مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران
سال بیست و یکم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، صفحات ۸۱-۷۱

بررسی مقایسه ای هیدروژل های پلی ساکاریدی اینولین و پروتئینی آب پنیر بر خواص ریز ساختاری، رئولوژیک و بافتی ژل های هیبریدی و مایونز تجاری

سارا رزاقی[۱]، کوشان نایب زاده[۲]، سیده مرضیه حسینی[۳]، کیانا حسیبی[۱]، لیلا میرمقتدایی[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، انستیتو تحقیقات تغذیه ای و صنایع غذایی کشور، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

۲-نویسنده مسئول: استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، انستیتو تحقیقات تغذیه ای و صنایع غذایی کشور، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران. پست الکترونیکی: knayebz@sbmu.ac.ir

۳- استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، انستیتو تحقیقات تغذیه ای و صنایع غذایی کشور، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

۴- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، انستیتو تحقیقات تغذیه ای و صنایع غذایی کشور، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۱۲

چکیده

سابقه و هدف: به دلیل مشکلات سلامتی مرتبط با مصرف اسید های چرب اشباع و ترانس، علاقه بسیاری به توسعه جایگزین های چربی نیمه جامد با خواص کاربردی مطلوب شکل گرفته است. بنابراین، هدف از تحقیق حاضر بررسی اثر هیدروژل مبتنی بر اینولین و هیدروژل مبتنی بر پروتئین آب پنیر بر ویژگی‌های ژل‌های هیبریدی و مقایسه ی آن با مایونز تجاری بود.

مواد و روش‌ها: تجزیه و تحلیل جامع ویژگی های ژل های هیبریدی شامل ارزیابی ریزساختاری، طیف سنجی FTIR، آزمون پایداری انجماد-ذوب، آزمون های بافتی و رئولوژیک انجام شد. امکان‌سنجی استفاده از ژل‌های هیبریدی توسعه‌یافته به عنوان جایگزین چربی با مقایسه ی رئولوژیک و بافتی آنها با مایونز تجاری ارزیابی شد.

یافته‌ها: اضافه کردن هیدروژل اینولین منجر به توزیع ذرات یکنواخت تر و همگن تر در بررسی ریزساختاری شد که با 'G، "G و ویسکوزیته ظاهری بالاتر ژل هیبریدی هم سو بود. همه ی نمونه ها رفتار مشابه ژل و رفتار شل شونده با برش را نشان دادند. پیک جذبی گسترده در cm^{-1} ۳۳۸۸/۹۴ نشان دهنده درجه بالاتر اتصال هیدروژنی (ارتعاش کششی O–H) در سیستم حاوی اینولین بود. ژل هیبریدی اینولین OBC بالاتری نسبت به ژل هیبریدی پروتئین آب پنیر داشت به طوریکه در چرخه سوم انجماد-ذوب به ترتیب ۷۸/۸۹٪ و ۷۱/۰۶٪ اندازه گیری شد. بالاترین سختی (۱۰۶۵/۳۰g)، کار برشی (۱۲۹۵/۹۸g.sec) و چسبندگی (۲۸۱/۶۱g.sec-) در ژل هیبریدی اینولین مشاهده شد. در مقایسه با ژل‌های هیبریدی، مایونز تجاری دارای ویژگی‌های بافتی و رئولوژیک ضعیف تری بود.

نتیجه‌گیری: در این مطالعه هیبرید ژل های جدید با خواص کاربردی توسعه یافتند. خواص رئولوژیک و بافتی هیبرید ژل ها با تغییر ترکیب هیدروژل می تواند تغییر کند تا امکان استفاده از آنها در کاربرد های صنعتی مانند تولید مایونز کم چرب فراهم شود.

واژگان کلیدی: هیبرید ژل ها، هیدروژل، رئولوژی، جایگزین چربی، خواص بافتی

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.71]

پیام‌های اصلی

- هیبرید ژل اینولین ساختار امولسیونی همگن تر و پایداری بالاتری ارائه داد.
- خواص رئولوژیک و بافتی هیبرید ژل ها می تواند با تغییر ترکیب هیدروژل اصلاح شود.
- نمونه ها پس از ۳۰ روز نگهداری رفتار نیمه-جامد و پایداری مناسبی ارائه دادند.
- هیبرید ژل ها مشابه مایونز تجاری رفتار شل شونده با برش و رفتار وابستگی به فرکانس کمی نشان دادند.

• مقدمه

امروزه علاقه بسیاری به توسعه و بررسی جایگزین های چربی بر پایه پلی ساکارید یا پروتئین به منظور کاهش مقدار چربی و تولید محصولات کم چرب وجود دارد (۱). ژل های هیبریدی به عنوان فرمولاسیون های نیمه جامد ، به طور معمول از ترکیب کردن دوفاز ژل شده اولئوژل و هیدروژل در سرعت برشی بالا و تحت دمای مشخص تشکیل می شوند (۲). این سیستم های دوفازی در مقایسه با ژل های امولسیونی حاوی یک فاز ژل شده، خواص مکانیکی بهبود یافته، خواص رئولوژیک متنوع تر و توانایی برتری برای حمل ترکیبات ارائه می دهند که پتانسیل آنها را به عنوان جایگزین های چربی های اشباع و ترانس و حامل ترکیبات فعال نشان می دهد (۳). در این راستا، توسعه ژل های هیبریدی بر پایه هیدروژل پلی ساکاریدی یا پروتئینی که دارای ترکیبات کاربردی هستند میتواند منجر به بهبود ارزش تغذیه ای مواد غذایی شود (۴). اینولین یک فیبر غذایی محلول در آب از نوع فروکتان است و می توان از آن برای جایگزینی چربی، اصلاح بافت، تشکیل ژل و توسعه غذاهای کاربردی به منظور بهبود سلامت استفاده کرد (۵). حلالیت بالای اینولین در آب به دلیل حضور گروه های هیدروکسیل در ساختار آن، این ترکیب را به جایگزین چربی مناسبی تبدیل می کند (۶). پروتئین های آب پنیر خواص کاربردی متفاوتی از جمله امولسیفایری، جایگزین چربی، بافت دهنده و تشکیل ژل را ارائه می دهند که نقش مهم آن ها را در فرآوری و بهبود خواص بافتی و حسی مواد غذایی مشخص می کند (۷). عوامل مختلفی از جمله نوع و ساختار هیدروژلاتور ها، نسبت اولئوژل به هیدروژل و غلظت ژلاتور ها بر خواص رئولوژیک ژل های هیبریدی اثر می گذارند (۸). بنابراین، انتخاب مناسب عوامل ژل کننده نقش تعیین کننده ای بر ویژگی های رئولوژیک و مکانیکی و کاربرد ژل های هیبریدی درتوسعه مواد غذایی دارد. با توجه به منابع موجود، تاکنون مطالعه ای در مورد بررسی اثر اینولین و پروتئین آب پنیر به عنوان عوامل ژل کننده بر خواص ژل های هیبریدی و مقایسه ی آن با مایونز انجام نشده است و این پژوهش اولین مطالعه در حال حاضر است. هدف از این پژوهش بررسی اثر نوع هیدروژل اینولین یا ایزوله پروتئین آب پنیر بر خواص فیزیکوشیمیایی، ریزساختاری و پایداری ژل های هیبریدی است و در ادامه ویژگی های بافتی و رئولوژیک ژل های هیبریدی توسعه یافته با مایونز تجاری مقایسه شده است.

• مواد و روش‌ها

مواد: پودر اینولین با درجه پلیمریزاسیون ۲۶ و خلوص ۹۹٪ توسط شرکت Sensus هلند تهیه شد. ایزوله پروتئین آب پنیر (خلوص ۹۲٪) توسط شرکت Hilmar آمریکا فراهم شد. موم زنبور عسل از شرکت Foodino آلمان و روغن آفتابگردان از شرکت اویلا ایران خریداری شد. نمونه مایونز تجاری با درصدچربی ۶۵٪ از فروشگاه مواد غذایی محلی خریداری شد.

تهیه هیبرید ژل: هیدروژل های اینولین و ایزوله پروتئین آب پنیر طبق روش های پیشین (۹, ۱۰) با تغییراتی جزئی تهیه شدند. ابتدا پودراینولین و ایزوله پروتئین آب پنیر (۱۰ درصد وزنی/وزنی) در آب دیونیزه به کمک همزن مغناطیسی به مدت ۲ ساعت در دمای اتاق به طور کامل حل شدند. سپس pH محلول های تهیه شده به ۳/۵ به کمک محلول ۱مولار هیدروکلرید اسید رسانده شد. در نهایت هیدروژل های تهیه شده با حرارت با قرار دادن محلول های تهیه شده در معرض فرآیند حرارتی (□۹۰، ۳۰ دقیقه) در حمام آب تهیه شدند. اولئوژل موم زنبور عسل مطابق روش پیشین (۱۱) با کمی تغییرات تهیه شد. ابتدا، مقدار مناسبی موم زنبور عسل (۷/۵

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.71]

درصد وزنی/وزنی) در روغن آفتابگردان تحت همزدن مغناطیسی و فرآیند حرارتی ۸۰°C به مدت ۳۰ دقیقه آماده شد. برای تهیه هیبرید ژل ها، هردو فاز اولئوژل و هیدروژل به طور همزمان تهیه شدند و سپس تا رسیدن به دمای ۵۵□ و ۵۷□ در دمای اتاق به تعادل دمایی رسیدند. سپس، فاز اولئوژل به طور آهسته به فاز هیدروژل در نسبت اولئوژل به هیدروژل ۷۰:۳۰ درصد وزنی/وزنی توسط اولتراتوراکس در شرایط ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه برای ۸ دقیقه هموژن شد. نمونه های تهیه شده در دمای ۴□ برای ۱۸ ساعت نگهداری شدند. هیبرید ژل بر پایه اینولین، هیبرید ژل۱ و هیبرید ژل بر پایه پروتئین آب پنیر هیبریدژل۲ نام گذاری شد.

شکل ظاهری و آزمون وارونگی: آزمون وارونگی برای بررسی رفتار خود نگهدارنده نمونه ها در مقابل نیروی گرانش انجام شد. نمونه ها پس از نگهداری در دمای ۴ درجه سانتیگراد به مدت ۱۸ ساعت، بمدت ۱ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد برای تعادل دمایی قرار گرفتند و به آرامی چرخانده شدند تا به صورت برعکس بر روی سطح قرار گیرند.

خواص ریز ساختاری: بررسی ریزساختاری نمونه ها مطابق روش پیشین انجام شد (۱۲). مقدار کمی از هیبرید ژل های تازه تهیه شده بر روی سطح شیشه ای قرار داده شد و توسط در پوش پوشانده شد. سپس نمونه ها در دمای ۲۵□ به مدت یک شبانه روز نگهداری شدند. تصاویر ریز ساختاری توسط میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی ۴۰ گرفته شد.

طیف‌سنجی (FTIR): طیف FTIR هیبرید ژل ها مطابق روش پیشین (۱۳) بدست آمد. طیف در محدوده

$4000\text{-}450\,cm^{-1}$ با ۳۲ اسکن در وضوح $4\,cm^{-1}$ و در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد انجام شد.

ارزیابی پایداری: ظرفیت اتصال به روغن (OBC) مطابق روش اصلاح شده (۱۴) محاسبه شد. مقدار تقریبی ۱۰ گرم نمونه به لوله سانتریفیوژ منتقل شد و تحت نیروی سانتریفیوژ در ۹۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۲۵□ قرار گرفت. روغن آزاد شده در سطح نمونه جمع آوری شد و براساس معادله (1) OBC محاسبه شد. وزن لوله ی سانتریفیوژ خالی و به همراه نمونه قبل از سانتریفیوژ به ترتیب w_e و w_a نام گذاری شدند. در حالیکه، w_b وزن لوله سانتریفیوژ و نمونه را پس از جمع آوری روغن نشان می دهد.

$$OBC\ (\%) = \left[1 - \frac{(w_a - w_b)}{(w_a - w_e)}\right] \times 100 \qquad (1)$$

همچنین مقدار OBC نمونه ها پس از چرخه های انجماد-ذوب مطابق روش (۱۵) تعیین شد. نمونه های تازه تهیه شده در لوله های سانتریفیوژ قرار داده شدند و در فریزر ۲۰°C- به مدت ۲۴ ساعت نگه داری شدند و در دمای ۲۵□ به مدت ۲ساعت انجماد زدایی انجام شد. سپس نمونه ها در ۹۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شدند و مطابق معادله ۱ درصد OBC محاسبه شد. این فرآیند برای سه چرخه ی متوالی تکرار شد.

آزمون پایداری در دماهای ۴ و ۲۵ درجه سانتیگراد: هیبرید ژل ها در ظروف جداگانه دردار قرار داده شدند و در دو دمای مختلف ۲۵ و ۴ درجه به مدت ۳۰ روزنگهداری شدند. نمونه ها پس از روز ۳۰ از لحاظ پس زدن روغن، پیوستگی و بافت ظاهری مورد ارزیابی قرار گرفتند.

خواص بافتی: خواص مکانیکی نمونه ها توسط دستگاه آنالیز کننده بافت به همراه پروبTTC spreadability و لود سل ۵۰ کیلوگرم مطابق با روش بیان شده (۱۶) با تغییرات جزئی بدست آمدند. تنظیمات دستگاه بر روی سرعت آزمون ۳ میلی متر بر ثانیه، سرعت پس از آزمون ۱۰ میلی متر بر ثانیه، نیروی محرک ۰/۱گرم قرار گرفت. پس از ران دستگاه پروب بالایی تا فاصله ۲ میلی متر به پروب پایینی نفوذ کرد. مطابق نمودار نیرو در مقابل زمان، سفتی، کار برشی و چسبندگی برای هیبرید ژل ها و مایونز تجاری با سه تکرار گزارش شد.

خواص رئولوژیک: آزمونهای رئولوژیک توسط دستگاه رئومتر مجهز به ژئومتری صفحات موازی با قطر (۴۰ میلی متر)، فاصله بین صفحات (۱ میلی متر)، دمای ۲۵°C و مطابق روش پیشین (۱۷) انجام شد. ابتدا، آزمون روبش کرنش برای تعیین ناحیه ویسکوالاستیک خطی (LVR) در محدوده تغییرات کرنش ۰/۰۱ تا ۱۰۰ ٪ در فرکانس ثابت1 هرتز انجام شد. سپس، آزمون روبش فرکانس در محدوده تغییرات فرکانس ۰/۱ تا ۱۰۰هرتز در محدوده LVR برای نمونه های هیبرید ژل و مایونز تجاری بدست آمد. برای تعیین خواص جریانی نمونه ها توسط آزمون پایا، مقدار سرعت برشی از ۰/۱ به ۱۰۰ s^{-1} افزایش یافت.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.71]

ارزیابی آماری: داده‌های کمی با استفاده از آمار توصیفی و به‌صورت میانگین و انحراف معیار ارائه شدند. برای گزارش تفاوت معنی داری در مقایسه ی دو میانگین از آزمونT مستقل استفاده شد. همچنین برای تعیین اختلاف معنی‌داری بین سه میانگین از آنالیز واریانس یک طرفه استفاده شد. مقایسه ی مقادیر میانگین ها با آزمون دانکن انجام شد و از نرم افزار SPSS (نسخه ۲۷) به این منظور استفاده شد. سطح احتمال قابل پذیرش برای تمام مقایسه‌ها، $p<۰/۰۵$ در نظر گرفته شد.

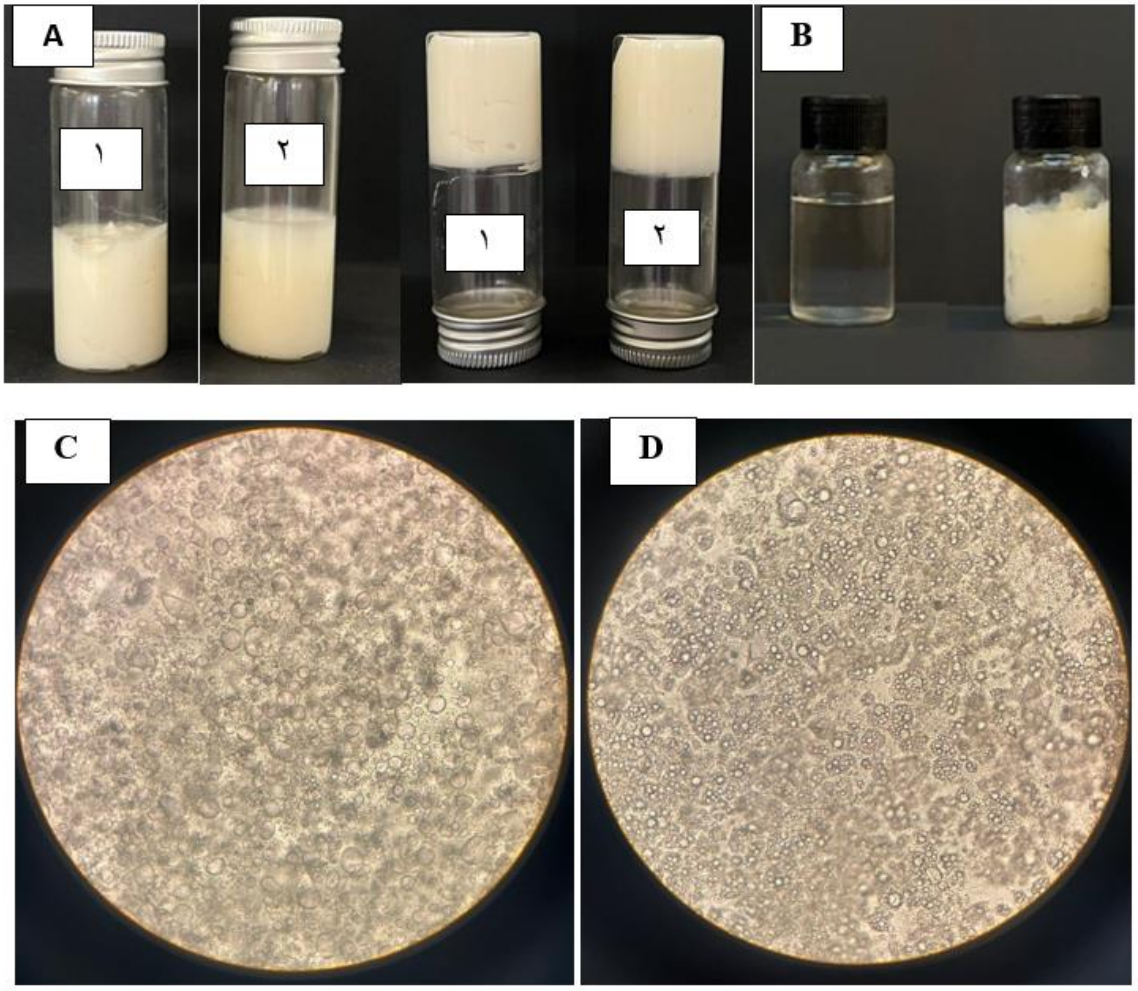
• یافته‌ها

شکل ظاهری و آزمون وارونگی: شکل ظاهری هیبرید ژل ها و نتایج آزمون وارونگی در شکل۱ قسمتA آورده شده است.

همچنین، شکل ظاهری هیدروژل های مربوطه در قسمتB نشان داده شده است.

خواص ریزساختاری: نتایج ریز ساختاری هیبرید ژل ها توسط میکروسکوپ نوری در شکل۱ آورده شده است. در مقایسه ی بین نمونه ها مشخص شد ذرات هیدروژل اینولین در هیبرید ژل۱ (قسمت B) توزیع یکنواخت تر و همگن تری نسبت به ذرات هیدروژل ایزوله پروتئین آب پنیر در هیبرید ژل۲ (قسمت C) در شبکه اولئوژل دارند.

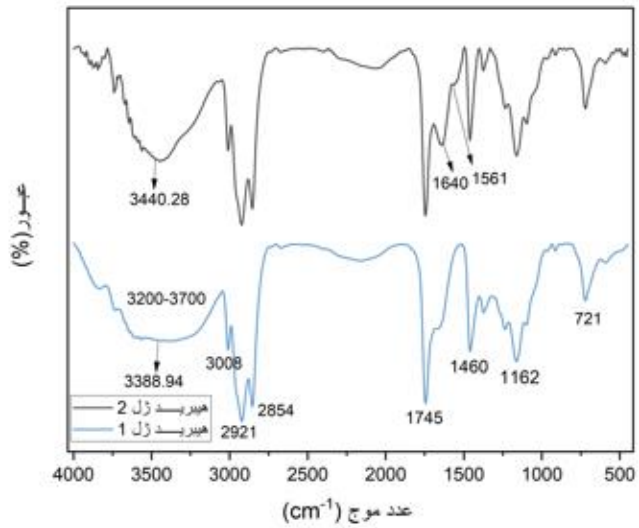
طیف سنجی: طیف FTIR ترسیم شده در شکل۲ قسمتA، پیک های مشخصه مربوط به گروه های عاملی موجود در هیبرید ژل۱ و ۲ را مشخص میکند، که تایید کننده حضور همزمان فاز های هیدروژل و اولئوژل است.



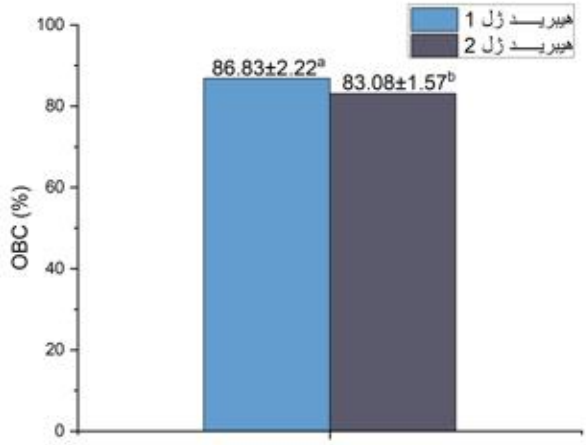
شکل ۱. بخش (**A**) شکل ظاهری و آزمون وارونگی هیبرید ژل ها، بخش (**B**) شکل ظاهری هیدروژل ها (هیدروژل اینولین بی رنگ و هیدروژل پروتئین آب پنیر با ساختار ژل شده)، بخش (**C**) تصویر ریز ساختاری هیبرید ژل اینولین و شکل (**D**) تصویر ریزساختاری هیبرید ژل ایزوله پروتئین آب پنیر را نشان می دهد. هیبرید ژل اینولین نمونه ۱ و هیبرید ژل ایزوله پروتئین آب پنیر نمونه ۲ است.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-08]

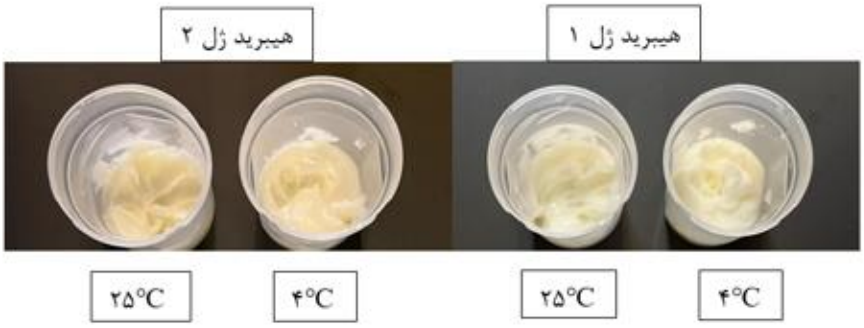
[DOI: 10.66224/nsft.21.3.71]



A



B



C

شکل ۲. قسمت (A) نتایج طیف FTIR مربوط به هیبرید ژل های بر پایه هیدروژل اینولین (هیبرید ژل ۱) و هیدروژل ایزوله پروتئین آب پنیر (هیبرید ژل۲)، قسمت (B) ظرفیت نگهداری روغن (OBC) نمونه ها و قسمت (C) شکل ظاهری نمونه ها بعد از ۳۰ روز نگهداری در دو دمای ۴°C و ۲۵°C را نشان می دهد.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-08]

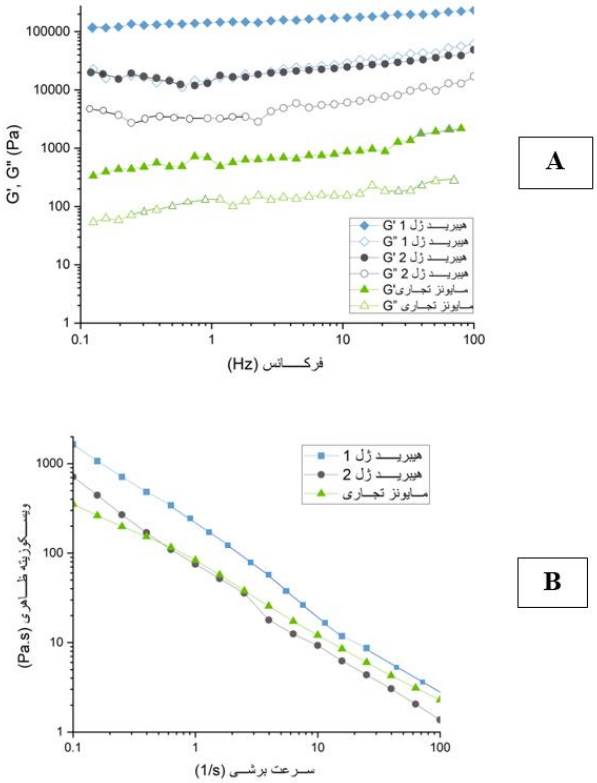
[DOI: 10.66224/nsft.21.3.71]

OBC و آزمون پایداری ۴ و ۲۵ درجه سانتیگراد): مطابق شکل۲ قسمت، OBC هیبرید ژل۱ (۲/۲۲±۸۶/۸۳) به طور معنی داری بالاتر از OBC هیبرید ژل۲ (۱/۵۷±۸۳/۰۸) بدست آمد (p<۰/۰۵). همچنین مطابق قسمتC، نمونه ها پس از ۳۰ روز نگهداری در دمای ۴ درجه سانتیگراد پایداری بالاتر و روغن اندازی کم تری نسبت به نگهداری در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد نشان دادند.

پایداری انجماد-ذوب: جدول۱ مقدار OBC هیبرید ژل ها را پس از گذراندن چرخه های انجماد و ذوب نشان می دهد. مطابق این جدول، اگرچه مقدار OBC در چرخه های مختلف برای هر نمونه معنی دار نبود (p>۰/۰۵)، OBC هیبرید ژل۱ در هر سه چرخه به طور معنی داری بیشتر از هیبرید ژل۲ بود (p<۰/۰۵). به عنوان مثال، در چرخه۳ این مقدار برای هیبرید ژل۱ ۱/۴±۷۸/۸۹٪ و برای هیبرید ژل۲ ۲/۳±۷۱/۰۶٪ اندازه گیری شد.

خواص بافتی: مطابق جدول۲ پارامتر های حاصل از آزمون مالش پذیری نمونه ها با یک دیگر اختلاف معنی داری داشتند (p<۰/۰۵). به طوریکه استفاده از هیدروژل اینولین در ساخت هیبرید ژل۱ منجر به افزایش مقدار سفتی (حداکثر نیرو)، کار برشی (سطح مثبت زیر نمودار نیرو در مقابل زمان) و چسبندگی (سطح منفی زیر نمودار نیرو در مقابل زمان) شد. اگرچه هیبرید ژل۲ خواص بافتی مشابه تری به مایونز تجاری داشت، مقایسه آماری نمونه ها نشان داد مایونز تجاری خواص مکانیکی ضعیف تری دارد (p<۰/۰۵).

خواص رئولوژیک: ویژگی های رئولوژیک هیبرید ژل ها و مقایسه ی آنها با مایونز تجاری توسط آزمون های روبش فرکانس و ویسکوزیته ظاهری انجام شد. در ابتدا براساس نتایج آزمون روبش کرنش نمونه ها، کرنش ۰/۰۱ ٪در محدوده LVR برای انجام آزمون روبش فرکانس انتخاب گردید. بر اساس شکل۳ قسمتA، آزمون روبش فرکانس نشان داد همه ی نمونه ها رفتار ویسکوالاستیک و جامد مانند در محدوده فرکانس مطالعه شده دارند به طوریکه مقدار مدول ذخیره (G′) به طور پیوسته بالاتر از مقدار مدول ویسکوز (G″) بود. همچنین براساس نتایج آزمون ویسکوزیته ظاهری (شکل۳، قسمتB) مشخص شد تمام نمونه ها رفتار شل شونده با برش یا سودوپلاستیک دارند به طوریکه با افزایش مقدار سرعت برشی ویسکوزیته ظاهری کاهش یافت.



شکل ۳. قسمت (A) آزمون روبش فرکانس نمونه های هیبرید ژل و مایونز تجاری و قسمت (B) آزمون ویسکوزیته ظاهری در مقابل سرعت برشی (آزمون رفتار جریانی)

• بحث

شکل ظاهری و آزمون وارونگی: نتایج آزمون وارونگی نشان داد هیبرید ژل ها در دمای محیط ۲۵ درجه سانتیگراد) ساختارخود نگهدارنده و رفتار ژل مانند را به دلیل در برداشتن دو فاز ساختار یافته دارند که از جداسازی فاز تحت نیروی گرانش جلوگیری می کند. هیبرید ژل۱ ظاهری یکنواخت، همگن و سفید تر داشت. درحالیکه، هیبرید ژل ۲ ظاهر کدر تر و نرم تری ارائه داد که با نتایج بافتی و رئولوژیک نمونه ها مطابق بود. شکل ظاهری هیدروژل ها در pH= ۳/۵ نشان داد هیدروژل اینولین به صورت شفاف و هیدروژل پروتئین آب پنیر به طور کامل ساختار شبکه ی ژل را در pH= ۳/۵ تشکیل داده است.

خواص ریزساختاری: مقایسه ی ریزساختاری نمونه ها نشان داد ذرات هیدروژل با اندازه بزرگ تر و غیر یکنواخت تر در هیبرید ژل۲ نسبت به هیبرید ژل۱ داخل ماتریکس پراکنده شده اند. در مطالعه پیشین نشان داده شده است در pH= ۳/۵

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.66224/nsft.21.3.71]

پروتئین های آب پنیر در غلظت ۱۰٪ وزنی/وزنی میتوانند ژل های حرارتی تشکیل دهند که به طور عمده توسط میانکنش های غیر کوالانسی شامل نیرو های واندوالس، پیوند های هیدروژنی و آبگریز تشکیل می شوند (۱۸). این تفاوت ریز ساختاری می تواند به تشکیل ژل پروتئین آب پنیر در pH اسیدی مربوط شود. نتایج ریز ساختاری مشابهی در مطالعه حبیبی و همکاران (۲۰۲۲) در ژل های دوگانه برپایه کنسانتره پروتئین آب پنیر، کاپاکاراگینان و مونو آسیل گلیسرول مشاهده شد به طوریکه ذرات هیدروژل با اندازه بزرگ تر و به صورت غیر همگن تر در ژل دوگانه کنسانتره پروتئین آب پنیر نسبت به ژل دوگانه کاپاکاراگینان مشاهده شدند. محققان این تفاوت ریز ساختاری را به تشکیل تجمعات حرارتی کنسانتره پروتئین آب پنیر نسبت دادند (۱۹).

طیف سنجی (FTIR): در طیف هیبرید ژل۱ پیک جذبی گسترده مشاهده شده در $3388/94 cm^{-1}$ نشان دهنده ارتعاش کششی O–H است که به پیوند های هیدروژنی در هیدروژل مربوط می شود (۲۰). در واقع، گروه های هیدروکسیل غنی فروکتوز و گلوکز در ساختار اینولین می توانند در میانکنش های فرا مولکولی مانند پیوند هیدروژنی شرکت می کنند (۲۱). در طیف هیبرید ژل۲ پیک جذبی $3440 cm^{-1}$ مربوط به ارتعاشات کششی N–H و O–H (باند آمید A) است که به پیوند های هیدروژنی بین مولکولی اشاره دارد (۲۲). این پیک میتواند از پیوند هیدروژنی بین مولکولی قوی بین گروه های NH در پروتئین و گروه OH در مولکول های آب ناشی شود (۲۳). به علاوه، پیک مشاهده شده در محدوده تقریبی $1640 cm^{-1}$ به آمیدI نسبت داده می شود (۲۴). درحالیکه، سیگنال ظاهر شده در محدوده تقریبی $1561 cm^{-1}$ میتواند نشان دهنده حضور آمید II باشد. به طور دقیق‌تر، پیک آمید I با ارتعاشات کششی پیوندهای C–O و C–N در ارتباط است، در حالی که پیک آمید II از ارتعاشات خمشی N–H همراه با ارتعاشات کششی C–N ناشی می‌شود (۱۳). در نمونه ها پیک های جذبی در محدوده تقریبی $2854 cm^{-1}$ و $2921 cm^{-1}$ نشان دهنده ارتعاش کششی نامتقارن CH_2 و ارتعاش کششی متقارن CH_2 است (۲۵). پیک ها در محدوده تقریبی $1745 cm^{-1}$ و $1162 cm^{-1}$ به ترتیب از ارتعاشات کششی C=O و C–O حاصل می شوند که به مولکول های تری گلیسیرید موجود در روغن مربوط می شوند (۲۶). پیک های مشاهده شده در محدوده $3008 cm^{-1}$ و $1374 cm^{-1}$به ترتیب به ارتعاشات کششی C–H و C=O موجود در روغن آفتابگردان اشاره دارند (۲۷). پیک جذبی$1460 cm^{-1}$ مرتبط با خمیدگی C–H است و پیک$721 cm^{-1}$ به آمیدهای موجود در ترکیبات موم زنبور عسل اشاره دارد (۲۸). در مقایسه نمونه ها مشخص شد نمونه ی هیبرید ژل۱ عدد طول موج کم تری (cm^{-1} ۳۳۸۸/۹۴) نسبت به نمونه هیبرید ژل۲ (cm^{-1} ۳۴۴۰) در این ناحیه دارد، که نشان دهنده پیوند های هیدروژنی قوی تر در نمونه ی حاوی هیدروژل اینولین است و میتواند توجیهی برای بالاتر بودن خواص رئولوژیک و بافتی این نمونه باشد. در مطالعه پیشین نقش مهم پیوند های هیدروژنی در تشکیل امولسیون ژل ایزوله پروتئین نخود-اینولین مشخص شده است. به طوریکه در این مطالعه افزایش شدت پیک جذب در ناحیه کششی O–H/N–H به افزایش پیوند هیدروژنی به دلیل وجود اینولین نسبت داده شده است (۲۹).

OBC و آزمون پایداری ۴ و ۲۵ درجه سانتیگراد): بالاتر بودن مقدار OBC در هیبرید ژل۱ میتواند به توانایی اینولین در پایدار کردن شبکه هیدروژل مرتبط شود و زمانیکه با اولئوژل ترکیب می شود به دلیل ایجاد پیوند های هیدروژنی اضافی و میانکنش های دیگر پایداری هیبرید ژل را افزایش دهد (۱۳). همچنین مشاهده شد هیبرید ژل۱ پس از ۳۰ روز نگهداری بافت پایدار تر و پیوستگی بالاتر و روغن اندازی کم تر نسبت به هیبرید ژل۲ دارد که می توان به استحکام ساختاری بالاتر نمونه نسبت داد.

پایداری انجماد-ذوب: مطابق جدول۱، پایداری انجماد-ذوب هیبرید ژل۱ بالاتر گزارش شد. در مطالعه Yang و همکاران (۲۰۲۲) عنوان شد اندازه کوچک تر ذرات امولسیون و همچنین اختلاف چگالی کم تر بین فاز آبی و روغنی میتواند باعث افزایش پایداری انجماد-ذوب هیبرید ژل ها شود (۱۵).

خواص بافتی: مطابق جدول۲ مشخص شد همه ی پارامتر های بافتی هیبرید ژل ها به طور معنی داری بالاتر از مایونز تجاری است ($p<0/05$). اگرچه، خواص بافتی هیبرید ژل۲ به مایونز تجاری نزدیک تر بود. درمطالعه ی Cui و همکاران (۲۰۲۲) خواص بافتی (سفتی، کار برشی و چسبندگی) ژل دوگانه بر پایه

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.71]

کیتوزان دارای اتصال عرضی و گلیسرول مونولورات از خامه تجاری بالاتر بود که با اضافه کردن امولسیفایر غیر یونی span 80 و تغییر درصد فاز روغنی امکان شبیه سازی بیشتری با پارامتر های بافتی خامه تجاری فراهم شد (۳۰). همچنین، روند افزایشی پارامتر های بافتی با افزودن اینولین مشابه مطالعه پیشین انجام شده توسط Hu و همکاران (۲۰۲۵) بود. در ژل های هیبریدی بر پایه هیدروژل ترکیبی صمغ زانتان و ژلان، اضافه کردن اینولین منجر به افزایش چسبندگی، پیوستگی و سختی به دلیل تغییر توزیع فاز های آبی و روغنی در نمونه ها شد (۳۱).

جدول ۱. مقدار ظرفیت نگهداری روغن نمونه ها بعد از سه چرخه انجماد-ذوب

چرخه های انجماد-ذوب	هیبرید ژل ۱	هیبرید ژل ۲
چرخه ۱	$77/26\pm1/26^{Aa}$	$73/26\pm1/30^{Bb}$
چرخه ۲	$78/57\pm0/9^{Aa}$	$74/01\pm0/8^{Bb}$
چرخه ۳	$78/89\pm1/4^{Aa}$	$71/06\pm2/3^{Bb}$

حروف بزرگ متفاوت بین ردیف ها تفاوت معنی داری ($p < 0.05$) مقدار OBC بین دو نمونه ی هیبرید ژل را در یک چرخه انجماد-ذوب نشان می دهد. حروف کوچک در هر ستون تفاوت معنی داری ($p < 0.05$) در مقدار OBC برای یک نمونه را در چرخه های مختلف انجماد-ذوب مشخص می کند. داده ها به صورت میانگین ± انحراف استاندارد برای سه تکرار ارائه شده اند.

جدول ۲. ویژگی های بافتی (سفتی، کاربرشی و چسبندگی) نمونه های هیبرید ژل و مایونز تجاری

نمونه ها	سفتی (g)	کار برشی (g.sec)	چسبندگی (g.sec)
هیبرید ژل ۱	$1065/30\pm130/95^{a}$	$1295/98\pm142/78^{a}$	$281/61\pm40/21^{c}$
هیبرید ژل ۲	$737/93\pm80/65^{b}$	$879/63\pm61/72^{b}$	$188/72\pm18/32^{b}$
مایونز تجاری	$561/26\pm76/11^{c}$	$469/50\pm51/16^{c}$	$130/78\pm10/69^{a}$

حروف کوچک متفاوت بین ستون ها تفاوت معنی داری ($p < 0.05$) نمونه ها را مشخص می کند و داده ها به صورت میانگین± انحراف استاندارد برای چهار تکرار آزمون مالش پذیری گزارش شده اند.

خواص رئولوژیک: نتایج آزمون روبش فرکانس نشان داد مقدار G' به عنوان شاخصی از ویسکوالاستیسیته بالاتر از مقدار G'' در هیبرید ژل ها و مایونز تجاری بود که تشکیل ساختار ژل و رفتار الاستیک جامد مانند را تایید می کند (۳۲). همچنین G' و G'' هیبرید ژل ها و مایونز تجاری با افزایش فرکانس به صورت تقریبی افزایش یافت. این رفتار وابستگی به فرکانس مربوط به خاصیت ژل ضعیف نمونه ها، ساختار نرم و انعطاف پذیر است که منجر به تغییرات خواص مکانیکی با افزایش فرکانس می شود (۳۳). مقدار G' و G'' هیبرید ژل اینولین به طور قابل توجهی از نمونه های دیگر بیشتر بود که با نتایج بافتی نیز تطابق دارد. مطالعه ی Liu و همکاران (۲۰۲۵) نشان داد افزایش مقدار اینولین در امولسیون ژل منجر به افزایش G' و G'' می شود که به افزایش یکنواختی و خواص ویسکوالاستیک نمونه ها مرتبط دانستند (۳۴). با توجه به نتایج آزمون ویسکوزیته ظاهری هیبرید ژل ها و مایونز تجاری رفتار شل شونده با برش ارائه دادند. تحت سرعت برشی بالا به دلیل اعمال نیروی خارجی، سازمان دهی مولکول ها در داخل اولئوژل میتواند دچار تغییر شود و منجر به کاهش پایداری هیبرید ژل شود. این تخریب ساختار داخلی می تواند خواص جریانی نمونه را افزایش دهد و منجر به کاهش ویسکوزیته شود (۳۵). به علاوه، در سرعت برشی کم مقدار ویسکوزیته ظاهری هیبرید ژل ها از مایونز تجاری بیشتر بود. درحالیکه در مقایسه هیبرید ژل۲ و مایونز تجاری مشخص شد، در یک نقطه تقاطع (سرعت برشی $0.5\ s^{-1}$) مایونز تجاری ویسکوزیته ظاهری بالاتری دارد که میتواند مرتبط با تخریب ساختار بیشتر هیبرید ژل۲ تحت سرعت برشی بالا باشد.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.71]

نتیجه گیری

در این مطالعه ژل های هیبریدی جدید با خواص کاربردی توسعه یافتند. مطابق آزمون های انجام شده مشخص شد ژل هیبریدی بر پایه هیدروژل اینولین پایداری بالاتر و ویژگی های رئولوژیک و بافتی مستحکم تری نسبت به ژل هیبریدی پروتئین آب پنیر دارد. خواص رئولوژیک و بافتی ژل های هیبریدی با تغییر ترکیب هیدروژل میتواند اصلاح شود تا امکان استفاده از آنها در کاربرد های صنعتی مانند تولید مایونز کم چرب فراهم شود. در تحقیقات آینده بررسی استفاده از ژل های هیبریدی توسعه یافته در سیستم‌های غذایی برای بهینه‌سازی جایگزینی چربی با هدف حفظ خواص حسی، بافتی و افزایش مشخصات تغذیه‌ای محصولات نهایی توصیه می‌شود.

• References

1. Zheng X-Q, Wang D-D, Xue S, Cui Z-Y, Yu H-Y, Wei J-T, et al. Composite formation of whey protein isolate and OSA starch for fabricating high internal phase emulsion: A comparative study at different pH and their application in biscuits. International journal of biological macromolecules. 2024;259:129094.
2. Shakeel A, Farooq U, Gabriele D, Marangoni AG, Lupi FR. Bigels and multi-component organogels: An overview from rheological perspective. Food Hydrocolloids. 2021;111:106190.
3. Wang X, Sun L, Zhang X, Jia L, Wang S, He T, et al. Soy protein isolate-acylated anthocyanins self-assembled nanoparticles enhanced bigels physicochemical properties: Effect of amphiphilic nanoparticles on the bigels system. Food Research International. 2025;218:116913.
4. Zhou M, Li B, Wu A, Li J, Tang J, Wang Y, et al. Gelatin-wax-based bigel System: Innovative research on a low-calorie fat substitute. LWT. 2025;224:117836.
5. Gupta N, Jangid AK, Pooja D, Kulhari H. Inulin: A novel and stretchy polysaccharide tool for biomedical and nutritional applications. International journal of biological macromolecules. 2019;132:852-63.
6. López-Castejón ML, Bengoechea C, Espinosa S, Carrera C. Characterization of prebiotic emulsions stabilized by inulin and β-lactoglobulin. Food Hydrocolloids. 2019;87:382-93.
7. Yiğit A, Bielska P, Cais-Sokolińska D, Samur G. Whey proteins as a functional food: Health effects, functional properties, and applications in food. Journal of the American Nutrition Association. 2023;42(8):758-68.
8. Shakeel A, Farooq U, Iqbal T, Yasin S, Lupi FR, Gabriele D. Key characteristics and modelling of bigels systems: A review. Materials Science and Engineering: C. 2019;97:932-53.
9. Florowska A, Hilal A, Florowski T, Mrozek P, Wroniak M. Sodium Alginate and Chitosan as Components Modifying the Properties of Inulin Hydrogels. Gels [Internet]. 2022; 8(1):[63 p.].
10. Wang Y, Zhao J, Liu C, Li W. Influence of γ-aminobutyric acid on gelling properties of heat-induced whey protein gels. Food Hydrocolloids. 2019;94:287-93.
11. Martins AJ, Cerqueira MA, Fasolin LH, Cunha RL, Vicente AA. Beeswax organogels: Influence of gelator concentration and oil type in the gelation process. Food research international. 2016;84:170-9.
12. Clímaco GN, Fasolin LH. Effect of the gelling mechanism on the physical properties of bigels based on whey protein isolate. Food research international (Ottawa, Ont). 2024;176:113784.
13. Jiang L, Wang Q, Rao Z, Lei X, Zhao J, Lei L, et al. Formulation and characterization of bigels utilizing whey protein and polysaccharides: Potential applications as cream analogues. Food Hydrocolloids. 2024;152:109884.
14. Samui T, Goldenisky D, Rosen-Kligvasser J, Davidovich-Pinhas M. The development and characterization of novel in-situ bigel formulation. Food Hydrocolloids. 2021;113:106416.
15. Yang J, Zheng H, Mo Y, Gao Y, Mao L. Structural characterization of hydrogel-oleogel biphasic systems as affected by oleogelators. Food Research International. 2022;158:111536.
16. Martins AJ, Silva P, Maciel F, Pastrana LM, Cunha RL, Cerqueira MA, et al. Hybrid gels: Influence of oleogel/hydrogel ratio on rheological and textural properties. Food research international. 2019;116:1298-305.
17. Zheng H, Mao L, Cui M, Liu J, Gao Y. Development of food-grade bigels based on κ-carrageenan hydrogel and monoglyceride oleogels as carriers for β-carotene: Roles of oleogel fraction. Food Hydrocolloids. 2020;105:105855.
18. Lupano CE, Renzi LA, Romera V. Gelation of Whey Protein Concentrate in Acidic Conditions: Effect of pH. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 1996;44(10):3010-4.
19. Habibi A, Kasapis S, Truong T. Effect of hydrogel particle size embedded into oleogels on the physico-functional properties of hydrogel-in-oleogel (bigels). LWT. 2022;163:113501.
20. Pang M, Xu L, Ge Y, Cheng J, Zhang Z, Cao L. Fabrication of beeswax/plant sterol ester-gelatin/whey protein isolate bigels with dual gelation effects as substitutes for traditional solid fats. Food Hydrocolloids. 2024;157:110458.
21. Barclay T, Ginic-Markovic M, Cooper P, Petrovsky N. Inulin-a versatile polysaccharide with multiple pharmaceutical and food chemical uses. International Journal of Pharmaceutical Excipients. 2016;1(3).
22. Liu H, Yang D, Zhang Q, McClements DJ, Xu X, Sun Q, et al. Impact of Hofmeister anion type on the structural and mechanical properties of composite whey protein hydrogels. Food Hydrocolloids. 2025;158:110521.
23. Guo J, Gu X, Meng Z. Customized 3D printing to build plant-based meats: Spirulina platensis protein-based Pickering emulsion gels as fat analogs. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2024;94:103679.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.71]

24. Wang T, Tan SY, Mutilangi W, Aykas DP, Rodriguez-Saona LE. Authentication of Whey Protein Powders by Portable Mid-Infrared Spectrometers Combined with Pattern Recognition Analysis. J Food Sci. 2015;80(10):C2111-6.

25. Zhou M, Li B, Wu A, Hu Z, Zhou L, Hu H, et al. Preparation of a two-phase gel system based on gelatin hydrogel and beeswax/rice bran wax oleogel and eutectic phase behavior of beeswax and rice bran wax in soybean oil. LWT. 2025;215:117306.

26. Liu W, Liu K, McClements DJ, Jin Z, Chen L. Fabrication and characterization of starch-based bigels under phase control: Structural, physicochemical and 3D printing properties. Food Hydrocolloids. 2025;159:110623.

27. Ramos-Souza C, Fernandes AS, Mazzo TM, Perrechil F, De Rosso VV. Fine-tuning carotenoid-enriched bigel formulations: Exploring the influence of Oleogel: Hydrogel ratio on physicochemical properties and 3D food printing. Food Hydrocolloids. 2025;164:111202.

28. Zhou M, Li B, Wu A, Hu Z, Liu J, Wang Y, et al. Preparation of a bigel system based on k-carrageenan hydrogel and beeswax oleogel and the effect of starch on the bigel properties. LWT. 2024;205:116516.

29. Xu Q, Qi B, Han L, Wang D, Zhang S, Jiang L, et al. Study on the gel properties, interactions, and pH stability of pea protein isolate emulsion gels as influenced by inulin. Lwt. 2021;137:110421.

30. Cui H, Tang C, Wu S, Julian McClements D, Liu S, Li B, et al. Fabrication of chitosan-cinnamaldehyde-glycerol monolaurate bigels with dual gelling effects and application as cream analogs. Food Chemistry. 2022;384:132589.

31. Hu X, Zhang X, Niu M, Xia C, Dong W, Li C, et al. Construction of a beeswax-based olive oil bigels system encapusulation of β-carotene by xanthan gum/gellan gum/inulin and evaluation of extrusion spreading performance using finite element Abaqus simulations. Food Chemistry. 2025;479:143798.

32. Xue Y, Zhong J, Liu X, Xiang D, Qin X. Improved physicochemical properties of bigels produced with ethyl cellulose-based oleogel and moderately deacetylated konjac glucomannan hydrogel. Food Chemistry. 2024;459:140429.

33. Lin X, Liu F, Ma Z, Li Y, Zheng H. Effects of different gelation mechanisms on the structural properties of bigels: A comparative study. Food Hydrocolloids. 2025;167:111249.

34. Liu J, Huang G, Li R, Ho C-T, Huang Q. Edible 3D printed emulsion gels: Effects of inulin on sensory characteristics and mechanical properties. Current Research in Food Science. 2025;11:101154.

35. Barragán-Martínez LP, Alvarez-Poblano L, Vernon-Carter EJ, Alvarez-Ramirez J. Effects of β-carotene on the color, textural, rheological and structural properties of canola oil/beeswax oleogel. Journal of Food Measurement and Characterization. 2022;16(5):3946-56.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.71]

Comparative Evaluation of Inulin Polysaccharide and Whey Protein Hydrogels on Microstructural, Rheological and Txtural Properties of Hybrid Gels and Commercial Mayonnaise

Razaghi S[1], Nayebzadeh K[2], Hosseini M[3], Hasibi K[1], Mirmoghtadaie L[4]*

1- *Master's student of food science and technology, Department of Food Science and Technology, National Nutrition and Food Technology Research Institute, Faculty of Nutrition Sciences and Food Technology, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran*

2- **Corresponding author: Professor, Department of Food Science and Technology, National Nutrition and Food Technology Research Institute, Faculty of Nutrition Sciences and Food Technology, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran, Email: knayebz@sbmu.ac.ir*

3- *Professor, Department of Food Science and Technology, National Nutrition and Food Technology Research Institute, Faculty of Nutrition Sciences and Food Technology, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran,*

4- *Associate professor, Department of Food Science and Technology, National Nutrition and Food Technology Research Institute, Faculty of Nutrition Sciences and Food Technology, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran*

Received 9 Feb, 2026 **Accepted 3 May, 2026**

Background and Objectives: Owing to health concerns associated with the consumption of saturated and trans fatty acids, increasing attention has been directed toward the development of semi-solid fat substitutes with desirable functional properties. The aim of the present study was to investigate the effects of inulin-based and whey protein-based hydrogels on the properties of hybrid gels and to compare them with commercial mayonnaise.

Materials and Methods: A comprehensive analysis encompassed microstructural evaluation, FTIR spectroscopy, freeze-thaw stability tests, and textural and rheological measurements. The feasibility of applying the developed hybrid gels as fat substitutes was assessed through rheological and textural comparisons with commercial mayonnaise.

Results: The incorporation of inulin hydrogel resulted in a more uniform and homogeneous particle distribution, as observed in the microstructural analysis, which was consistent with higher G', G'', and apparent viscosity. All samples exhibited gel-like behavior and shear-thinning behavior. The broad absorption peak at 3388/94 cm^{-1} indicated a higher degree of hydrogen bonding (O–H stretching vibration) in the inulin-containing sample. During freeze-thaw cycles, the inulin-based hybrid gel showed higher OBC than the whey protein-based hybrid gel, measured at 78.89% and 71.06% in the third cycle, respectively. The highest firmness (1065.30g), work of shear (1295.98 g.sec) and adhesiveness (-281.61 g.sec) were observed in the inulin-based hybrid gel. Compared with the hybrid gels, commercial mayonnaise exhibited lower textural and rheological attributes.

Conclusion: In this investigation, novel hybrid gels with desirable functional properties were developed. The structural and mechanical properties of the hybrid gels can be effectively tailored by modifying the type of hydrogel incorporated, highlighting their potential applications as fat substitutes in low-fat food formulations such as mayonnaise.

Keywords: Hybrid gels, Hydrogel, Rheology, Fat substitutes, Textural properties

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.71]