

# بررسی ساختار رئولوژیکی و بافتی ژل‌های کامپوزیتی حاوی اولئوزوم و پروتئین دانه کنجد

فاطمه شیخ<sup>۱</sup>، مریم حسنی<sup>۲\*</sup>، حسین کیانی<sup>۳</sup>، محمد جواد اسداله زاده<sup>۴</sup> و جواد سیفی<sup>۴</sup>

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی دکتری؛ و استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران  
۳- دانشیار، آزمایشگاه زیست فرآوری و زیست‌سنجش، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران  
۴- استادیار، گروه مهندسی شیمی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران  
تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۰۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰

## چکیده

در پژوهش حاضر، ژل کامپوزیتی بر پایه ژلاتین و پروتئین دانه کنجد حاوی مقدار ثابتی اولئوزوم تهیه شد. بر این اساس نسبت‌های متفاوت پروتئین کنجد به ژلاتین (۳۰:۷۰، ۵۰:۵۰، ۷۰:۳۰ درصد وزنی / وزنی) و مقدار ثابت ۲۰ درصد وزنی اولئوزوم برای تهیه ژل کامپوزیتی استفاده گردید. ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی دانه کنجد و اولئوزوم مستخرج از آن تعیین و بازده استخراج اولئوزوم از دانه کنجد ارزیابی شد. ویژگی‌های رئولوژیکی، بافتی و ریز ساختار ژل‌ها نیز بررسی گردید. مقادیر بازده استخراج پروتئین و اولئوزوم از دانه کنجد به ترتیب  $1/23 \pm 21$  و  $1/41 \pm 68/96$  درصد گزارش گردید. نتایج تحقیق نشان داد میزان پروتئین دانه کنجد بر رفتار ژلاسیون و سفت شدن ژل تاثیر معنی‌داری دارد و با کاهش دمای فرایند از ۵۰ تا ۴ درجه سلسیوس، مدول‌های ذخیره و افت در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت پروتئین کنجد میزان مدول ذخیره و مدول افت در دمای ۴ درجه سلسیوس به ترتیب از ۲۵۸ پاسکال به ۱۴۹۴۰۰ پاسکال و از ۴۶/۷ پاسکال به ۳۷۶۴۸ پاسکال رسید. با افزایش نسبت پروتئین کنجد به ۷۰ درصد، تجمع مولکول‌های پروتئینی در ساختار ژل با میکروسکوپ نوری مشاهده گردید. نتایج تحقیق حاضر موید آن است که اولئوزوم دانه کنجد می‌تواند به عنوان جایگزین ذرات چربی در فراورده‌های غذایی به کار رود.

**واژه‌های کلیدی:** اولئوزوم دانه کنجد، پروتئین دانه کنجد، ژل کامپوزیت، مدول افت، مدول ذخیره.

## مقدمه

درصد)، پروتئین (۳۵-۱۹ درصد) و ترکیبات زیست فعال است (Ma et al., 2022)؛ روغن آن به‌طور گسترده در پخت و پز، سالاد، سوپ‌ها و قنادی‌ها استفاده می‌شود. این روغن می‌تواند به عنوان عامل طعم‌دهنده در مراحل پایانی پخت به محصولات مختلف اضافه شود. ترکیب اسیدهای چرب روغن کنجد شامل ۴۳ درصد اولئیک اسید<sup>۲</sup>، ۴۳ درصد

کنجد *Sesamum indicum* L، متعلق به تیره پدالیاسه Pedaliaceae یکی از قدیمی‌ترین دانه‌های روغنی است که بیشتر در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری سراسر جهان به‌ویژه کشورهای آسیایی کشت می‌شود. دانه کنجد که به نام بنی‌سید<sup>۱</sup> نیز شناخته می‌شود، منبعی غنی از روغن (۴۵-۴۰

<sup>2</sup> Oleic acid

<sup>1</sup> Beniseed

<http://doi:10.22092/FOODER.2023.356674.1318>

\*نگارنده مسئول Email: mhasani81@yahoo.com



هورمون‌های استروئیدی و لیپیدهای آرایشی بهداشتی به کار گرفته شوند. به طور کلی، پایداری اولئوزوم‌ها فاکتوری مهم در استفاده از آنها در صنایع مختلف است. بهبود پایداری اولئوزوم‌ها در کاربردهای صنعتی و تجاری، سبب کاهش هزینه‌های فرایند به‌واسطه کاهش تجزیه اجسام روغنی می‌شود (Peng *et al.*, 2003).

امروزه، به‌طور معمول برای استخراج ترکیبات روغنی از حلال‌های آلی و دماهای بالا استفاده می‌شود. این فرایندها علاوه بر آلودگی محیط زیست، با کاهش قابل توجه ویژگی‌های کیفی فراورده‌های حاصل از استخراج همراهاند (Chang, 2013). استخراج آبی اجسام روغنی از ماتریس‌های گیاهی، جایگزین نویدبخشی برای پالایش زیستی<sup>۱۱</sup> محصولات روغنی است (Kirimidou *et al.*, 2017). پس از استخراج، اولئوزوم‌ها در محیط آبی به عنوان یک امولسیون رقیق شده پخش می‌شوند. این محیط همچنین حاوی بخشی از پروتئین‌های گیاهی دانه است (Nikiforidis, 2019). عصاره استخراج شده می‌تواند به منظور افزایش مقدار قطره‌های روغنی تحت فرایند اولترافیلتراسیون<sup>۱۲</sup> و نیز برای بازیافت قطره‌های روغن به صورت خامه غلیظ، تحت سانتریفیوژ قرار گیرند. امولسیون حاوی اولئوزوم‌ها (خامه تغلیظ شده)، می‌تواند در توسعه فراورده‌های نوین غذایی یا غیر غذایی به کار گرفته شوند که هم‌اکنون در آنها از امولسیون‌های مصنوعی استفاده می‌شود (Chang, 2013; Abdullallah *et al.*, 2020) یا اینکه به عنوان اجزای فراسودمند در محصولات مختلف به کار روند. علاوه بر این، به دلیل پایداری فیزیکوشیمیایی بالای اولئوزوم‌های استخراج شده به روش آبی، ترکیبات تغذیه‌ای حساس به اکسیداسیون از جمله فنول‌ها، ویتامین‌ها و اسیدهای چرب غیراشباع به‌خوبی در آنها نگهداری و انتقال داده می‌شوند (White *et al.*, 2008). بنابراین، علاوه بر روش استخراج

ینولئیک‌اسید<sup>۱</sup>، ۹ درصد پالمیتیک‌اسید<sup>۲</sup> و ۴ درصد استئاریک‌اسید<sup>۳</sup> است. روغن کنجد گاما-توکوفرول‌های پلاسما<sup>۴</sup> خون را افزایش می‌دهد و فعالیت ویتامین E را بهبود می‌دهد که در جلوگیری از سرطان و بیماری‌های قلبی عروقی مؤثر است. این روغن به دلیل بالابودن مقدار اسیدهای چرب چند غیراشباع، سطح کلسترول خون را کاهش می‌دهد. روغن کنجد حاوی سزامین<sup>۵</sup>، سزامولین<sup>۶</sup> و سزامول<sup>۷</sup> است که بالاترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ضد میکروبی به ترتیب در سزامول، سزامین و سزامولین گزارش شده است (Kumar *et al.*, 2015). این مواد همچنین دارای خواص بیولوژیکی نیز هستند (Michailidis *et al.*, 2019).

دانه‌های روغنی، تری‌گلیسیریدها را در اندام‌هایی بین سلولی به نام اجسام روغنی<sup>۸</sup> (اولئوزوم‌ها<sup>۹</sup>) برای سوخت و ساز و جوانه‌زنی ذخیره می‌کنند. یک اولئوزوم حاوی شبکه تری‌گلیسیریدی است که با لایه‌ای از فسفولیپیدها احاطه شده است. این اجسام روغنی در پروتئین‌های ساختاری و الئوزین‌ها<sup>۱۰</sup> قرار گرفته‌اند. اولئوزوم‌ها به‌طور قابل توجهی هم در سلول و هم در خارج از آن پدیدارند. اجسام روغنی دانه‌ها شامل ۹۴-۹۸ درصد لیپیدهای خنثی (به‌ویژه تری‌گلیسیریدها)، ۲-۵ درصد فسفولیپیدها و ۳/۵-۵/۰ درصد پروتئین (به‌خصوص الئوزین‌ها) هستند. قطر متوسط این قطره‌ها بین ۰/۵ تا ۲ میکرومتر است (Peng *et al.*, 2003; Nikiforidis, 2019). اولئوزوم‌ها به عنوان اجسامی طبیعی، می‌توانند حامل‌هایی به منظور تولید پروتئین‌های بازترکیبی (Van Rooijen & Motoney, 1995) یا به عنوان کپسول‌های زیستی برای انکپسولاسیون باکتری‌های لاکتیک اسید در محصولات لبنی (Hou *et al.*, 2003) استفاده شوند. شبکه روغنی اولئوزوم‌ها همچنین می‌توانند به عنوان حامل‌هایی برای مولکول‌های آب‌گریز از جمله آنتی‌اکسیدان‌ها،

<sup>7</sup> Sesamol

<sup>8</sup> Oil bodies

<sup>9</sup> Oleosomes

<sup>10</sup> Oleosins

<sup>11</sup> Biorefinery

<sup>12</sup> Ultrafiltration

<sup>1</sup> Linoleic acid

<sup>2</sup> Palmitic acid

<sup>3</sup> Stearic acid

<sup>4</sup> Blood plasma gamma-tocopherol

<sup>5</sup> Sesamin

<sup>6</sup> Sesamol

افزایش می‌یابد. نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که اختلاط کامل قطره‌های روغنی امولسیونه در غلظت‌های پایین‌تر ژلاتین سبب افزایش مدول ذخیره و تقویت ساختار ژل ژلاتینی می‌شود. یافته‌های این مطالعه نشان داد که اولئوزوم‌های دانه کنجد و فندق جایگزین‌هایی عالی برای قطره‌ها و ذرات چربی رایج هستند و می‌توانند به‌خوبی در شبکه ژلی پروتئینی ژلاتین استفاده شوند (Kirimlidou et al., 2017). یانگ و همکاران (Yang et al., 2020) با بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی امولسیون-ژل تهیه شده با اولئوزوم‌های سویا به عنوان پرکننده قطره‌های روغن و کاراگینان به عنوان ماتریس ژل دریافتند امولسیون-ژل‌های حاوی اولئوزوم خواص روانکاری بهتری نشان می‌دهند. این محققان همچنین مشاهده کردند مقدار اولئوزوم و pH محیط بر دمای تشکیل استحکام ژل موثرند. با توجه به مطالعات پیشین، هدف از پژوهش حاضر تشکیل شبکه ژل‌های کامپوزیتی بر پایه ژلاتین و پروتئین کنجد، حاوی مقدار ثابتی اولئوزوم و نیز بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی، بافتی و ریز ساختار آن است.

### مواد و روش‌ها

کنجد خام با پوست (وارداتی از پاکستان) از بازار محلی خریداری شد. ژلاتین گاوی، نوع قلیایی (B) با بلوم ۲۵۰ از شرکت مرک (آلمان) و تمامی مواد شیمیایی از شرکت مرک (آلمان) تهیه شدند. مقدار رطوبت، چربی و خاکستر دانه کنجد بر اساس روش AOAC به ترتیب شماره‌های ۹۲۵۰/۱۰، ۹۳۰/۰۹ و ۹۴۲/۰۵ تعیین شد (AOAC, 2012). برای اندازه‌گیری رطوبت، ۲ گرم دانه کنجد در ظرفی قرار داده شد که از قبل وزن شده بود. این مقدار کنجد در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت خشک شد. میزان رطوبت با محاسبه اختلاف وزن اولیه و ثانویه نمونه بر وزن اولیه به دست آمد. میزان چربی با استخراج از طریق سوکسله با حلال پترولیوم اتر با نقطه جوش ۶۰-۴۰ درجه سلسیوس تعیین شد. برای اندازه‌گیری مقادیر خاکستر، ۲ گرم نمونه در بوتله چینی به مدت ۸ ساعت در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس سوزانده شد و خاکستر کل به صورت درصد وزن خشک بیان

اولئوزوم‌ها از محصولات روغنی، استخراج آنها از منابعی مانند دانه‌های کتان، کنجد و فندق می‌تواند اهمیت بالایی داشته باشد، زیرا این دانه‌ها غنی از ترکیبات حساس شیمیایی از جمله اسیدهای چرب امگا و ویتامین‌ها هستند (Sowmya et al., 2009). از نظر صنعتی، استفاده از اولئوزوم‌ها به عنوان جایگزین روغن در محصولات مختلف، رشد قابل توجهی داشته است و استفاده از اولئوزوم‌های مستخرج شده از گیاهان در صنعت تولید شکلات و شیر سویا سبب افزایش پایداری و بهبود ارزش غذایی شده است (Abdullallah et al., 2020).

بسیاری از فراورده‌های غذایی از جمله محصولات لبنی مانند شیر سویا، توفو، ماست و پنیر شامل ژل‌های کامپوزیتی بر پایه یک شبکه زیست پلیمری حاوی ذرات چربی هستند. ذرات چربی به عنوان عوامل شکننده ساختار در ژل عمل می‌کنند. از این رو برای برآورد دوام ویژگی‌های رئولوژیکی ژل‌های کامپوزیتی از لحاظ قدرت ژلی و ویژگی‌های شکست، ارزیابی خصوصیات ذرات چربی با اهمیت است. ویژگی‌های رئولوژیکی ژل‌های کامپوزیتی وابسته به اندازه ذرات و فعل و انفعالات بین شبکه ژل و سطح ذرات است. در صورت نبود فعل و انفعالات گفته شده، ذرات چربی به عنوان پرکننده‌های غیر فعال عمل می‌کنند و ویژگی‌های مکانیکی ژل را کاهش می‌دهند. از سوی دیگر، اگر اجسام چربی با شبکه احاطه کننده اثر متقابل داشته باشند، قطره‌ها به عنوان پرکننده‌های فعال عمل می‌کنند و با بهبود ویژگی‌های مکانیکی ژل سبب سفتی آن می‌شوند (Geremias et al., 2016). جایگزین کردن ذرات چربی فراورده‌های غذایی در فراورده‌هایی مثل محصولات لبنی با اولئوزوم‌ها ممکن است سبب تغییر در شبکه ژل و متعاقب آن تغییر در ویژگی‌های بافتی و مکانیکی محصول شود (Kirimlidou et al., 2017). کریملیدو و همکاران (Kirimlidou et al., 2017) با مطالعه ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی ژل کامپوزیتی تولید شده با استفاده از شبکه پروتئینی ژلاتین حاوی اولئوزوم‌های دانه کنجد و فندق دریافتند با به‌کارگیری اولئوزوم‌ها، زمان ژلی شدن حدود ۳۰-۲۰ درصد کاهش، درحالی‌که دمای ژلی شدن ۳۰ درصد

### استخراج اولئوزوم دانه کنجد و تعیین بازدهی استخراج اولئوزوم

اولئوزوم‌های دانه کنجد طبق روش کریملیدو و همکاران (Kirimlidou *et al.*, 2017) استخراج شد. دانه‌های کنجد تمیز شده با نسبت ۱ به ۵ (وزنی - حجمی) با محلول کلرید سدیم ۰/۵ مولار مخلوط و به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. پس از آن، pH مخلوط توسط هیدروکسید سدیم ۱ مولار به ۹ رسانده و ثابت نگه‌داشته شد. مخلوط به مدت ۳ ساعت با همزن مغناطیسی با سرعت ثابت ۱۲۰۰ rpm هم‌زده و به مدت ۱ دقیقه با مخلوط‌کن خانگی میکس شد. مخلوط سپس از طریق فیلتر دو لایه از جنس متقال صاف و باقی‌مانده صافی دوباره با محلول کلرید سدیم با نسبت ۱ به ۵ (وزنی - حجمی) مخلوط شد. pH آن با هیدروکسید سدیم ۱ مولار به ۹ افزایش داده و دوباره توسط فیلتر دو لایه صاف شد. دو محلول حاصل از صافی با هم مخلوط و با دور ۳۰۰۰ g به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شدند. بعد از سانتریفیوژ شدن، مخلوط به صورت دو فاز جداگانه مایع و جامد تبدیل و قسمت مایع جدا گردید و به منظور استخراج پروتئین نگهداری شد. قسمت خامه‌ای شکل با محلول ساکارز به نسبت ۱ به ۲، به طوری که غلظت نهایی ۰/۵ مولار باشد مخلوط و با دور ۳۰۰۰ g به مدت ۳۰ دقیقه سانتریفیوژ شد و درصد چربی آن توسط آب مقطر استاندارد گردید و سپس توسط بن‌ماری در دمای ۹۸ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه پاستوریزه شد (Kirimlidou *et al.*, 2017). به منظور جلوگیری از رشد میکروارگانیسم‌ها، به خامه سدیم آزید<sup>۱</sup> در یک غلظت ۰/۰۱ (وزنی/وزنی) افزوده شد.

برای تعیین بازدهی استخراج اولئوزوم از دانه کنجد، از رابطه (۲) استفاده گردید (Ntone *et al.*, 2020).

شد. میزان فیبر نمونه به روش ۱۰-۳۲ AACC اندازه‌گیری شد (AACC, 1999). به منظور تعیین پروتئین خام دانه کنجد از روش کلدال مطابق AOAC شماره ۹۲۰/۱۵۲ استفاده گردید (AOAC, 2012). مقدار کربوهیدرات نمونه با تفاوت بین مجموع کل درصد رطوبت، چربی، فیبر، پروتئین، خاکستر و عدد ۱۰۰ تعیین شد (Elleuch *et al.*, 2007).

### استخراج پروتئین دانه کنجد و تعیین بازدهی استخراج پروتئین

ایزوله پروتئین کنجد بر اساس روش ال اداوی (El-Adawy, 1997) استخراج شد. برای این منظور ابتدا از دانه‌های آسیاب شده با استفاده از n-هگزان به روش سرد روغن زدایی شد. پس از حلال‌زدایی، مواد بدون چربی خشک آسیاب و الک شد. برای استخراج، از سدیم هیدروکسید ۰/۵ درصد (وزنی/حجمی) در pH برابر ۱۱ به مدت ۱ ساعت استفاده شد. برای سانتریفیوژ کردن، سرعت دورانی rpm ۳۰۰۰ به مدت ۲۰ دقیقه انتخاب شد. مایع رویی جدا و pH آن تا ۴/۵ کاهش داده شد. این مخلوط با دور ۷۰۰۰ g به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ گردید. مواد رسوب کننده تا pH برابر ۷ خنثی و شسته شدند. مواد به دست آمده پس از خشک شدن در آون تحت خلأ در دمای ۴۰ درجه سلسیوس آسیاب و الک (مش ۱۰۰)، ساخت شرکت الک دماوند) گردیدند و به عنوان ایزوله پروتئین کنجد در دمای ۴ درجه سلسیوس در کیسه‌های پلی اتیلنی نگهداری شدند. میزان پروتئین موجود در ایزوله پروتئین کنجد ۸۷/۵ درصد اندازه‌گیری شد. برای تعیین بازدهی استخراج پروتئین از دانه کنجد از رابطه (۱) استفاده گردید (Ntone *et al.*, 2020).

(۱)

$$\text{بازدهی پروتئین} (\%) = \frac{\text{گرم پروتئین در ماده جامد باقی مانده}}{\text{گرم پروتئین در دانه کنجد}} \times 100 - 100$$

<sup>1</sup> Sodium azide

### تعیین اندازه ذرات اولئوزومها

اندازه قطره‌ها / ذرات اولئوزوم و شاخص توزیع اندازه ذرات (PDI)<sup>۱</sup> اولئوزومها با استفاده از دستگاه تفرق نور<sup>۲</sup> (Malvern، ساخت انگلستان) تعیین شد. اندازه‌گیری‌ها پس از رقیق سازی نمونه‌ها با آب مقطر تا محتوی چربی ۰/۰۵ درصد (وزنی / وزنی) تحت همزدن شدید با استفاده از همزن مکانیکی صورت گرفت ( Kirimlidou *et al.*, 2017).

### آماده سازی نمونه‌ها

به منظور تهیه تیمارهای ژل کامپوزیت از ژلاتین خالص، پروتئین استخراج شده از دانه کنجد و اولئوزوم دانه کنجد استفاده شد. وزن همه تیمارها براساس ۱۰۰ گرم ژل در نظر گرفته شد. مطابق جدول (۱)، از نسبت-های مختلف پروتئین کنجد به ژلاتین (درصد وزنی / وزنی) و آب مقطر استفاده شد. محلول به‌منظور هیدراته شدن به مدت ۲ ساعت در دمای اتاق قرار گرفت. سپس، به مدت ۱ دقیقه با همزن مکانیکی با سرعت ثابت rpm ۲۰۰ هم زده شد. ژل نهایی با مخلوط کردن ۲۰ درصد وزنی اولئوزوم در دمای ۵۰ درجه سلسیوس تهیه شد (Kirimlidou *et al.*, 2017).

جدول ۱- فرمولاسیون ژل‌های کامپوزیت ژلاتین، پروتئین دانه کنجد و اولئوزوم استخراج شده از دانه کنجد

Table 1- Formulation of gelatin composite gels, sesame seed protein and oleosome extracted from sesame seed

اولئوزوم دانه کنجد (درصد براساس وزن کل) Sesame seed oleosomes (% Total weight)	نسبت پروتئین کنجد به ژلاتین (وزنی/وزنی) Sesame Protein/ Gelatin ratio (w/w%)	پروتئین کنجد (گرم) Sesame Protein (gr)	ژلاتین (گرم) Gelatin (gr)	آب (گرم) Water (gr)	تیمار Treatment
-	0: 100	-	4	96	شاهد Control
20	30: 70	1.2	2.8	76	1
20	50: 50	2	2	76	2
20	70: 30	2.8	1.2	76	3

<sup>2</sup> Dynamic Light Scattering(DLS)

<sup>1</sup> Poly Dispersity Index

$$\text{گرم روغن در ماده جامد باقی مانده} \times \frac{100 - 100}{\text{گرم روغن در دانه کنجد}} = \text{بازده } (\%) \quad (2)$$

### تعیین ویژگی‌های شیمیایی اولئوزومها

مقدار رطوبت، چربی و پروتئین به ترتیب با روش خشک کردن در آون، روش سوکسله و روش کلدال تعیین شد (AOAC, 2012).

### بررسی مورفولوژی اولئوزومها

از میکروسکوپ نوری (Carl Zeiss، ساخت آلمان) برای بررسی ریز ساختار اولئوزومها استفاده شد. برای اجرای این آزمون، ابتدا ۱ گرم از نمونه با ۵ میلی‌لیتر آب مقطر رقیق و با رودامین به نسبت ۱ به ۵ رنگ-آمیزی شد. پس از آن ۱۰ میکرولیتر از نمونه در اسلاید میکروسکوپ قرار گرفت و با لامل پوشانده شد. اندازه ذرات مشاهده شده بر اساس سطح میانگین ذرات با برنامه Image proplus گزارش شد ( Altuna *et al.*, 2013).

### بررسی ریز ساختار ژل های تهیه شده

ریزساختار ژل های کامپوزیتی حاوی اولتوزوم دانه کنجد با استفاده از میکروسکوپ نوری (مدل Carl Zeiss، ساخت آلمان) بررسی شد. نمونه ها با رودامین به نسبت ۱ به ۱۰ رنگ- آمیزی و با میکروسکوپ مشاهده شدند (Kirimlidou *et al.*, 2017).

### تجزیه و تحلیل داده ها

آزمایش ها در قالب طرح کاملا تصادفی در سه تکرار اجرا شدند. داده ها با استفاده از تجزیه واریانس یک طرفه آنالیز و میانگین ها با آزمون دانکن ( $p < 0.05$ ) مقایسه شدند. در پژوهش حاضر برای آزمایش ها سه تکرار در نظر گرفته شد. به منظور آنالیز آماری داده ها از نرم افزار SPSS نسخه ۲۶ استفاده گردید و شکل ها در نرم افزار Office Excel 2010 رسم شدند.

### نتایج و بحث

#### ویژگی های شیمیایی کنجد

نتایج مربوط به ویژگی های شیمیایی دانه کنجد و بازدهی استخراج پروتئین از دانه کنجد در جدول (۲) نشان داده شده است. مطابق این جدول، بازده استخراج پروتئین از دانه کنجد برابر با  $1/23 \pm 21$  درصد گزارش است. بورچانی و همکاران (Borchani *et al.*, 2010). میزان چربی، پروتئین، کربوهیدرات و خاکستر دانه کنجد را به ترتیب ۵۸-۴۴، ۲۵-۱۸، ۱۳/۵ و ۵ درصد گزارش کردند. مؤمنی و همکاران (Momeni *et al.*, 2015) نیز میزان فیبر موجود در دانه کنجد را ۵/۹۷ درصد گزارش کرده اند.

### تعیین ویژگی های ویسکو الاستیک نمونه های ژل

#### آزمون روبش دما

در این آزمون، میزان مدول ذخیره ( $G'$ ) و مدول افت ( $G''$ ) که معرف ویژگی های ساختاری مواد هستند، در قالب یک آزمون نوسانی با میزان فرکانس ثابت (سرعت آزمون ثابت) بر حسب کاهش دما محاسبه شدند. برای این منظور، در ناحیه ویسکو الاستیک خطی کرنش ثابت (۱ درصد)، فرکانس زاویه ای ثابت ( $6/28 \text{ rad/s}$ ) و در فرکانس ثابت (۱ هرتز)، دمای فرآیند از ۵۰ درجه سلسیوس به ۴ درجه سلسیوس کاهش یافت و شاخص های بافتی  $G'$ ،  $G''$  و ویسکوزیته کمپلکس ( $\eta^*$ ) هریک از نمونه های ژل در این ناحیه با استفاده از دستگاه رئومتر Anton paar مدل Physica 301 MCR، ساخت اتریش) تعیین شدند (Kirimlidou *et al.*, 2017).

#### آنالیز بافت ژل های کامپوزیتی

آنالیز بافت ژل تهیه شده با استفاده از دستگاه بافت سنج تستومتریک (اینسترون، مدل M350، 10CT، ساخت کشور انگلستان) در دمای محیط اندازه گیری شد. در این آزمون، از پروب میله ای با قطر ۱۳ میلی متر، سرعت حرکت ۱۰۰ میلی متر بر دقیقه و با عمق نفوذ ۱۵ میلی متر در نمونه استفاده گردید. نتایج بر اساس سفتی ژل<sup>۱</sup>، چسبندگی<sup>۲</sup> و نیروی گسستگی<sup>۳</sup> گزارش گردید. سفتی ژل با سنجش حداکثر ارتفاع منحنی نفوذ پلانگر مشخص می شود. نیروی چسبندگی حداکثر نیروی منفی برای خارج شدن پلانگر از ژل است. نیروی گسستگی، اولین گسستگی قابل توجه در نمودار پلانگر درون ژل در جابه جایی کل ۱۵ میلی متر تعیین می شود (Motamed zadegan *et al.*, 2014).

<sup>3</sup> Breaking force

<sup>1</sup> Hardness

<sup>2</sup> Adhesiveness

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی دانه کنجد و بازدهی استخراج پروتئین از دانه کنجد

**Table 2- Chemical properties of sesame seeds and protein extraction efficiency from sesame seeds**

بازدهی استخراج پروتئین (%) protein extraction efficiency (%)	فیبر (%) Fiber (%)	کربوهیدرات (%) Carbohydrate (%)	خاکستر (%) Ash (%)	پروتئین (%) Protein (%)	چربی (%) Lipid (%)	رطوبت (%) Moisture (%)	ویژگی Parameter
21 ± 1.23	4.64 ± 0.08	13.23 ± 0.12	4.55 ± 0.71	19.59 ± 1.34	53 ± 0.02	5 ± 0.01	

و  $0.04 \pm 0.71$  درصد و بازده استخراج اولئوزوم از دانه کنجد برابر با  $1/41 \pm 68/96$  درصد است. ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2019) میزان رطوبت، چربی، پروتئین و خاکستر اولئوزوم دانه سویا را به ترتیب  $14/7$ ،  $20/9$ ،  $40/4$  و  $5/4$  درصد و میزان رطوبت، چربی و پروتئین اولئوزوم دانه کنجد را به ترتیب  $17/66$ ،  $80/56$  و  $0/95$  درصد اعلام کردند. نتایج تحقیق حاضر با مطالعات پیشین مطابقت دارد.

### ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی اولئوزوم استخراج شده از دانه کنجد

مقادیر رطوبت، چربی، پروتئین و بازدهی استخراج اولئوزوم از دانه کنجد در جدول (۳) آورده شده است. مشخص گردید میزان رطوبت، چربی و پروتئین اولئوزوم‌های استخراج شده از دانه کنجد به ترتیب  $0/05 \pm 25/64$ ،  $0/08 \pm 73/98$  و  $0/04 \pm 0/71$  درصد است.

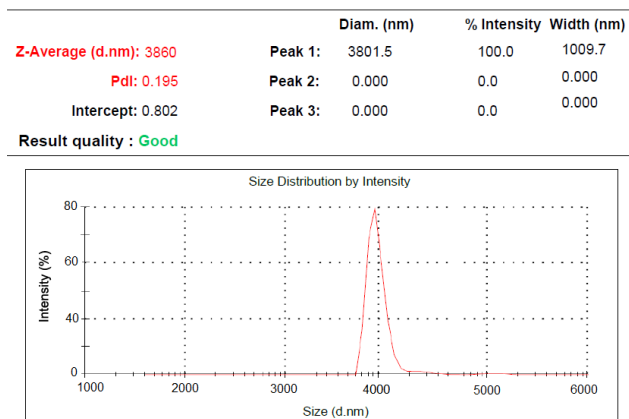
جدول ۳- ویژگی‌های شیمیایی اولئوزوم دانه کنجد و بازدهی استخراج اولئوزوم از دانه کنجد

**Table 3- Chemical properties of sesame seed oleosome and oleosome extraction efficiency from sesame seed**

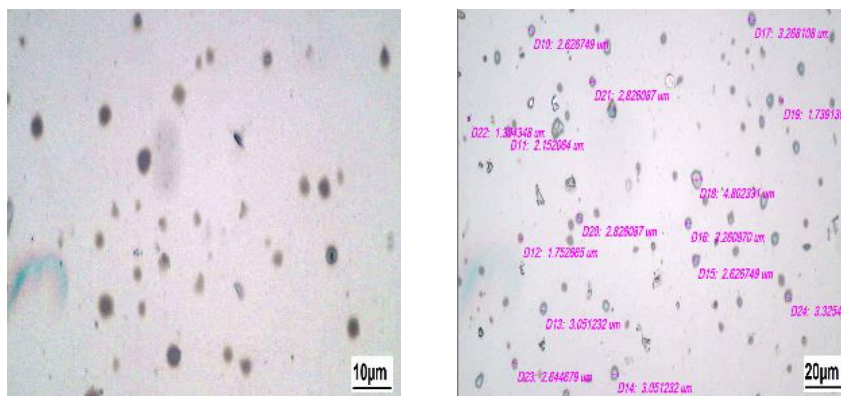
بازدهی استخراج اولئوزوم (%) Oleosome extraction efficiency (%)	پروتئین (%) Protein (%)	چربی (%) Lipid (%)	رطوبت (%) Moisture (%)	ویژگی Parameter
68.96 ± 1.41	0.71 ± 0.04	73.98 ± 0.08	25.64 ± 0.05	

کننده نتایج DLS است. کریملیدو و همکاران (Kirimlidou *et al.*, 2017) اندازه اولئوزوم‌های استخراج شده از دانه کنجد و فندق را ارزیابی و مشاهده کردند که متوسط اندازه ذرات اولئوزوم‌ها در محدوده ۱ تا ۲۵ میکرومتر است. این محققان می‌گویند خوشه‌ای شدن و به هم چسبیدن اولئوزوم‌ها سبب می‌شود تا اندازه برخی از آن‌ها درشت نشان داده شود، ولی به طور کلی بیان کردند که این اولئوزوم‌ها دارای اندازه‌های کمتر از ۱۰ میکرومتر هستند.

اندازه ذرات و شاخص توزیع اندازه ذرات (PDI) نمونه‌های اولئوزوم استخراج شده از دانه کنجد در شکل (۱) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که میانگین اندازه ذرات اولئوزوم استخراج شده از دانه کنجد  $3/86$  میکرومتر و شاخص توزیع اندازه ذرات برابر با  $0/195$  است. اولئوزوم‌های استخراج شده از دانه کنجد (شکل ۲) کمتر از ۵ میکرومتر هستند و به صورت پراکنده در محیط مشاهده می‌شوند. نتایج به‌دست آمده از بررسی‌های میکروسکوپی (شکل ۲) تایید



شکل ۱- میانگین اندازه ذرات و شاخص PDI اولئوزوم‌های استخراج شده از دانه کنجد  
**Fig 1- Mean particle size and PDI index of oleosomes extracted from sesame seeds**



شکل ۲- تصویر اولئوزوم‌های استخراج شده از دانه کنجد در زیر میکروسکوپ نوری

**Fig 2- Images of oleosomes extracted from sesame seeds**

کمتر از مقدار  $G''$  است. سپس  $G'$  در دمای معینی افزایش می‌یابد و از  $G''$  بیشتر می‌شود که نشان‌دهنده تشکیل ژل است (Yang *et al.*, 2020). با در نظر گرفتن نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر مشاهده شد که  $G'$  و  $G''$  در محدوده دمایی (۵۰ تا ۴ درجه سلسیوس) در هیچ نقطه‌ای تقاطع ندارند و با افزودن اولئوزوم و با افزایش میزان پروتئین کنجد، اختلاف بین مقادیر  $G''$  و  $G'$  در دمای ۵۰ درجه سلسیوس افزایش یافته است. به طوری که در تیمار (۱) احتمال تقاطع  $G'$  و  $G''$

### ویژگی‌های رئولوژیکی ژل‌های کامپوزیتی

هنگامی که مقادیر  $G'' < G'$  است (خاصیت ژل)، رفتار الاستیک بر ویسکوز غالب است و در صورتی که مقادیر  $G'' > G'$  است (رفتار مایع)، رفتار ویسکوز بر رفتار الاستیک غالب می‌شود. در روبش سرمایشی نقطه تقاطع  $G'$  و  $G''$  ( $G'' = G'$ ) به عنوان نقطه بستن ژل (تشکیل ژل) تعریف می‌شود. طی فرایند سرد شدن، زمانی که هنوز تشکیل ژل اتفاق نیفتاده، مقدار  $G'$



است. با افزایش میزان پروتئین کنگد از نسبت ۳۰ به ۷۰ درصد وزنی، مدول‌های ذخیره و افت افزایش یافتند که نشان می‌دهد پروتئین کنگد به مقدار قابل توجهی بر دمای تشکیل و سفت شدن ژل تاثیر گذار بوده است. افزایش مدول ذخیره ( $G'$ ) با افزایش نسبت پروتئینی کنگد به ژلاتین نیز ممکن است با پایداری سازی شبکه ژلی توسط پروتئین دانه کنگد از طریق تغییر در تشکیل پیوند هیدروژنی در ارتباط باشد، که این امر مبنای تشکیل شبکه ژلی و شبکه سه بعدی ژلاتین است. در این حالت، تشکیل پیوندهای پروتئین-پروتئین احتمالا با افزایش میزان پروتئین کنگد رخ می‌دهد که بیانگر زیست سازگاری مناسب پروتئین کنگد و ژلاتین است (Marafon *et al.*, 2011). ایزوله پروتئین کنگد شامل پروتئین‌های انحلال پذیر است که وزن مولکولی بالایی دارند و می‌توانند آب بیشتری حفظ کنند و بنابراین بر همکنش‌های پروتئین-پروتئین افزایش می‌یابد (Gomez-Arellano *et al.*, 2017). از طرف دیگر، با مخلوط کردن پروتئین کنگد و ژلاتین، حجم هیدرودینامیکی اشغال شده توسط این بیوپلیمرها در محیط افزایش خواهد یافت. زیرا با افزایش میزان یک پروتئین حجم هیدرودینامیکی اشغال شده توسط آن منجر به افزایش غلظت پلیمر دیگر در محلول باقی‌مانده خواهد شد (Clark *et al.*, 1982). این نتایج با یافته‌های پنگ و همکاران (Pang *et al.*, 2013) مطابقت دارد. این محققان مشاهده کردند که با به-کارگیری پروتئین‌های شیر در فرمولاسیون ژل بر پایه ژلاتین مدول ذخیره ژل‌های مخلوط افزایش می‌یابد. این محققان دلیل این امر را تقویت شبکه ژلی توسط پروتئین‌های شیر به واسطه ایجاد و تغییر در پیوندهای هیدروژنی شبکه ژلاتین نسبت دادند. معتمدزادگان و همکاران (Motamed zadegan *et al.*, 2014) اعلام کردند افزایش در قدرت نگهداری آب در داخل شبکه پروتئینی ماست به وجود ژلاتین و در نتیجه افزایش استحکام ژل به دلیل افزایش قدرت پیوند پروتئین-های آب پنیر مرتبط است. مطالعات یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2020) نشان می‌دهد که در دمای ۴۰-۳۶ درجه سلسیوس، میزان  $G'$  در سیستم ژل حاوی اولئوزوم و صمغ

در بعد از دمای ۵۰ درجه سلسیوس نسبت به سایر تیمارها (به غیر از تیمار شاهد) بسیار نزدیک‌تر است. از این رو می‌توان دریافت که با استفاده از اولئوزوم و نیز با افزایش در میزان پروتئین دانه کنگد در ساختار ژل، دمای نقطه ژلی شدن افزایش می‌یابد. در تیمار شاهد در دمای ۵۰ درجه سلسیوس مدول افت و ذخیره همدیگر را قطع کردند که می‌توان این دما را به عنوان نقطه تشکیل ژل برای ژلاتین خالص در نظر گرفت (Abouei *et al.*, 2016).

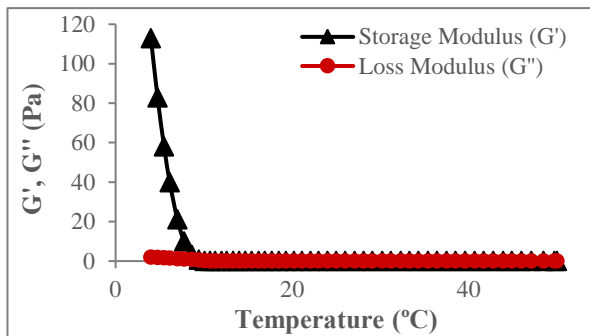
پس از بررسی نتایج مشخص گردید (شکل ۳) در تمامی تیمارهای ژل کامپوزیت و تیمار ژل شاهد مدول ذخیره بالاتر از مدول افت است و بیانگر برتری ذاتی پاسخ الاستیک به ویسکوز در نمونه‌هاست. در تیمار شاهد (ژلاتین خالص) در دمای حدود ۷ درجه سلسیوس میزان مدول ذخیره به شدت افزایش یافته و تفاوت بین رفتارهای الاستیک و ویسکوز در این دما و پایین‌تر از آن افزایش پیدا کرده‌است.

در تیمار ۱ (شکل ۳) مدول ذخیره از دمای ۵۰ تا ۴ درجه سلسیوس افزایش یافته است و این افزایش میزان مدول ذخیره در دمای پایین‌تر از ۱۰ درجه سلسیوس مشهودتر است. یافته‌های حاضر نشان می‌دهد افزودن پروتئین کنگد باعث شده که رفتار الاستیک نسبت به ویسکوز برتری یابد و در هیچ دمایی نقطه تلاقی بین آنها مشاهده نشود. نتایج تحقیق همچنین نشان داد که تغییرات در مدول ذخیره با کاهش دما اتفاق می‌افتد. در تمام تیمارها، با حضور ۲۰ درصد اولئوزوم میزان مدول ذخیره و افت با کاهش دما افزایش یافتند و حضور اولئوزوم رفتار رئولوژیکی ژل را تحت تاثیر قرار داده است.

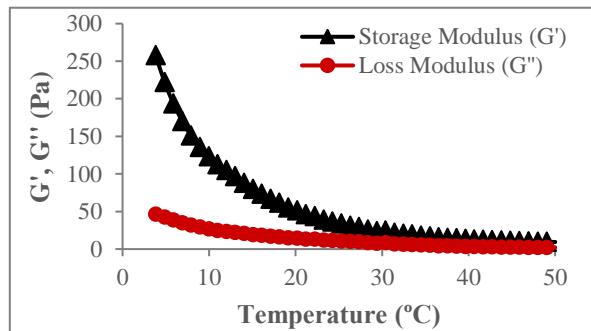
در تیمار ۲ (شکل ۳) که حاوی مقادیر یکسان از ژلاتین و پروتئین کنگد با مقدار ثابت ۲۰ درصد اولئوزوم است، نیز افزایش در مدول ذخیره و افت ایجاد شده و در دمای حدود ۴ درجه سلسیوس به ترتیب (۳۶۱ و ۱۰۶ پاسکال) گزارش شد. در تیمار ۳ (شکل ۳) که حاوی مقدار ژلاتین کمتر، پروتئین کنگد بیشتر و میزان اولئوزوم ۲۰ درصد است، با کاهش دما مقادیر مدول‌های ذخیره و افت افزایش یافته است، به‌ویژه در دماهای پایین‌تر از ۲۰ درجه سلسیوس روند افزایشی تندتر

یافته‌های ون ویلیت ( Van Vliet, 2013 ) نیز مطابقت دارد. گزارش گردید که پرکننده‌های فعال (جایی که قطرها به ماتریکس اتصال یافته یا تعاملاتی برقرار کرده است) مدول الاستیک ساختار ژلی بهبود یافته است. درحالی که پرکننده‌های غیرفعال (جایی که قطرها با ماتریکس تعامل ندارند) مدول الاستیک سیستم ژل را کاهش می‌دهند.

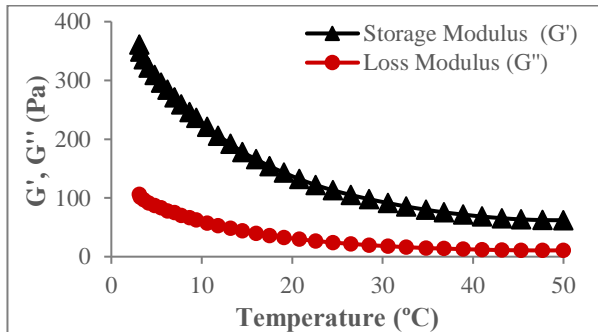
کاراگینان به صورت ناگهانی از ۲-۰/۵ پاسکال به ۲۰۰۰۰-۱۰۰۰۰ پاسکال افزایش می‌یابد که بیانگر تشکیل ساختار ژل است. یافته‌ها نشان می‌دهد که میزان اولئوزوم و pH بر دمای تشکیل و استحکام ژل موثر است، به طوری که با افزایش میزان اولئوزوم تا ۱۰ درصد وزنی در ساختار ژل دمای تشکیل ژل افزایش می‌یابد که می‌تواند نشان‌دهنده برهمکنش الکترواستاتیکی بین قطره‌های اولئوزوم و ماتریکس کاراگینان باشد. قطره‌های اولئوزوم می‌توانند به عنوان پلی بین پلیمرها عمل کنند و منجر به ژل شدن در دماهای بالاتر طی فرایند خنک‌سازی گردند. تاثیر میزان اولئوزوم بر مدول الاستیک با



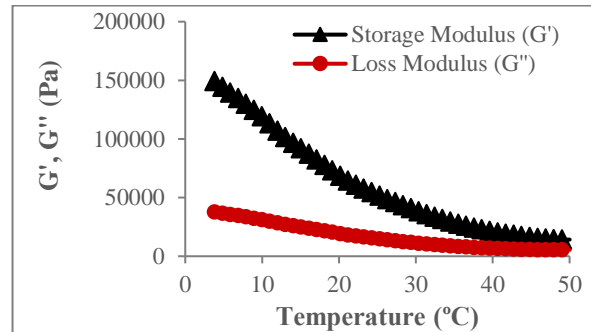
(شاهد)



(۱)



(۲)



(۳)

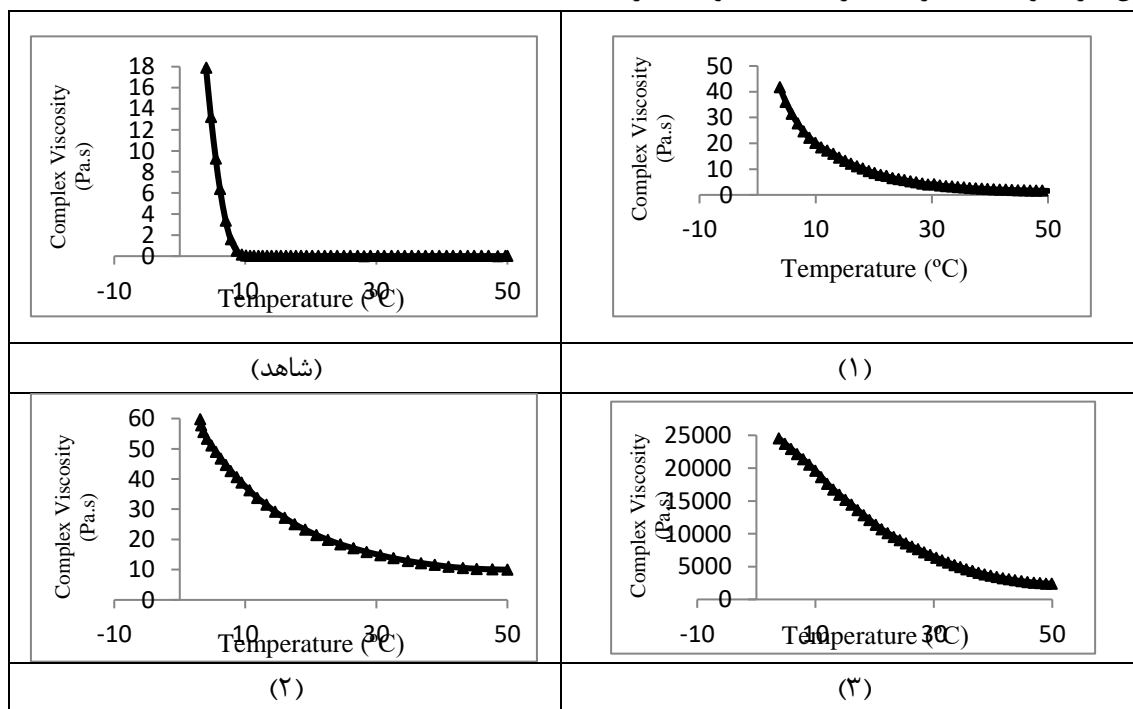
شکل ۳- تغییرات مدول‌های دینامیکی ( $G'$  و  $G''$ ) ژل‌های کامپوزیت ژلاتین، پروتئین دانه کنجد و اولئوزوم دانه کنجد به عنوان تابعی از دما (کاهش دما از ۵۰ تا ۴ درجه سلسیوس)

شاهد) ژلاتین خالص، (۱) پروتئین کنجد به ژلاتین ۳۰:۷۰ حاوی ۲۰ درصد اولئوزوم کنجد، (۲) پروتئین کنجد به ژلاتین ۵۰:۵۰ حاوی ۲۰ درصد اولئوزوم کنجد، (۳) پروتئین کنجد به ژلاتین ۷۰:۳۰: ۳۰ حاوی ۲۰ درصد اولئوزوم کنجد

Fig 3- Changes in the dynamic modulus ( $G'$  and  $G''$ ) of composite gelatin gels, sesame seed protein and sesame seed oleosome as a function of temperature (temperature decrease from 50 to 4 °C)  
Control) Pure gelatin, 1) Sesame protein : gelatin (30:70) contain 20% sesame oleosome, 2) Sesame protein : gelatin (50:50) contain 20% sesame oleosome, 3) Sesame protein : gelatin (70:30) contain 20% sesame oleosome

تغییرات ویسکوزیته کمپلکس تیمارهای ژل کامپوزیت در شکل (۴) نشان داده شده است. بر این اساس، همان طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، تغییرات میزان ویسکوزیته کمپلکس تیمارهای ژل کامپوزیت دارای روند مشابهی با تغییرات شاخص‌های مدول ذخیره و مدول افت هستند. در همه تیمارها، با کاهش دما از ۵۰ تا ۴ درجه سلسیوس ویسکوزیته کمپلکس نیز افزایش می‌یابد. در تیمار شاهد (ژلاتین خالص) میزان ویسکوزیته کمپلکس از دمای حدود ۷ درجه سلسیوس تا دمای ۴ درجه سلسیوس افزایش قابل توجهی می‌یابد و به میزان ۱۷/۹ Pa.s می‌رسد. در تیمارهای (۱) و (۳) که نسبت میزان ژلاتین و پروتئین کنگد در ساخت ژل آنها متفاوت است، میزان ویسکوزیته کمپلکس در نمونه‌ها به ترتیب در دمای حدود ۴ درجه

تغییرات ویسکوزیته کمپلکس تیمارهای ژل کامپوزیت در شکل (۴) نشان داده شده است. بر این اساس، همان طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، تغییرات میزان ویسکوزیته کمپلکس تیمارهای ژل کامپوزیت دارای روند مشابهی با تغییرات شاخص‌های مدول ذخیره و مدول افت هستند. در همه تیمارها، با کاهش دما از ۵۰ تا ۴ درجه سلسیوس ویسکوزیته کمپلکس نیز افزایش می‌یابد. در تیمار شاهد (ژلاتین خالص) میزان ویسکوزیته کمپلکس از دمای حدود ۷ درجه سلسیوس تا دمای ۴ درجه سلسیوس افزایش قابل توجهی می‌یابد و به میزان ۱۷/۹ Pa.s می‌رسد. در تیمارهای (۱) و (۳) که نسبت میزان ژلاتین و پروتئین کنگد در ساخت ژل آنها متفاوت است، میزان ویسکوزیته کمپلکس در نمونه‌ها به ترتیب در دمای حدود ۴ درجه



شکل ۴- تغییرات ویسکوزیته کمپلکس ژل‌های مخلوط ژلاتین، پروتئین دانه کنگد و اولئوزوم دانه کنگد به عنوان تابعی از دما (کاهش دما از ۵۰ تا ۴ درجه سلسیوس)

شاهد) ژلاتین خالص، (۱) پروتئین کنگد به ژلاتین ۳۰:۷۰ حاوی ۲۰ درصد اولئوزوم کنگد، (۲) پروتئین کنگد به ژلاتین ۵۰:۵۰ حاوی ۲۰ درصد اولئوزوم کنگد، (۳) پروتئین کنگد به ژلاتین ۷۰:۳۰: ۳۰ حاوی ۲۰ درصد اولئوزوم کنگد

Fig4- Changes in complexity viscosity of gelatin, sesame seed protein and sesame seed oleosome complex as a function of temperature (temperature decrease from 50 to 4 ° C)

Control) Pure gelatin, 1) Sesame protein : gelatin (30:70) contain 20% sesame oleosome, 2) Sesame protein : gelatin (50:50) contain 20% sesame oleosome, 3) Sesame protein : gelatin (70:30) contain 20% sesame oleosome

## ویژگی‌های بافتی ژل‌های کامپوزیتی

تخلیه‌ای<sup>۱</sup> به‌وجود می‌آید و پروتئین‌هایی که در سطح اولئوزوم‌ها قرار دارند، دارای بار منفی می‌شوند و در حضور ژلاتین نیروی جاذبه الکترواستاتیکی قوی ایجاد می‌کنند. همچنین مشاهده گردید اختلاط قطره‌های روغن در حضور مقادیر ژلاتین سبب تقویت ژل خواهد شد. در پژوهش حاضر، افزایش نسبت پروتئین کنگد احتمالاً سبب تقویت شبکه پروتئینی و شبکه ژلی می‌شود و افزایش استحکام ژل و سفتی آن را در بر خواهد داشت. استحکام بیشتر ژل در نتیجه تشکیل بیشتر پیوندهای هیدروژنی و تعامل‌های بیشتر هر دو پروتئین منجر به افزایش سفتی بافت خواهد شد. اولئوزوم‌ها به واسطه ویژگی‌های امولسیفایری که دارند باعث تقویت ساختار ژل می‌شوند زیرا این ترکیبات مانند پلی بین اجزای تشکیل دهنده ژل عمل می‌کنند و این عمل همراه با سفتی بافت خواهد بود. از طرف دیگر، ماهیت روغنی اولئوزوم‌ها سبب می‌شود این ترکیبات در صورت به‌کارگیری در غلظتی بالاتر از غلظت بهینه به عنوان روان کننده عمل کنند و سبب کاهش میزان سفتی بافت ژل شوند (Zhang *et al.*, 2019). نتایج به دست آمده در این پژوهش با یافته‌های دیگر محققان (Zhang *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2019) از لحاظ ویژگی‌های بافتی سازگار است. این محققان دریافتند ژل‌های کامپوزیت حاوی پروتئین میوفیبریلار ماهی کپور و روغن دانه کاملیا افزایش معنی داری ( $p < 0.05$ ) در مقدار مدول ذخیره و افت نشان می‌دهند و نیز اینکه لیپیدها پایداری ساختار ژل را بهبود می‌بخشند و از این رو لیپیدها می‌توانند به عنوان پرکننده‌های فعال در شبکه پروتئینی میوفیبریلار عمل کنند.

تغییرات شاخص‌های بافت ژل‌های کامپوزیتی مانند سفتی، چسبندگی و نیروی گسستگی، تحت تاثیر نسبت به-کارگیری پروتئین دانه کنگد به ژلاتین و نیز به‌کارگیری اولئوزوم دانه کنگد در فرمولاسیون ژل‌های مخلوط است. مقایسه میانگین داده‌ها براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در جدول (۴) نشان داده شده است. براساس نتایج به دست آمده، با مقایسه تیمار شاهد و تیمار شماره (۱) مشخص شد که میزان سفتی و چسبندگی در تیمار (۱) به‌طور معنی داری افزایش یافته است. در تیمارهای (۱، ۲ و ۳) با افزایش میزان پروتئین کنگد در ساختار ژل میزان سفتی ژل نیز افزایش و میزان چسبندگی به‌صورت معنی داری ( $p < 0.05$ ) کاهش یافته است. کمترین میزان سفتی در نمونه‌های ژل کامپوزیت برابر با  $0.00 \pm 0.24$  نیوتن و بیشترین میزان آن برابر با  $1.54 \pm 0.01$  نیوتن است که به ترتیب مربوط به تیمار شاهد و تیمار (۳) هستند. روند تغییرات نیروی گسستگی در تیمارها مشابه روند تغییرات میزان سفتی در تیمارهاست، به‌طوری‌که با افزایش میزان پروتئین کنگد در ساختار ژل‌ها میزان گسستگی نیز افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، با افزایش نسبت پروتئین کنگد به ژلاتین و استفاده از اولئوزوم تا سطح ۲۰ درصد منجر به افزایش سفتی بافت و ژلی قوی‌تر شدند.

نتایج به‌دست‌آمده با نتایج تحقیقات کریملیدو و همکاران (Kirimlidou *et al.*, 2017) همخوانی دارد. این محققان دریافتند بین ژلاتین و قطره‌های روغن اولئوزوم تعاملات

<sup>1</sup> Depletion interactions

جدول ۴- پارامترهای بافتی و مکانیکی نمونه‌های ژل کامپوزیت  
Table 4- Textural and mechanical parameters of composite gel samples

نیروی گسستگی (N) Breaking force (N)	چسبندگی (Kgf.s) Adhesiveness (Kgf.s)	سفتی (N) Hardness (N)	ویژگی
			تیمار Treatment
0.05 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.07 ± 0.00 <sup>c</sup>	0.24 ± 0.00 <sup>d</sup>	شاهد Control
0.08 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.22 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.59 ± 0.01 <sup>c</sup>	1
0.08 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.22 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.61 ± 0.07 <sup>b</sup>	2
0.18 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.17 ± 0.01 <sup>b</sup>	1.54 ± 0.01 <sup>a</sup>	3

\*حروف کوچک متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار ( $p < 0.05$ ) در سطح احتمال ۹۵ درصد در هر ستون هستند.

\*Different lowercase letters show a significant difference ( $p < 0.05$ ) in the 95% probability level in each column.

(شاهد) ژلاتین خالص، (۱) پروتئین کنجد به ژلاتین ۳۰:۷۰ حاوی ۲۰ درصد اولئوزوم کنجد، (۲) پروتئین کنجد به ژلاتین ۵۰:۵۰ حاوی ۲۰ درصد اولئوزوم کنجد، (۳) پروتئین کنجد به ژلاتین ۷۰:۳۰ حاوی ۲۰ درصد اولئوزوم کنجد

Control) Pure gelatin, 1) Sesame protein : gelatin (30:70) contain 20% sesame oleosome, 2) Sesame protein : gelatin (50:50) contain 20% sesame oleosome, 3) Sesame protein : gelatin (70:30) contain 20% sesame oleosome

### ویژگی‌های ریزساختار ژل‌های کامپوزیتی

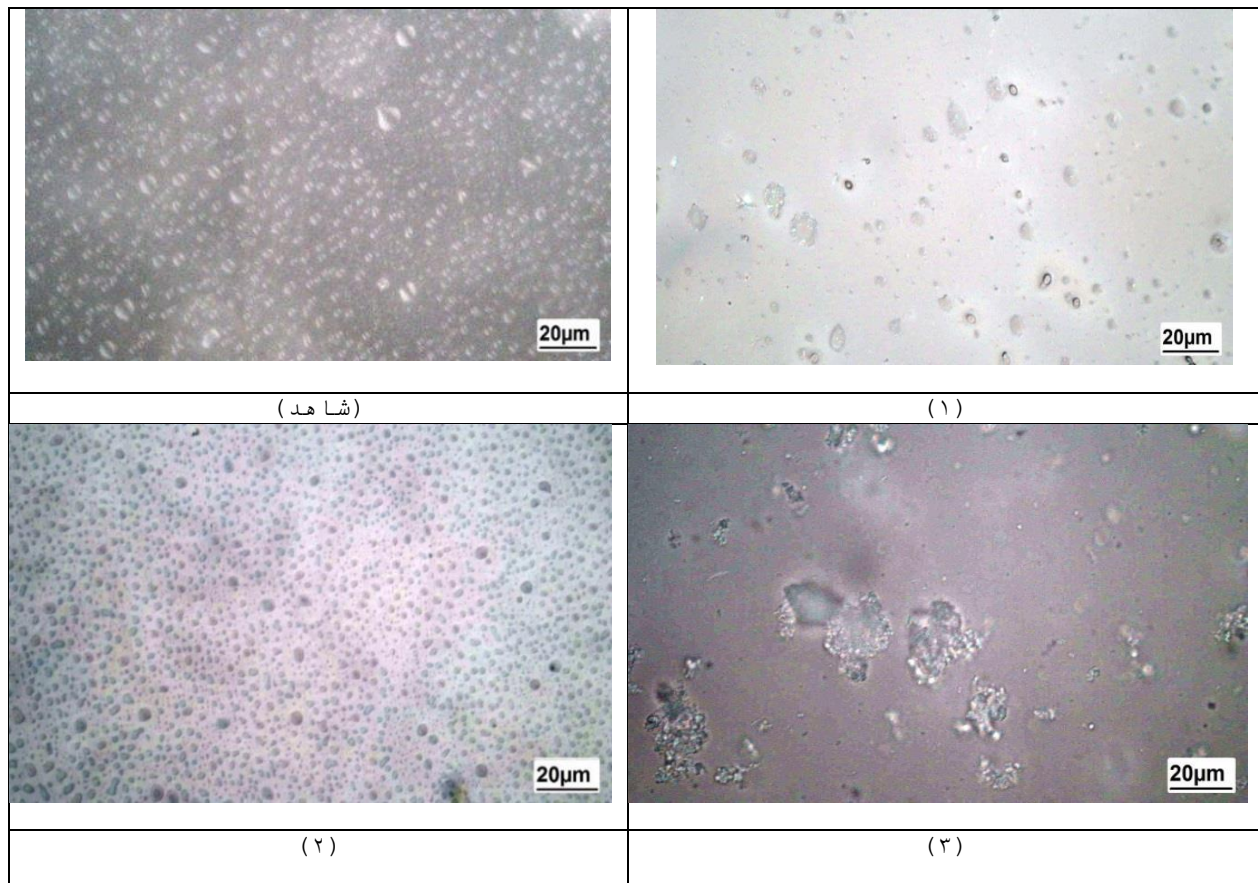
ژلی قرار دارند به دلیل وجود اولئوزوم، ساختار متراکم‌تر شده است. در تیمار (۲) اولئوزوم‌ها به صورت یکنواخت در ساختار ژل پراکنده شده‌اند. در تیمار (۳) احتمالاً به دلیل افزایش نسبت پروتئین کنجد به ۷۰ درصد وزنی، پدیده کوآگولاسیون رخ داده است و مولکول‌های پروتئینی تجمع یافتند که به صورت ذرات درشت در ساختار ژل قابل مشاهده‌اند. اولئوزوم‌های موجود در ساختار ژل شماره (۳) به وضوح دیده نشدند. پروتئین کنجد تمایل به تجمع و ایجاد حالت متراکم دارد، ولی در ترکیب با ژلاتین از تجمع پروتئین‌ها کاسته شده است. در مطالعات پیشین گزارش شده است غلظت‌های متفاوت ژلاتین، pH و افزودن پروتئین‌های شیر بر رفتار ژلاسیون، ساختار میکروسکوپی، بافت و رئولوژی ژل‌ها تاثیر گذار هستند. در غلظت‌های پایین ژلاتین، ژل بافت نرم و شکننده‌ای نشان می‌دهد و با افزودن دو درصد ترکیبات پروتئینی شیر، ژل مقاومت خوبی در برابر شکنندگی پیدا می‌کند و هر چه میزان غلظت ژلاتین بیشتر شود بافت محکم‌تری در ژل ایجاد می‌شود (Zhang et al., 2020).

نیکیفوریدیس و همکاران (Nikiforidis et al., 2014) می‌گویند اولئوزوم کنجد به دلیل دارا بودن پروتئین‌های فعال سطحی و ترکیبات فسفولیپیدی می‌توانند باعث بهبود ساختار و بافت ژل شوند. به طور کلی، اولئوزوم‌ها در برابر تجمع یا

توزیع اولئوزوم در ساختار ژل‌های ساخته شده بر پایه ژلاتین خالص و پروتئین کنجد در شکل (۵) نشان داده شده است. اولئوزوم‌ها در ماتریکس ژلاتینی و پروتئین کنجد نسبتاً یکنواخت توزیع شده‌اند. از میکروسکوپ نوری نمی‌توان دقیقاً برای تعیین کمی اندازه اولئوزوم‌ها استفاده کرد، ولی تصاویر نشان می‌دهند که اولئوزوم‌ها در ساختار ژل‌ها اندازه نزدیکی به امولسیون اصلی دارند. این مطلب نشان‌دهنده این است که تجمع گسترده‌ای در دوره تشکیل و گسترش ساختار ژلی اتفاق نیفتاده است و با افزایش میزان اولئوزوم توزیع اندازه ذرات بهبود پیدا کرده است که احتمالاً مربوط به خاصیت امولسیون‌کنندگی اولئوزوم کنجد است. ترکیب اولئوزوم با پروتئین کنجد به‌خصوص باعث ایجاد توزیع یکنواختی از مولکول‌های امولسیون شده است که دلیل آن پروتئین‌های سطحی موجود در سطح اولئوزوم است. این پروتئین‌های سطحی به بهبود پایداری امولسیون و نیز بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی ژل کمک می‌کنند. در تیمار شاهد که حاوی ژلاتین خالص است، ذرات به‌صورت یکنواخت در همه جای ساختار ژل قرار دارند و ساختار ژلاتین خالص قابلیت شکسته شدن را دارد. در تیمار (۱) در ساختار ژل قطره‌های ژلاتین قابل مشاهده‌اند و اولئوزوم‌ها نیز به صورت پراکنده در ساختار

اولئوزوم باشد. یافته‌های پیشین نشان دادند هنگامی که ماتریکس ژلاتینی با قطره‌های اولئوزوم اتصال یابند، اثر پرکننده فعال و تقویت سفتی ژل کامپوزیت صورت می‌گیرد. در مجموع، انتظار می‌رود در نتیجه افزایش حجم موثر روغن و تجمع قطره‌ها، ساختار ژل تقویت شود. در تیمار (۳)، با افزایش میزان پروتئین کنجد در ساختار ژل، کواگولاسیون نسبت به دیگر تیمارها دیده شد که این تجمع به علت اثرهای ترکیبی نیروهای جاذب ایجاد شده بین ژلاتین، پروتئین کنجد و اولئوزوم است که باعث تعامل‌های تخلیه‌ای فرعی شده است (Kirimlidou et al, 2017).

کواگوله شدن و نیز چسبندگی پایدار هستند و در برابر فشار-های محیطی برای مدت طولانی مقاومت می‌کنند. این ثبات و پایداری مربوط به بارمنفی نسبتاً زیاد سطح اولئوزوم است که از نزدیک شدن و تجمع اولئوزوم‌ها جلوگیری می‌کند (Nikiforidis et al., 2014). از طرفی، فلوکولاسیون تخلیه‌ای در ماتریکس اولئوزوم-ژلاتین با حضور ژلاتین تحریک می‌شود. تخلیه در محلول‌های شامل ژلاتین پدیده‌ای شناخته شده است. تعامل‌های تخلیه‌ای تمایل به حرکت اجسام روغنی به طرف یکدیگر ایجاد خواهد کرد. یک توضیح دیگر برای ریز ساختارهای ناهمگن ژل‌های ژلاتینی کامپوزیتی می‌تواند در نتیجه اختلاط اولیه نامناسب بین ژلاتین، پروتئین کنجد و



شکل ۵- ریز ساختار ژل‌های کامپوزیت ژلاتین، پروتئین دانه کنجد و اولئوزوم دانه کنجد

شاهد) ژلاتین خالص، (۱) پروتئین کنجد به ژلاتین ۳۰:۷۰ حاوی ۲۰ درصد اولئوزوم کنجد، (۲) پروتئین کنجد به ژلاتین ۵۰:۵۰ حاوی ۲۰ درصد اولئوزوم کنجد، (۳) پروتئین کنجد به ژلاتین ۷۰:۳۰ حاوی ۲۰ درصد اولئوزوم کنجد

Fig 5- Morphology of gelatin composite gels, sesame seed protein and sesame seed oleosome

Control) Pure gelatin, 1) Sesame protein: gelatin (30:70) contains 20% sesame oleosome, 2) Sesame protein: gelatin (50:50) contain 20% sesame oleosome, 3) Sesame protein: gelatin (70:30) contain 20% sesame oleosome

## نتیجه گیری

( $p < 0.05$ ) کاهش می‌یابد. مطالعات ریز ساختار ژل‌های تولید شده نشان داد در ژل‌های حاوی اولئوزوم ساختار متراکم‌تر و اولئوزوم‌ها به صورت یکنواخت در ساختار ژل پراکنده شده‌اند. با افزایش نسبت پروتئین دانه کنگد به ۷۰ درصد وزنی، در بعضی از نقاط تجمع ذرات پروتئینی در ساختار ژل قابل مشاهده بود. اولئوزوم‌ها به دلیل دارا بودن پروتئین‌های فعال سطحی و ترکیبات فسفولیپیدی می‌تواند باعث بهبود ساختار و بافت ژل شوند. به طور کلی، می‌توان گفت ژل‌های کامپوزیتی بر پایه ژلاتین- پروتئین دانه کنگد اصلاح شده با اولئوزوم می‌توانند به عنوان جزئی از اجزای مواد غذایی در انواع محصولات لبنی، دسرهای ژلاتینی، محصولات گوشتی ژله‌ای و تولید محصولی فراسودمند استفاده شوند.

در تحقیق حاضر، ژل کامپوزیت بر پایه ژلاتین و پروتئین دانه کنگد به عنوان ماتریکس پر شده با اولئوزوم طبیعی به دست آمده از دانه کنگد تهیه گردید. اثر نسبت‌های متفاوت ترکیبات ماتریکس بر ریز ساختار، بافت و خصوصیات رئولوژیکی ژل کامپوزیت بررسی شد. با مطالعه ویژگی‌های رئولوژیکی ژل کامپوزیت مشخص گردید با افزایش میزان پروتئین کنگد از نسبت ۳۰ تا ۷۰ درصد وزنی، مدول‌های ذخیره و افت افزایش یافتند و پروتئین کنگد بر رفتار ژلاسیون و سفت شدن ژل تاثیر گذار هستند. نتایج به دست آمده نشان داد، با افزایش میزان پروتئین کنگد در ساختار ژل میزان سفتی ژل و گسستگی افزایش و میزان چسبندگی به صورت معنی داری

## تعارض منافع

نویسندگان در خصوص انتشار مقاله ارائه شده به طور کامل از سوء اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافی تجاری در این راستا وجود ندارد.

## مراجع

- AACC. 1999. Approved Method of The American Association of Cereal Chemists. St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists.Ins.
- Abdullah, Weiss, J., and Zhang, H. 2020. Recent advances in the composition, extraction and food applications of plant-derived oleosomes. Trends in Food Science & Technology. 106: 322-332.
- Abouei, E., Jafarpour, A., and Motamed zadegan, A. 2016. Effects of microbial transglutaminase (MTGase) on functional and rheological properties of big head (*Hypophthalmichthys nobilis*) fish skin gelatin. Journal of food science and technology. 58 (13): 93-106.
- Altuna, F. I. , Pettarin, V. , and Williams, R. J. 2013. Self-healable polymer networks based on the cross-linking of epoxidised soybean oil by an aqueous citric acid solution. Green chemistry.15(12): 3360-3366.
- AOAC. 2012. Official Methods of Analysis. Washington, DC, USA: Association of Official Analytical Chemists.
- Borchani, C., Besbes, S., Blecker, Ch. and Attia, H. 2010. Chemical Characteristics and Oxidative Stability of Sesame Seed, Sesame Paste, and Olive Oils. Journal of Agricultural Science and Technology. 12: 585-596.

- Chang, M. T., Chen, C. R., Liu, T. H., Lee, C. P. and Tzen, J. T. 2013. Development of a protocol to solidify native and artificial oil bodies for long-term storage at room temperature. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 93(6), 1516-1519.
- Clark, A. H. , Richardson, R. K. , Robinson, G. , Ross-Murphy, S. B. , and Weaver, A. C. 1982. Structure and mechanical properties of agar/BSA co-gels. *Progress in food and nutrition science*. 6: 149-160.
- El-Adawy, T. 1997. Effect of sesame seed protein supplementation on the nutritional, physical, chemical and sensory properties of wheat flour bread. *Food chemistry*. 59(1): 7-14.
- Elleuch, M., Besbes, S., Roiseux, O., Blecker, C. and Attia Hamadi. 2007. Quality characteristics of sesame seeds and by-products. *Food Chemistry*. 103: 641–650.
- Geremias-Andrade, I., Souki, N., Moraes, I. and Pinho, S. 2016. Rheology of Emulsion-Filled Gels Applied to the Development of Food Materials. *Journal of gels*. 2(22): 1-18.
- Gomez- Arellano, A., Jimenez- Islas, H., Castrejon- Gonzalez, E. O., Medina- Torres, L., Dendooven, L., and Escamilla- Silva, E. M. 2017. Rheological behavior of sesame (*Sesamum indicum* L.) protein dispersions. *Food and Bioproducts Processing*. 106: 201-208.
- Hou, R.C.W., Lin, M.Y., Wang, M.M.C. and Tzen., J.T.C. 2003. Increase of Viability of Entrapped Cells of *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* in Artificial Sesame Oil Emulsions. *International Journal of Dairy Science*. 86(2):424–428.
- Kirimlidou, M., Matsakidou, A., Scholten, E., Nikiforidis, C. V. and Kiosseoglou, V. 2017. Composite gels structured by a gelatin protein matrix filled with oil bodies. *Food Structure*. 14: 46-51.
- Kumar, C.M., Singh, S.A. 2015. Bioactive lignans from sesame (*Sesamum indicum* L.): evaluation of their antioxidant and antibacterial effects for food applications. *Journal of Food Science and Technology*. 52: 2934-2941.
- Ma, X., Wang, Z., Zheng, C., Liu, CH. 2022. A comprehensive review of bioactive compounds and processing technology of sesame seed. *Oil Crop Science*. 7(2): 88-94.
- Marafon, A. P., Sumi, A., Granato, D., Alcantara, M. R., Tmime, A. Y., and de Oliveira, M. N. 2011. Effects of partially replacing skimmed milk powder with dairy ingredients on rheology, sensory profiling, and microstructure of probiotic stirred-type yogurt during cold storage. *Journal of Dairy Science*. 94: 5330-5340.
- Michailidis, D., Angelis, A., Aligiannis, N., Mitakou, S., Skaltsounis, L. 2019. Recovery of sesamin, sesamol, and minor lignans from sesame oil using solid support-free liquid liquid extraction and chromatography techniques and evaluation of their enzymatic inhibition properties. *Frontiers in Pharmacology*. 10: 723.
- Momeni, SH., Ghiassi Tarzi, B. 2015. Evaluation and Comparison of Some Chemical Properties of Sesame Seed and Flaxseed. *Journal of Food Science and Nutrition*. 12(4): 77-84.
- Morris, E. R. 1990. Shear-thinning of ‘random coil’ polysaccharides: Characterisation by two parameters from a simple linear plot. *Carbohydrate Polymers*. 13(1): 85-96.



- Motamedzadegan, A., Shahidi, S. A., Hosseiniparvar, S. H., Ebdali, S. 2014. Evaluation effects of gelatins types on functional properties of fat free set style yogurt. *Journal of food science and technology*.47 (12): 221-230.
- Nikiforidis, C. V. 2019. Structure and functions of oleosomes (oil bodies). *Advances in Colloid and Interface Science*. 274, 102039.
- Nikiforidis, C. V., Matsakidou, A., and Kiosseoglou, V. 2014. Composition, properties and potential food applications of natural emulsions and cream materials based on oil bodies. *RSC Advances*. 4(48): 25067-25078.
- Ntone, E., Bitter, J.H. and Nikiforidis, C.V. 2020, Not sequentially but simultaneously: Facile extraction of proteins and oleosomes from oilseeds. *Food Hydrocolloids*. 102: 105598.
- Peng, C. C., Lin, I., Lin, C. K. and Tzen, J. T. 2003. Size and stability of reconstituted sesame oil bodies *Biotechnology progress*. 19(5): 1623-1626.
- Sowmya, M., Jeyarani, T., Jyotsna, R. and Indrani, D. 2009. Effect of replacement of fat with sesame oil and additives on rheological, microstructural, quality characteristics and fatty acid profile of cakes. *Food Hydrocolloids*. 23(7): 1827-1836.
- Van Rooijen, G. J. and Motoney, M. M. 1995. Plant seed oil-bodies as carriers for foreign proteins. *Nature Biotechnology*. 13(1): 72-78.
- Van Vliet, T. *Rheology and fracture mechanics of foods*. 2013. Boca Raton. 1st Edition. CRC Press. 363 pp.
- White, D., Fisk, I., Mitchell, J., Wolf, B., Hill, S. and Gray, D. 2008. Sunflower-seed oil body emulsions: rheology and stability assessment of a natural emulsion. *Food Hydrocolloids*. 22(7): 1224-1232.
- Yang, N., Feng, Y., Su, Ch., Wang, Q., Zhang, Y., Wei, Y., Zhao, M., Nishinari, K., Fang, Y. 2020. Structure and tribology of k-carrageenan gels filled with natural oil bodies. *Food Hydrocolloids*. 107: 105945.
- Zhang, M., Yang, Y. and Acevedo, N. C. 2020. Effects of pre-heating soybean protein isolate and transglutaminase treatments on the properties of egg-soybean protein isolate composite gels. *Food Chemistry*. 318: 126421.
- Zhang, Y., Yang, N., Yu, Y., Wang, Q., Huang, P., Nishinari, K. and Fang, Y. 2019. Improving the Stability of Oil Body Emulsions from Diverse Plant Seeds Using Sodium Alginate. *Molecules*., 24(21): 3856.
- Zhou, X., Chen, H., Lyu, F., Lin, H., Zhang, Q. and Ding, Y. 2019. Physicochemical properties and microstructure of fish myofibrillar protein-lipid composite gels: Effects of fat type and concentration. *Food Hydrocolloids*. 90: 433-44.

Original Research

# Evaluation of rheological and textural structure of composite gels using oleosome and sesame seed protein

F. Sheikh, M. Hasani\*, H. Kiani, M. J. Asadollahzadeh and J. Seyfi

\*Corresponding author: Assistant Professor, Department of Food science and Technology, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran. Email: [m.hasani@iau-shahrood.ac.ir](mailto:m.hasani@iau-shahrood.ac.ir)

Received: 10 November 2021 Accepted: 10 June 2023

[http://doi: 10.22092/FOODER.2023.356674.1318](http://doi:10.22092/FOODER.2023.356674.1318)

## Abstract

In the present study, a composite gel was prepared based on gelatin and sesame seed protein containing a fixed amount of oleosome. The different ratios of sesame protein to gelatin (30:70, 50:50, 70:30 w/w%) and a constant amount of 20% (w) oleosome were used to prepare the composite gel. Then the physicochemical properties of sesame seeds, oleosomes and their extraction efficiencies were determined. The rheological, textural and microstructural properties of the gels were also investigated. Protein and oleosome extraction efficiencies from sesame seeds were  $21 \pm 1.23\%$  and  $68.96 \pm 1.41\%$ , respectively. The results showed that the amount of sesame seed protein had significant effect on the gelation behavior and gel hardening, and the storage modulus and loss modulus increased in the samples with the decrease of the process temperature from 50 to 4 degrees Celsius. With the increase of sesame protein ratio, the amount of storage modulus and loss modulus at 4 degrees Celsius temperature increased from 258 pascals to 149400 pascals and from 46.7 pascals to 37648 pascals, respectively. The accumulation of protein molecules in the gel structure was observed with increasing the proportion of sesame protein to 70% by light microscope. The results of the present research confirm that sesame seed oleosome can be used as a substitute for fat particles in food products.

**Keywords:** Sesame Seed Oleosome, Sesame Seed Protein, Composite Gel, Loss modulus, Storage modulus