و روان شوندگی با برش بود. که از این حیث با نتایج با تحقیقات صالحی و همکاران (۱۳۹۶) مبنی بر رفتار رقیق‌شوندگی با برش در صمغ میوه گلابی کاکتوس مطابقت داشت. به عبارتی دیگر صمغ میوه کاکتوس جزء صمغ‌هایی با ویسکوزیته پایین تلقی گردید (۳۰).

تا $0/36$ بود که می‌توان دریافت نمونه‌های تولیدی، شبه ژل بوده و رفتار الاستیک در آن‌ها غالب‌تر از رفتار ویسکوز بود. در گزارش ماندالا و همکاران (۲۰۰۴) نیز بیان گردید که مقادیر تانژانت افت بین $0/1$ و 1 به معنی تشکیل ساختاری بین یک زیست پلی‌مر با غلظت بالا و ژل واقعی بود (۲۸). به عبارتی دیگر وابسته بودن مقادیر مدول ذخیره و افت به فرکانس سبب طبقه بندی مخلوط هیدروژلی تولیدی در دسته ژل‌های فیزیکی که با اعمال نیرو حساسیت بیشتری نسبت به تخریب نشان می‌دهند می‌گردد



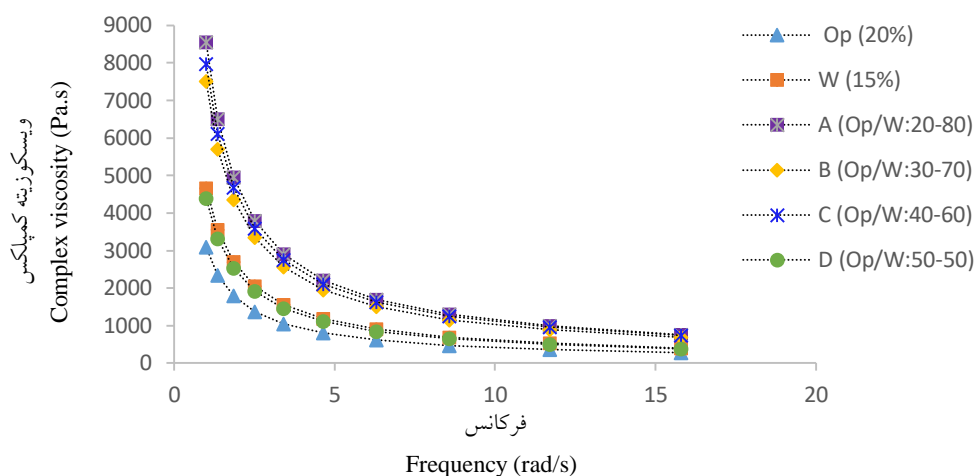
شکل ۳- تاثیر فرکانس بر مدول‌های ذخیره و افت نمونه‌های هیدروژل

Figure 3: Frequency effect on storage modulus and loss modulus of hydrogels



شکل ۴- تاثیر فرکانس بر تانژانت اتلاف نمونه‌های هیدروژل

Figure 4. Frequency effect on loss factor of hydrogels



شکل ۵- تاثیر فرکانس بر ویسکوزیته کمپلکس نمونه‌های هیدروژل
Figure 5. Frequency effect on complex viscosity of hydrogels

مطالعه رفتار فیزیکی هیدروژل‌های هیبریدی نشان داد که در بین نمونه‌های تولیدی، نمونه C با نسبت اختلاط ۴۰ گرم هیدروژل آپونتیا ۲۰ درصد (وزنی-وزنی) و ۶۰ گرم هیدروژل ایزوله آب پروتئین ۵ درصد (وزنی-وزنی)، به دلیل دارا بودن بالاترین ظرفیت نگهداری آب و نرخ تورم، بیشترین میزان ویسکوزیته و خواص الاستیک مطلوب (بالاترین مدول ذخیره و افت) به عنوان نمونه مطلوب جهت استفاده در صنعت غذا (بستنی، سس، انواع دسرهای لبنی، ماست و...) به عنوان عامل سفت کننده و بافت دهنده معرفی گردید.

نتیجه گیری

در این پژوهش بخش موسیلاژی میوه آپونتیا تحت عنوان هیدروژل پالپ آپونتیا، در ترکیب با هیدروژل پروتئین آب پنیر در تولید سیستم‌های هیدروژلی نوین (هیدروژل‌های هیبریدی) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که افزودن هیدروژل پالپ آپونتیا به هیدروژل پروتئین آب پنیر سبب افزایش معنی دار و قابل توجه ظرفیت نگهداری آب و به تبع آن نرخ تورم (در مقایسه با شاهد پروتئینی) گردید که این امر در جهت بهبود رفتار جذب آب هیدروژل پروتئین آب پنیر بود.

References

- Argin, S., Kofinas, P. and Lo, Y.M.. 2014. The cell release kinetics and the swelling behavior of physically crosslinked xanthan-chitosan hydrogels in simulated gastrointestinal conditions. *Food Hydrocolloids*. 40: 138-144.
- Zhang, H., Zhang, F. and Yuan, R..2020. Applications of natural polymer-based hydrogels in the food industry. In *Hydrogels based on natural polymers*. 357-410.
- Shivani, A. and Shetye, P. 2015. *Hydrogels: Introduction, Preparation, Characterization and Applications*. *IJRM Human*. 1(1): 47-71.
- Abae, A., Mohammadian, M. and Jafari, S.M. 2017. Whey and soy protein-based hydrogels and nano-hydrogels as bioactive delivery systems. *Trends in Food Science & Technology*. 70: 69-81.
- Ozel, B., Aydin, O. and Oztop, M.H. 2020. In vitro digestion of polysaccharide including whey protein isolate hydrogels. *Carbohydrate polymers*. 229: 115469.
- Sarabi-Aghdam, V., Hosseini-Parvar, S.H., Motamedzadegan, A. and Matia-Merino,

- L. 2012. An investigation on the interactions between Basil seed gum and whey protein isolate in aqueous systems. 15-35.
7. Sepúlveda, E.S.C.A.E., Sáenz, C., Aliaga, E. and Aceituno, C. 2007. Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of arid environments*. 68(4): 534-545.
8. Sáenz, C., Sepúlveda, E. and Matsuhira, B. 2004. *Opuntia* spp mucilage's: a functional component with industrial perspectives. *Journal of arid environments*. 57(3): 275-290.
9. Cao, C., Zhao, S., Chen, J., Wang, H., Liu, Q. and Kong, B. 2020. Physical properties and stability of filled hydrogel particles based on biopolymer phase separation: Influence of the ratio of protein to polysaccharide. *International journal of biological macromolecules*. 142: 803-810.
10. Wee, M.S., Nurhazwani, S., Tan, K.W., Goh, K.K., Sims, I.M. and Matia-Merino, L. 2014. Complex coacervation of an arabinogalactan-protein extracted from the *Meryta sinclarii* tree (puka gum) and whey protein isolate. *Food Hydrocolloids*. 42: 130-138.
11. Kharrat, N., Salem, H., Mrabet, A., Aloui, F., Triki, S., Fendri, A. and Gargouri, Y. 2018. Synergistic effect of polysaccharides, betalain pigment and phenolic compounds of red prickly pear (*Opuntia stricta*) in the stabilization of salami. *International journal of biological macromolecules*. 111: 561-568
12. Shahnawaz, M., Sheikh, S.A. and Nizamani, S.M. 2009. Determination of nutritive values of Jamun fruit (*Eugenia jambolana*) products. *Pakistan Journal of Nutrition*. 8(8): 1275-1280.
13. Mæhre, H.K., Dalheim, L., Edvinsen, G.K., Elvevoll, E.O. and Jensen, I.J. 2018. Protein determination—method matters. *Foods*. 7(1): 5.
14. Tavares, C. and da Silva, J.L. 2003. Rheology of galactomannan–whey protein mixed systems. *International Dairy Journal*. 13(8): 699-706.
15. Slavutsky, A.M. and Bertuzzi, M.A. 2019. Formulation and characterization of hydrogel based on pectin and brea gum. *International journal of biological macromolecules*. 123: 784-791.
16. de Moraes, M.C. and Cunha, R.L. 2013. Gelation property and water holding capacity of heat-treated collagen at different temperature and pH values. *Food Research International*. 50(1): 213-223.
17. Niknam, R., Ghanbarzadeh, B., Ayaseh, A. and 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.
18. Yahia, E. M. 2011. *Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits*. Volume 3: cocona to mango, Woodhead Publishing Ltd, Mexico, 590 p.
19. Burrington, K.J. 2012. *Whey protein heat stability*. Estados Unidos.
20. Benoit, S.M., Afizah, M.N., Ruttarattanamongkol, K. and Rizvi, S.S.H. 2013. Effect of pH and temperature on the viscosity of texturized and commercial whey protein dispersions. *International Journal of Food Properties*. 16(2): 322-330.
21. O'Chiu, E. and Vardhanabhuti, B. 2017. Utilizing whey protein isolate and polysaccharide complexes to stabilize aerated dairy gels. *Journal of dairy science*. 100(5): 3404-3412.
22. Feng, C., Wang, F., Xu, Z., Sui, H., Fang, Y., Tang, X. and Shen, X. 2018. Characterization of soybean protein adhesives modified by xanthan gum. *Coatings*. 8(10): 342.
23. Amid, B.T., Mir Hosseini, H., Poorazarang, H. and Mortazavi, S.A. 2013. Implications of partial conjugation of whey protein isolate to durian seed gum through maillard reactions: foaming properties, water holding capacity and interfacial activity. *Molecules*. 18(12): 15110-15125.
24. Bellissent-Funel, M.C. 2001. Structure of confined water. *Journal of Physics. Condensed Matter*. 13(41):9165.
25. Zhao, Y., Xue, S., Zhang, X., Zhang, T. and Shen, X. 2021. Improved Gel Properties of Whey Protein-Stabilized

- Emulsions by Ultrasound and Enzymatic Cross-Linking. *Gels*. 7(3): 135
26. Khalesi, H., Emadzadeh, B., Kadkhodae, R. and Fang, Y. 2019. Effect of Persian gum on whey protein concentrate cold-set emulsion gel: Structure and rheology study. *International Journal of Biological macromolecules*. 125: 17-26.
27. Medina-Torres, L., Brito-De La Fuente, E., Torrestiana-Sanchez, B. and Katthain, R. 2000. Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). *Food hydrocolloids*. 14(5): 417-424.
28. Mandala, I., et al. 2004. "Xanthan and locust bean gum influence on the rheology and structure of a white model-sauce." *Journal of Food Engineering* 64(3): 335-342.
29. Adapa, S., Dingeldein, H., Schmidt, K.A. and Herald, T.J. 2000. Rheological properties of ice cream mixes and frozen ice creams containing fat and fat replacers. *Journal of dairy science*. 83(10): 2224-2229.
30. Salehi, E., Emam-Djomeh, Z., Askari, G. and Fathi, M. 2019. *Opuntia ficus indica* fruit gum: Extraction, characterization, antioxidant activity and functional properties. *Carbohydrate polymers*. 206: 565-572.

