



## مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: [www.fsct.modares.ac.ir](http://www.fsct.modares.ac.ir)

مقاله علمی-پژوهشی

### بررسی تأثیر به کارگیری هیدروکلوئیدهای مختلف به عنوان ژلاتور بر ویژگی‌های کیفی اولئوژل روغن کانولا

آرزو توکلی نجف‌آبادی<sup>۱</sup>، هاجر عباسی<sup>۲\*</sup>

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها، واحد اصفهان (خوراسگان)،

دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۲- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها، دانشگاه آزاد اسلامی،

اصفهان، ایران

#### اطلاعات مقاله

#### چکیده

نظر به قابلیت ویژه پلیمرهای آب‌دوست در تشکیل اولئوژل‌ها، در این پژوهش، بررسی ویژگی‌های هفت هیدروکلوئید منتخب و بررسی تولنایی آن‌ها در تشکیل اولئوژل مورد نظر قرار گرفت. به این منظور اولئوژل‌های مبتنی بر روغن کانولاجا استفاده از محلول‌های ۳٪ وزنی صمغ عربی (*AG*)، صمغ دلنه لوکاست (*LBG*)، زانتان (*XG*)، گوار (*GG*)، هیدروکسی پروپیل متیل سلولز (*HPMC*)، کربوکسی متیل سلولز (*CMC*) و کاراگینان (*CG*) تهیه شدند. قابلیت حفظ روغن، سفتی بافت، رفتار حرارتی، خصوصیات رئولوژیکی، ساختار کریستالی و طیف مادون قرمز اولئوژل‌های تولید شده مورد ارزیابی قرار گرفتند. تمامی اولئوژل‌ها رفتار ویسکوالاستیک جامد از خود نشان دادند و مدول‌های الاستیک و کمپلکس آن‌ها با افزایش فرکانس افزایش و ویسکوزیته کمپلکس آن‌ها کاهش یافت که نشان از رفتار رقیق‌شونده با برش دارد. در این میان، صمغ دانه لوکاست و اولئوژل تهیه شده از آن ضعیف‌ترین ویژگی ویسکوالاستیک و بیشترین میزان نشست روغن را دارا بود. در پروفایل حرارتی اولئوژل‌ها، یک تا پنج قله اندوترمیک مشاهده شد که نمایانگر ویژگی‌های تبلوری متفاوت اولئوژل‌ها و تشکیل پلی‌مورف‌های مختلف در آنهاست. اولئوژل حاوی *AG* بالاترین و نمونه دارای *LBG* کمترین سفتی بافت و آنتالپی ذوب را دارا بود. ارزیابی ساختارهای کریستالی نشان داد که همه نمونه‌ها به جز اولئوژل حاوی *LBG* دارای ترکیبی از کریستال‌های نیمه پایدار و پایدار  $\beta'$  و  $\beta$  هستند. تغییر شیمیایی قابل توجهی در ساختار نمونه‌ها مشاهده نگردید ولی افزایش شدت پیوندهای هیدروژنی و واندروالسی پس از تشکیل اولئوژل تأیید شد. در مجموع نوع هیدروکلوئید تأثیر به‌سزایی بر کنش‌های روغن-پلیمر و ویژگی‌های عملکردی اولئوژل‌ها نشان داد. *LBG* با ضعیف‌ترین خواص ویسکوالاستیک و دمای ذوب برای اولئوژلاسیون مناسب ارزیابی نشد، درحالی‌که اولئوژل‌های تهیه شده بر پایه روغن کانولاجا با *AG*، و پس از آن *HPMC* و *CMC* با ظرفیت اتصال روغن، استحکام و خواص ویسکوالاستیک مناسب برای کاربرد در محصولات غذایی با محتوی اسیدهای چرب اشباع و ترانس اندک مناسب بودند.

#### تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲

تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷

#### کلمات کلیدی:

اولئوژلاسیون،

رئولوژی،

روغن کانولا،

هیدروکلوئید

DOI: 10.48311/fsct.2026.84081.0

\* مسئول مکاتبات:

hajarabbasi@iau.ac.ir

## ۱-مقدمه

چربی‌های جامد نقش اساسی در فرمولاسیون مواد غذایی ایفا می‌کنند و بهبود بافت، طعم، پایداری اکسیداتیو و ارزش تغذیه‌ای محصولات را منجر می‌شوند [۱]. در محصولاتی مانند نان و شیرینی، استفاده از چربی‌های جامد ضروری است، زیرا تأثیر مستقیمی بر کیفیت نهایی و خصوصیات حسی محصولات دارد [۲]. روش‌هایی مانند هیدروژناسیون و استریفیکاسیون برای تبدیل روغن‌های مایع به چربی‌های جامد به کار می‌روند، اما این فرآیندها می‌توانند منجر به تولید اسیدهای چرب اشباع و ترانس شوند که اثرات منفی بر سلامت انسان دارد و احتمال افزایش بروز بیماری‌های قلبی، سرطان و دیابت را موجب می‌گردد [۲]. به همین دلیل، قوانین جدیدی برای محدود کردن مصرف این چربی‌ها وضع شده است و مطابق توصیه سازمان غذا و داروی آمریکا، لازم است مصرف چربی‌های اشباع به حداکثر ۱۰٪ از کل انرژی روزانه محدود شود [۳]. لذا، نیاز به توسعه روش‌های جایگزین برای تولید چربی‌های جامد کم‌ضرر احساس می‌شود. در این راستا، اولئوزل‌ها به‌عنوان جایگزین مناسب با محتوای بالاتر اسیدهای چرب ضروری و خواص تغذیه‌ای بهبود یافته پیشنهاد شده‌اند [۴].

اولئوزلاسیون یک روش نوین برای بهبود ویژگی‌های روغن بدون تغییر ساختار شیمیایی اسیدهای چرب موجود در آن است و روش جایگزینی برای تولید چربی‌های جامد حاوی اسید چرب غیراشباع بالا محسوب می‌شود [۳]. در این فرآیند با استفاده از ارگانوزلاتورها، روغن‌های گیاهی به یک ژل شبه جامد تبدیل و شبکه‌ای سه‌بعدی و برگشت‌پذیر حرارتی ایجاد می‌شود [۵]. ژلاتورهای به‌کار رفته در این سیستم‌ها می‌توانند ترکیبات آلی با وزن مولکولی کم (*LMOG*) یا پلیمرهای ژلاتور (*PG*) باشند که از طریق ایجاد پیوندهای هیدروژنی، واندروالسی و سایر برهم‌کنش‌های مولکولی موجبات پایداری ساختار را فراهم می‌کنند [۵، ۶]. کمیت و کیفیت ژلاتورهای مورد استفاده و

خصوصیات روغن پایه مهم‌ترین عوامل در ساختار و ویژگی‌های اولئوزل‌ها محسوب می‌شوند. اولئوزل‌ها در صنایع غذایی، دارویی و آرایشی کاربرد گسترده‌ای دارند و می‌توانند برای کاهش میزان اسیدهای چرب اشباع، جلوگیری از مهاجرت چربی و بهبود ویژگی‌های کیفی محصولاتی مانند کیک، شکلات و بستنی مورد استفاده قرار گیرند [۷].

هیدروکلئیدها گروهی از بیوپلیمرهای زنجیربلند هستند که به‌واسطه ماهیت آب‌دوست ناشی وجود گروه‌های هیدروکسیل قادرند با مولکول‌های آب پیوند برقرار کرده و ویژگی‌های مطلوبی ایجاد کنند [۸]. به دلیل توانایی بالای این ترکیبات در افزایش ویسکوزیته، تشکیل ژل، تثبیت فوم‌ها و امولسیون‌ها، و کنترل کریستالیزاسیون، در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی کاربرد گسترده‌ای دارند و نقش مهمی در فرمولاسیون مواد غذایی ایفا می‌کنند [۱]. هیدروکلئیدها از منابع گیاهی، میکروبی، حیوانی و دریایی تامین می‌شوند و در کنترل و اصلاح خواص رئولوژیکی، ویسکوزیته، بافت و ویژگی‌های حسی محصولات غذایی مؤثرند. کاربرد هیدروکلئیدها در محصولاتی مانند سس‌ها، مرباها، ژله‌ها، دسرها و مایونزهای کم‌چرب برای بهبود قوام و احساس دهانی مورد بررسی قرار گرفته است [۸]. گالاکتومانان گروهی از پلی‌ساکاریدها هستند که از مونوساکاریدهای مانوز و گالاکتوز تشکیل شده‌اند. یکی از مهم‌ترین آنها، صمغ لوبیای لوکاست<sup>۱</sup> (*LBG*) است که از دانه‌های *Ceretonia siliqua* استخراج می‌شود. این صمغ با نسبت مانوز به گالاکتوز حدود ۱:۴، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی منحصربه‌فردی دارد که تحت تأثیر توزیع گالاکتوز در زنجیره اصلی و البته شرایط محیطی مانند *pH* قرار می‌گیرد [۹، ۱۰]. *LBG* به دلیل خاصیت امولسیون‌کنندگی و تثبیت‌کنندگی در صنایع غذایی، مانند صنایع لبنیات و نوشیدنی به‌کار می‌رود. در پژوهش‌های اخیر نیز نقش این ترکیب در جایگزینی چربی در کیک

1-Lucost beam gum

*Xanthan* (Lucast Beam Gum - LBG)، صمغ زانتان (Guar Gum - GG)، صمغ گوار (Guar Gum - GG)، هیدروکسی پروپیل متیل سلولوز (Hydroxypropyl methylcellulose - HPMC)، کربوکسی متیل سلولوز (Carboxymethyl Carrageenan) و صمغ کاراگینان (Gum - CG) به عنوان ژلاتور بر کیفیت اولئوژل روغن متمرکز شده است. روغن کانولا به‌عنوان یکی از منابع روغنی خوراکی سالم که دارای مقادیر متعادلی از اسیدهای چرب امگا ۳ و امگا ۶ است و حفظ پروفایل اسیدهای چرب آن در فرمولاسیون محصولات غذایی ضرورت دارد، انتخاب گردید. اولئوژلاسیون این روغن با هدف ایجاد بافت و ساختاری مشابه چربی جامد بدون تغییر در ویژگی‌های اسیدهای چرب آن مورد نظر است. در این مطالعه علاوه بر مقایسه ویژگی‌های این هیدروکلونیدها، خواص بافتی، رئولوژیکی و حرارتی اولئوژل‌های تولید شده با استفاده از آن‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

### مواد اولیه

در این پژوهش به منظور تولید اولئوژل، از روغن کانولای تولید شده به روش پرس سرد توسط شرکت صنعتی به‌شهر و هفت هیدروکلونید مختلف شامل صمغ دانه لوکاست، عربی، زانتان، گوار، هیدروکسی پروپیل متیل سلولوز، کربوکسی متیل سلولوز و کاراگینان تهیه شده از شرکت *Sigma-Aldrich* استفاده شده است. انتخاب هیدروکلونیدها بر مبنی ساختار، ویژگی‌ها و عملکردشان با بررسی منابع و انجام آزمونهای مقدماتی در این خصوص صورت گرفت.

### خصوصیات رئولوژیکی هیدروکلونیدها

خصوصیات رئولوژیکی هیدروکلونیدها با استفاده از دستگاه رئومتر (*Anton Paar Instruments MCR 301*) ارزیابی شد.

روغنی بررسی و گزارش شده است که این هیدروکلونید، همراه با صمغ زانتان<sup>۲</sup> (*XG*)، تأثیر قابل توجهی بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی، رئولوژیکی و حسی کیک دارد [۱۱]. هیدروکسی پروپیل متیل سلولوز<sup>۳</sup> (*HPMC*) یکی از مشتقات سلولزی است که از واکنش سلولوز قلیایی با متیل کلرید و پروپیلن‌اکسید به دست می‌آید. این ترکیب دارای پایداری ویسکوزیته در شرایط اسیدی بوده و می‌تواند پایداری امولسیون‌ها را بهبود ببخشد [۱۲]. این پلیمر به دلیل قابلیت تشکیل فیلم و فعالیت سطحی مناسب، در فرمولاسیون‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این، اولئوژل‌های تهیه شده از *HPMC* به‌عنوان جایگزین چربی جامد در محصولات غذایی موجبات بهبود ساختار و پایداری بافت را فراهم نموده‌اند [۱۳]. یکی دیگر از مشتقات سلولوز، کربوکسی متیل سلولوز<sup>۴</sup> (*CMC*) است که یک پلیمر آنیونی خطی محسوب می‌شود و به دلیل حلالیت بالا و توانایی تشکیل محلول‌های ویسکوز و شفاف در طیف وسیعی از محصولات صنایع غذایی به‌کار می‌رود. در مطالعه‌ای که توسط جیانگ و همکاران [۱۴] انجام شد، کاربرد *CMC* همراه با سلولوز احیا شده (*RC*) در تولید اولئوژل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش غلظت *RC* باعث بهبود خواص رئولوژیکی امولسیون و افزایش مدول‌های ذخیره و اتلاف ( $G'$  و  $G''$ ) در اولئوژل‌ها می‌شود.

بررسی منابع نشان می‌دهد که اگرچه در مطالعات قبلی کاربرد برخی از هیدروکلونیدها به عنوان ژلاتور مورد مطالعه قرار گرفته است، ولی ارزیابی و مقایسه تأثیر ویژگی‌های آنها بر عملکردشان در این نقش نیازمند پژوهش‌های مؤثر بیشتری است. پژوهش حاضر به طور خاص به بررسی تأثیر هفت هیدروکلونید مختلف شامل صمغ عربی (*Arabic Gum - AG*)، صمغ دانه لوکاست

4- Carboxymethyl cellulose

2- Xanthan gum

3- Hydroxypropyl methylcellulose

مونو دی گلیسرید<sup>۸</sup> افزوده شد. ترکیب بدست آمده روی همزن مغناطیسی قرار داده شد تا کاملاً شفاف شود. مخلوط به دست آمده با هموژنایزر به مدت ۳ دقیقه همگن و سپس در دمای ۴ درجه سانتیگراد خنک گردید. سپس در فریزر ۸۰- درجه سانتیگراد منجمد و به مدت ۱۸ ساعت در خشک کن انجمادی (مدل FD-5005-BT) با دمای ۷۰- درجه سانتیگراد قرار داده شد تا رطوبت امولسیون، حذف شود. اولئوزل‌های به دست آمده با صمغ عربی (O-AG)، صمغ دانه لوکاست (O-LBG)، صمغ زانتان (O-XG)، صمغ گوار (O-GG)، هیدروکسی پروپیل متیل سلولوز (O-HPMC)، کربوکسی متیل سلولوز (O-CMC)، و صمغ کاراگینان (O-CG) آماده برای انجام آزمون‌های مورد نظر شدند [۶].

#### ارزیابی ویژگی‌های کیفی اولئوزل‌ها

##### نشت روغن

اندازه‌گیری مقدار نشت روغن<sup>۹</sup> اولئوزل‌ها با اعمال نیروی گریز از مرکز با استفاده از سانتریفیوژ انجام شد. به این منظور پنج گرم اولئوزل داخل فالکن توزین و سپس به سانتریفیوژ مدل PIT320R با دور ۹۰۰۰ rpm انتقال یافت. سانتریفیوژ کردن در مدت زمان ۱۰ دقیقه و در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد انجام گرفت. روغنی که از نمونه‌ها جدا شده بود با استفاده از وارونه کردن فالکن‌ها به مدت ۵ دقیقه تخلیه و وزن آن ثبت شد [۶]. درصد نشت روغن مطابق رابطه زیر محاسبه شده است.

$$= \text{درصد نشت روغن}$$

$$\times 100 = \frac{\text{وزن روغن خارج شده}}{\text{وزن اولیه روغن}}$$

رابطه ۳

برای این منظور، محلول ۳٪ هیدروکلونیدها تهیه و رفتار جریان آن‌ها در محدوده کرنش ۱۰۰-۰/۰۱ درصد در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد در قالب آزمون چرخشی بررسی شد. مدلسازی داده‌ها بر مبنی ارزیابی تغییرات تنش به کرنش با استفاده از مدل توان<sup>۵</sup> (رابطه ۱) و هرشل بالکلی<sup>۶</sup> (رابطه ۲) مطابق روابط زیر به منظور دستیابی به پارامترهای رئولوژیکی نمونه انجام گرفت [۱۵].

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad \text{رابطه ۱}$$

$$\tau = k\dot{\gamma}^n + \tau_0 \quad \text{رابطه ۲}$$

در این روابط،  $\tau$  تنش برشی،  $k$  ضریب قوام،  $\dot{\gamma}$  سرعت کرنش برشی،  $n$  اندیس جریان و  $\tau_0$  تنش تسلیم است.

#### ویژگی‌های حرارتی هیدروکلونیدها

رفتار حرارتی هیدروکلونیدها با استفاده از کالری سنج افتراقی (TA Instruments, Q1000, USA) ارزیابی شد. برای این منظور نمونه‌های ۱۰ میلی‌گرمی در ظروف آلومینیومی ته‌تخت قرار داده شدند و از ۵ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد با سرعت ۵ درجه سانتیگراد بر دقیقه حرارت‌دهی شدند [۱۶].

#### تهیه اولئوزل

ابتدا ۳ گرم از هیدروکلونیدهای مورد نظر با ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر ترکیب و به مدت ۲۰ دقیقه روی همزن مغناطیسی قرار داده شدند تا محلول ۳٪ وزنی نمونه‌ها به دست آید. محلول‌ها قبل از مصرف به مدت ۲۴ ساعت در یخچال با دمای ۴ درجه سانتیگراد نگهداری شدند. به منظور تولید اولئوزل به هریک از هیدروکلونیدهای تهیه شده، ۱۰۰ میلی‌لیتر روغن کانولا به همراه ۲/۵ گرم توئین ۸۰ و ۲/۵ گرم

8 - mono diglycerides

9 - Oil Release

5-Power law

6- Herschel -Bulkley

7 -Tween-80

## سفتی بافت

سفتی<sup>۱۰</sup> نمونه‌های اولئوژل، توسط دستگاه *Texture Profile Analysis (TPA)* مدل *STM20* مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا ۲۰ گرم از هر یک از نمونه‌ها درون ظروف مخصوص دستگاه ریخته شد و زیر پروپ استوانه‌ای دستگاه با قطر ۱۲/۷ میلی‌متر قرار گرفت. اعمال نیرو با سرعت ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه با عمق نفوذ ۵ میلی‌متر توسط لودسل ۶ کیلوگرم اعمال گردید. حداکثر نیروی لازم برای نفوذ پروپ در نمونه به عنوان شاخص سفتی بافت نمونه ثبت شد [۱۷].

## خصوصیات ویسکوالاستیک اولئوژل‌ها

جهت بررسی رفتار اولئوژل‌ها، آزمون نوسانی در فرکانس‌ها ۰/۱ تا ۱۰۰ هرتز و کرنش ثابت ۰/۱ درصد انجام شد. مدول ذخیره ( $G'$ )، مدول اتلاف ( $G''$ )، مدول کمپلکس ( $G^*$ )، تانژنت اختلاف فاز و ویسکوزیته کمپلکس ( $\eta^*$ ) ارزیابی شد [۱].

## رفتار حرارتی اولئوژل‌ها

رفتار حرارتی نمونه‌ها به روش والویی و همکاران [۱۷] با استفاده از دستگاه گرماسنج روبشی افتراقی<sup>۱۱</sup> (*DSC*) مدل *DSC131-SETARM* ساخت فرانسه انجام گرفت. محدوده دمای مورد بررسی از دمای محیط تا ۱۴۰ درجه سانتیگراد و نرخ تغییرات دما ۱۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه در نظر گرفته شد. انرژی مورد نیاز جهت تغییر فاز و آنتالپی مورد نیاز با انتگرال‌گیری از سطح زیر نمودار توسط نرم‌افزار دستگاه محاسبه گردید.

## طیف‌سنجی مادون قرمز

روغن کانولا و ارگانوژل‌ها به صورت مجزا با دستگاه طیف نگار فروسرخ تبدیل فوریه<sup>۱۲</sup> (*FTIR*) از شرکت *Jasco* مدل *FT/IR 6300* ساخت ژاپن آنالیز و در طیف ۷۸۰۰-۳۵۰ بر سانتیمتر و در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد اسکن شدند [۱۸].

## ساختار کریستالی

پراش اشعه ایکس<sup>۱۳</sup> به روش علی اصل خیابانی و همکاران [۲] برای بررسی ساختار کریستالی اولئوژل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها بر نگهدارنده قرار گرفتند، سطح آنها صاف شد و به دستگاه دیفراکتومتر *D8 ADVANCE* از شرکت *Bruker* آلمان منتقل شدند. برای ثبت الگوهای پراش پرتو ایکس، زاویه‌ی لندازه‌گیری از ۵ تا ۸۰ درجه و زمان اسکن یک ثانیه در نظر گرفته شد. آزمون در دمای محیط انجام شد.

## آنالیز آماری

در این پژوهش، ارزیابی‌های کیفی نمونه‌ها در سه تکرار انجام گرفت و آنالیز آماری داده‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. داده‌ها به صورت میانگین  $\pm$  انحراف معیار<sup>۱۴</sup> گزارش شد و مقایسه میانگین داده‌ها با روش آنالیز واریانس یک طرفه<sup>۱۵</sup> و بر مبنای فرض حداقل اختلاف معنی‌دار<sup>۱۶</sup> (*LSD*) در سطح اطمینان<sup>۱۷</sup> ۹۵ درصد توسط نرم‌افزار *SPSS* نسخه ۲۷/۰/۱ انجام گرفت.

14-Standard Deviation

15- One-Way ANOVA

16-Least Significant Diffrence

17-Confidence Intervals

10-Firmness

11-Differential Scanning Calorimetry

12-Fourier Transform Infrared

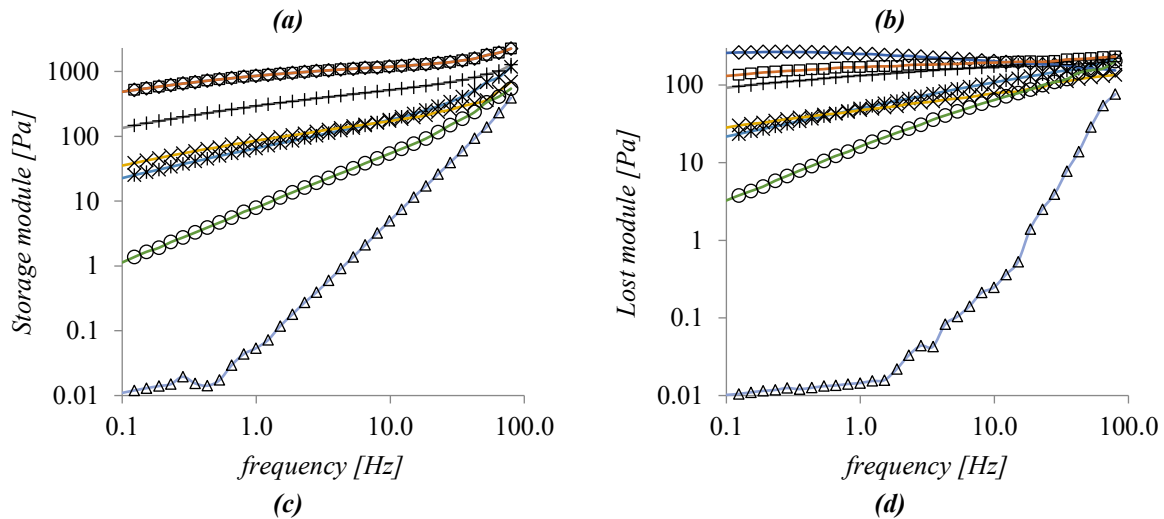
13-X-ray diffraction

## ۳- نتایج و بحث

## خواص رئولوژیکی هیدروکلوئیدها

رفتار رئولوژیکی متنوع صمغ‌ها ناشی از تفاوت‌های بنیادین در ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن‌ها از جمله وزن مولکولی، ساختار فضایی، نوع و ماهیت گروه‌های عاملی (آب‌دوست یا آب‌گریز)، چگالی بار الکتریکی، میزان حلالیت و توانایی آن‌ها در اتصال به مولکول‌های آب است. به عنوان مثال یکی از عوامل مؤثر در این تفاوت‌ها، نسبت مانوز به گالاکتوز در ساختار پلی‌ساکاریدی صمغ‌هاست. این نسبت در صمغ گوار حدود ۲ به ۱ و در صمغ دانه لوکاست حدود ۴ به ۱ گزارش شده است. چنین تفاوت ساختاری، بر قابلیت انحلال در آب و در نهایت بر خواص رئولوژیکی این ترکیبات اثرگذار است. ویژگی‌های رئولوژیکی منحصر به فرد صمغ گوار عمدتاً به حضور زنجیره‌های جانبی آن مربوط می‌شود که در محیط آبی به صورت ماریچ‌های نامنظم و گسترده درمی‌آید. این ساختار سبب به دام افتادن مولکول‌های آب و تشکیل یک شبکه سه بعدی پایدار با پیوندهای هیدروژنی قوی می‌شود [۱۹].

بر اساس نتایج آزمون‌های رئولوژی، *Error! Reference source not found.* و *a-source not found.* به ترتیب تغییرات مدول ذخیره ( $G'$ ) و مدول اتلاف ( $G''$ ) را برای هیدروکلوئیدهای مورد نظر در دمای ثابت نشان می‌دهند. ویژگی‌های رئولوژیکی نمونه‌ها با تغییرات فرکانس تغییر می‌کند و در اغلب نمونه‌های مورد بررسی مقادیر مدول ذخیره ( $G'$ ) بیشتر از مدول اتلاف ( $G''$ ) ارزیابی شد. بر اساس نتایج به دست آمده، بالاترین خواص ویسکوالاستیک و بیشترین مقادیر مدول ذخیره و اتلاف در  $GG$  و کمترین مقادیر مدول ذخیره و اتلاف در  $LBG$  مشاهده شد. همچنین  $GG$  دارای بالاترین کمیت مدول کمپلکس ( $G^*$ ) و ویسکوزیته کمپلکس و  $LBG$  دارای کمترین مقادیر این دو کمیت است (*Error! Reference source not found.* و *c-Reference source not found.*)



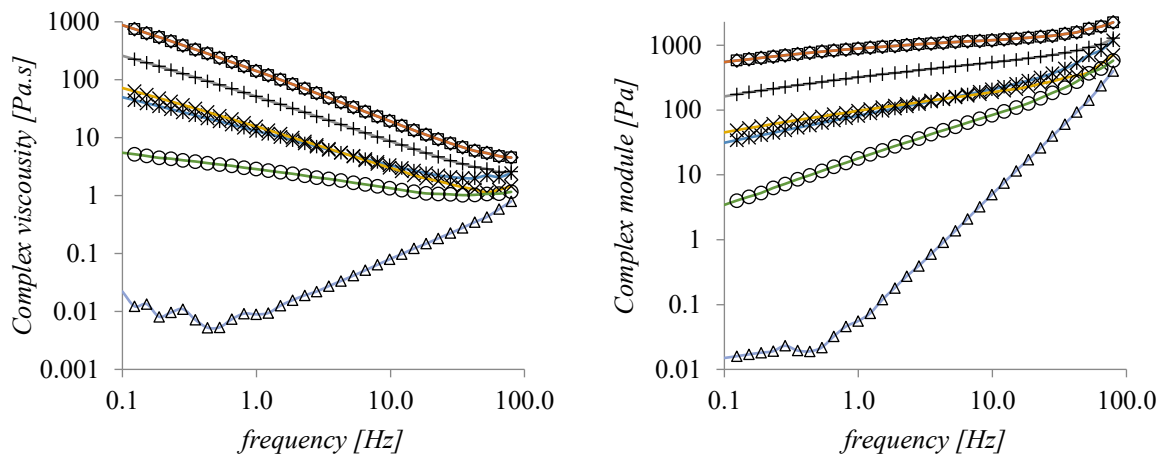


Figure (1) Rheological Properties of Different Hydrocolloids

(a): Storage Modulus, (b): Loss Modulus, (c): Complex Viscosity, (d) Complex Modulus

(AG: Arabic Gum, LBG: Locust Beam Gum, XG: Xanthan Gum, GG: Guar Gum, HPMC: Hydroxypropyl methylcellulose, CMC: Carboxymethyl cellulose, CG: Carrageenan Gum)

—+— AG    —△— LBG    —\*— XG    —◇— GG    —×— HPMC    —○— CMC    —□— CG

شد. تفاوت در ویژگی‌های حرارتی هیدروکلوئیدها ناشی از خصوصیات ساختاری و فضایی آن‌ها از جمله میزان سختی یا انعطاف‌پذیری ساختار مولکولی، اندازه ذرات، حضور گروه‌های عاملی خصوصاً سولفات‌ها و ماهیت آنهاست که بر ویژگی‌ها و عملکرد هیدروکلوئیدها تأثیرگذار است [۲۰].

#### خصوصیات حرارتی هیدروکلوئیدها

بر اساس نتایج **Error! Reference source not found.** صمغ CMC دارای بیشترین آنتالپی ذوب ( $2813 J/gr$ ) و GG دارای کمترین آنتالپی ذوب ( $1082 J/gr$ ) است. کمترین نقطه ذوب ( $83^\circ C$ ) در LBG مشاهده

Table (1) Differential Scanning Calorimetry of Hydrocolloids

Sample	Melting Point ( $^\circ C$ )	Enthalpy (J/g)
AG	99.291 <sup>c</sup>	1961.203 <sup>b</sup>
LBG	83.283 <sup>e</sup>	1853.052 <sup>c</sup>
XG	98.426 <sup>e</sup>	1600.329 <sup>d</sup>
GG	113.203 <sup>a</sup>	1081.994 <sup>e</sup>
HPMC	95.248 <sup>d</sup>	1928.821 <sup>b</sup>
CMC	98.971 <sup>c</sup>	2813.354 <sup>a</sup>
CG	100.656 <sup>b</sup>	1822.169 <sup>c</sup>

(AG: Arabic Gum, LBG: Locust Beam Gum, XG: Xanthan Gum, GG: Guar Gum, HPMC: Hydroxypropyl methylcellulose, CMC: Carboxymethyl cellulose, CG: Carrageenan Gum)

مربوط به O-LBG و O-CG است. توانایی هیدروکلوئیدها به عنوان ژلاتور در ایجاد یک شبکه ژلی پیوسته‌ی سه بعدی قوی با پیوندهای متعدد و همچنین ایجاد آرایش فضایی ملکولی مناسب در قابلیت حفظ روغن در اولئوزل تولید شده تأثیرگذار است [۱۶،۲۱،۲۲].

#### سفتی بافت و میزان نشت روغن از اولئوزل‌ها

مطابق نتایج ارائه شده در **Error! Reference source not found.** به ترتیب بیشترین (۸۱٪) و کمترین (۲۰٪) میزان نشت روغن در نمونه‌های اولئوزل کانولای تولید شده

مستحکم به واسطه تشکیل پیوندهای بین مولکولی در افزایش سفتی بافت ارگانوژل تاثیر دارد. تفاوت در وزن ملکولی و ویسکوزیته هیدروکلوئیدهای مختلف، دلیل اصلی تفاوت در عملکرد آنها به عنوان ژلاتور در سفتی بافت عنوان شده است [۱۶،۲۳].

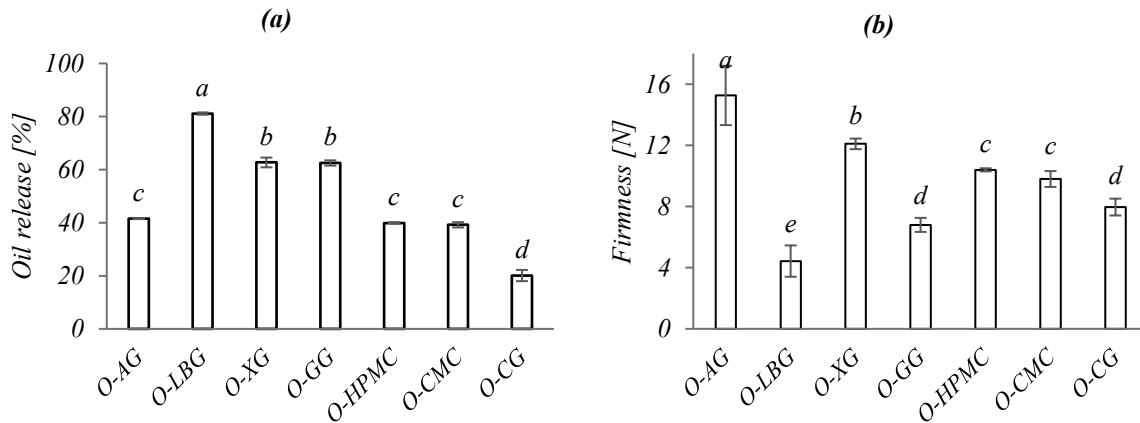


Figure (2) Effect of Hydrocolloids on (a) Oil Leakage, (b) Firmness of Canola Oil Oleogels

(Oleogels Produced with O-AG: Arabic Gum, O-LBG: Locust Beam Gum, O-XG: Xanthan Gum, O-GG: Guar Gum, O-HPMC: Hydroxypropyl methylcellulose, O-CMC: Carboxymethyl cellulose, O-CG: Carrageenan Gum)

(Samples with different lowercase letters indicate significant differences at the 95% confidence level)

مدول ویسکوز بر مدول الاستیک را نمایش می‌دهد به O-LBG تعلق می‌گیرد. اولئوژل‌های دارای مدول الاستیک بالاتر برهمکنش‌های بیشتر و پایدارتری در محدوده ویسکوالاستیک خطی نشان می‌دهند [۲۴]. **Error! Reference source not found.** و **d-Reference source not found.** مدول کمپلکس اولئوژل‌های مختلف را نشان می‌دهند. با افزایش فرکانس، مدول کمپلکس تمامی اولئوژل‌ها افزایش و ویسکوزیته کمپلکس آنها کاهش یافته است. این روند بیان‌گر رفتار غیرنیوتونی رقیق شونده با نیروی برش در اولئوژل‌ها دارد. همچنین نتایج مقادیر ویسکوزیته کمپلکس و مدول کمپلکس اولئوژل O-LBG کمتر از سایرین ارزیابی شد. محققان دلیل تفاوت در خواص رئولوژیکی ارگانوژل‌های ساختاریافته با پلیمرها را، به گوناگونی شکل

#### خصوصیات رئولوژیکی اولئوژل‌ها

**Error! Reference source not found.** و **a-Error! Reference source not found.** به ترتیب مقادیر مدول ذخیره (الاستیک) و مدول اتلاف (ویسکوز) را برای اولئوژل‌های O-AG، O-LBG، O-XG، O-GG، O-HPMC، O-CMC و O-CG نشان می‌دهد. مقادیر  $G'$  و  $G''$  با افزایش فرکانس روند صعودی دارند که بیان‌گر وابستگی ویژگی‌های رئولوژیکی نمونه‌های بررسی شده به فرکانس است. مقادیر مدول الاستیک برای تمامی نمونه‌ها از مقادیر مدول ویسکوز بالاتر است، در نتیجه اولئوژل‌های تولید شده در ردیف مواد ویسکوالاستیک جامد ( $G' > G''$ ) دسته‌بندی می‌شوند. همچنین مطابق **Error! Reference source not found.**، بیشترین مقادیر تانژانت اختلاف فاز که غلبه

دهد. موم کندلیلا به دلیل امکان ایجاد کریستال‌های کوچک‌تر و ساختار متراکم‌تر، مدول الاستیک بالاتری ایجاد می‌کند. افزایش غلظت موم سبوس برنج با افزایش تعداد کریستال‌ها و ایجاد یک شبکه منسجم، سختی و چسبندگی ارگانوژل‌ها را افزایش می‌دهد. تشکیل کریستال‌های سوزنی‌شکل در ارگانوژل‌های حاوی موم زنبور عسل باعث تضعیف خصوصیات ویسکوالاستیک آن‌ها می‌شود. میزان بالای استرهای واکسی در موم آفتابگردان، موجبات تشکیل ژل‌های دارای سختی و چسبندگی بالا را ایجاد می‌کند. بنابراین اولئوژلاتورهای مختلف که دارای ترکیبات شیمیایی، طول زنجیره و پیوندهای بین‌مولکولی متفاوتی هستند، مستقیماً بر ویژگی‌های رئولوژیکی اورگانوژل تولید شده تأثیرگذارند.

فضایی زنجیره‌های پلیمر و پیچیدگی‌های ملکولی هیدروکلونیدهای مختلف خصوصاً بزرگی زنجیر پلیمر و وزن مولکولی آنها وابسته می‌دانند [۱۶, ۲۵]. داویدویچ-پیناس و همکاران [۲۶] ادعا کرده‌اند که خواص رئولوژیکی اولئوژل‌های ساختاریافته با اتیل سلولز ( $EC$ ) مستقیماً تحت تأثیر وزن مولکولی، نوع روغن، شدت اکسیداسیون و غلظت پلیمر قرار می‌گیرد.  $EC$  با وزن مولکولی بالاتر، ژل‌های قوی‌تر و پایدارتر ایجاد می‌کند. همچنین مدول الاستیک ( $G'$ ) و مدول ویسکوز ( $G''$ ) نمونه‌ها با افزایش غلظت  $EC$  افزایش می‌یابد. افزایش وزن مولکولی  $EC$  نیز باعث افزایش سختی و استحکام ژل می‌شود. هاشمی و همکاران [۲۷] نیز گزارش کرده‌اند که اولئوژلاتورهای مختلف ساختارهای شبکه‌ای متفاوتی ایجاد می‌کنند که می‌تواند خواص رئولوژیکی اولئوژل‌ها را تحت تأثیر قرار

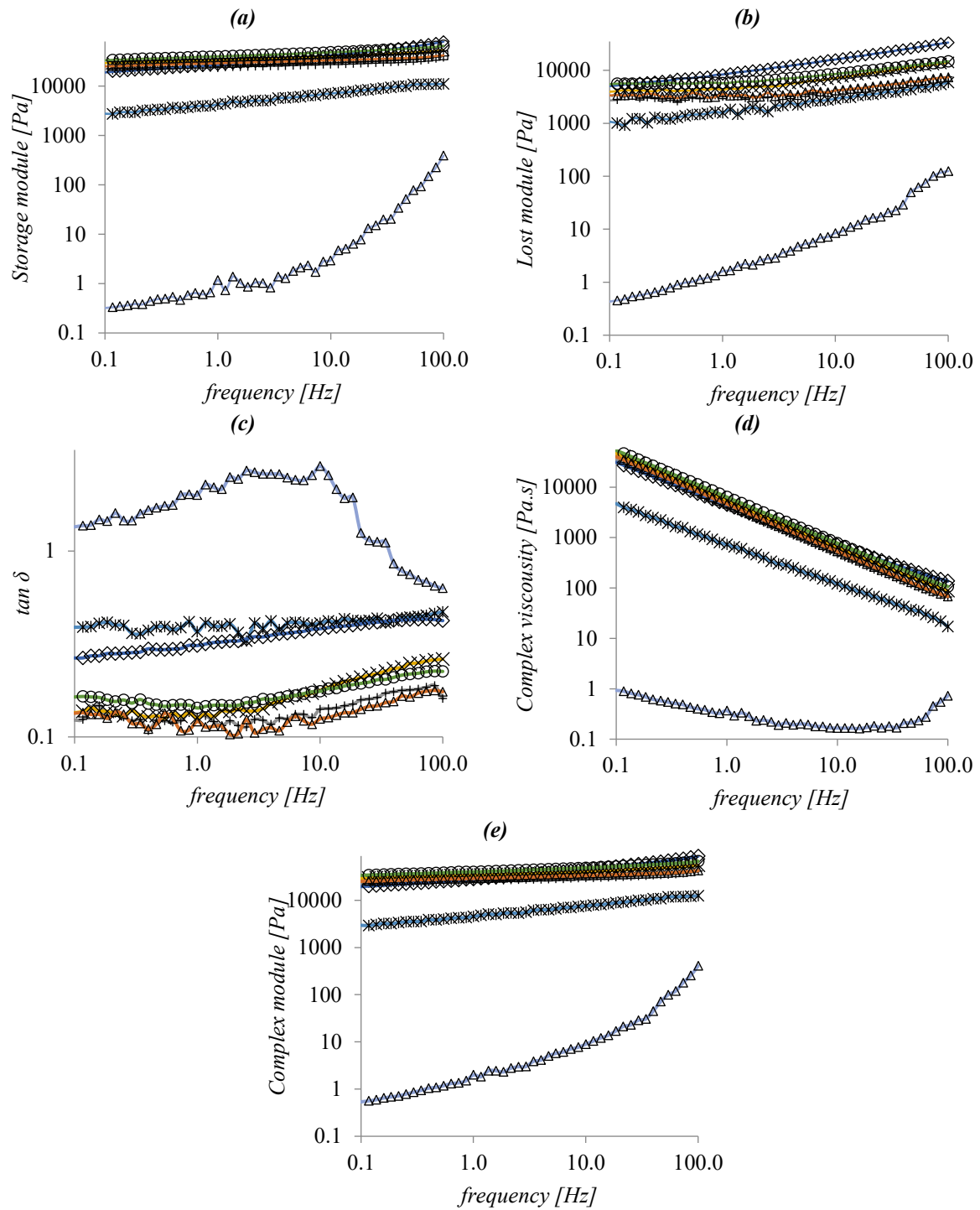


Figure (3) Rheological Properties of Different Oleogels

(a): Storage Modulus, (b): Loss Modulus, (c):  $\tan \delta$ , (d): Complex Viscosity, (e): Complex Modulus

(O-AG: Arabic Gum Oleogel, O-LBG: Locust Beam Gum Oleogel, O-XG: Xanthan Gum Oleogel, O-GG: Guar Gum Oleogel, O-HPMC: Hydroxypropyl methylcellulose Oleogel, O-CMC: Carboxymethyl cellulose Oleogel, O-CG: Carrageenan Gum Oleogel

—+— O-AG    —△— O-LBG    —\*— O-XG    —◇— O-GG    —×— O-HPMC    —○— O-CMC    —□— O-CG

## رفتار حرارتی اولئوژل‌ها

ارزیابی شد. اولئوژل تهیه شده با استفاده از زانتان دارای بالاترین دمای ذوب (۱۲۷/۱ درجه سانتیگراد) و آنتالپی ذوب (۲۰/۴۱ J/gr) بود که این امر به حضور گروه‌های سولفات در ساختار سوپر ماریچ آن نسبت داده می‌شود. نمونه‌های تهیه شده با استفاده از صمغ گوار و صمغ دانه لوکاست نیز دمای ذوب بالاتری نسبت به اولئوژل‌های حاوی صمغ کاراگینان نشان دادند. آنتالپی کل که مجموع آنتالپی پیک‌هاست نشان داد که انرژی مورد نیاز برای ذوب اولئوژل صمغ عربی (O-AG) از بقیه نمونه‌ها بالاتر است. این تفاوت‌ها به ساختار و ترکیب شیمیایی، وزن مولکولی، میزان حلالیت هیدروکلئیدها، نوع گروه‌های عاملی و نحوه تعامل آنها در شبکه ژلی ایجاد شده مرتبط است [۲۸].

بر اساس *Error! Reference source not found.* پروفایل حرارتی اولئوژل‌های مختلف، یک تا پنج قله اندوترمیک مشاهده می‌شود. ظهور چندین قله در پروفایل حرارتی نمونه‌ها، نمایانگر ویژگی‌های تبلوری و رفتار ذوب متفاوت اولئوژل‌ها و تشکیل پلی مورف‌های مختلف در آنهاست [۱۵]. اولئوژل تهیه شده با زانتان دارای پنج قله اندوترمیک بود که حالت متبلور نمونه با نیاز متفاوت حرارتی برای ذوب را نمایش می‌دهد. دمای ذوب اولین قله در نمونه‌های مختلف در بازه ۲۵ تا ۳۱ درجه سانتی‌گراد و دومین قله در بازه ۵۸ تا ۱۰۸ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. آنتالپی ذوب اولین قله در اغلب نمونه‌ها بیش از قله دوم

Table (2) Thermal Properties of Different Oleogels

Sample	Peak #1		Peak #2		Peak #3		Peak #4		Peak #5		Enthalpy (Total) (J/g)
	Melting Point (°C)	Enthalpy (J/g)	Melting Point (°C)	Enthalpy (J/g)	Melting Point (°C)	Enthalpy (J/g)	Melting Point (°C)	Enthalpy (J/g)	Melting Point (°C)	Enthalpy (J/g)	
O-AG	30.25	41.49	107.91	1.74							43.23
O-LBG	31.19	21.54	107.23	0.21							21.75
O-XG	28.55	20.41	60.00	0.16	103.15	3.45	119.38	0.67	127.10	2.62	27.31
O-GG	29.76	20.82	65.24	0.19	72.82	0.86	81.62	0.59			22.46
O-HPMC	29.33	23.82	61.08	0.59							24.41
O-CMC	28.52	37.85	60.14	0.49	91.52	0.44	103.98	2.83			41.61
O-CG	25.73	26.75	58.07	1.01	116.13	0.81					28.57

(O-AG: Arabic Gum Oleogel, O-LBG: Locust Beam Gum Oleogel, O-XG: Xanthan Gum Oleogel, O-GG: Guar Gum Oleogel, O-HPMC: Hydroxypropyl methylcellulose Oleogel, O-CMC: Carboxymethyl cellulose Oleogel, O-CG: Carrageenan Gum Oleogel)

ارگانوژل‌های حاوی اتیل سلولوز با وزن مولکولی بالاتر با ساختار کریستالی مناسب دارای نقاط ذوب و انتقال شیشه‌ای بالاتری هستند و نیاز به انرژی بیشتر برای تغییر فاز دارند. تشکیل کریستال‌های کوچک‌تر و یکنواخت‌تر باعث افزایش پایداری حرارتی محصول می‌شوند و قاعدتا نمونه‌هایی که در دماهای بالاتر پایدار باقی می‌مانند، گزینه‌های بهتری برای جایگزینی چربی‌های جامد در صنایع غذایی هستند.

## طیف سنجی مادون قرمز

بر اساس نتایج طیف سنجی به روش FTIR (*Error!*) *Reference source not found.* و *Reference source not found.*

تغییرات وزن مولکولی و وجود ساختارهای آب دوست مانند گروه‌های هیدروکسیل در ژلاتورها با تغییر ویژگی‌های حلالیت ژلاتور در روغن، سرعت واکنش کریستالیزاسیون را تغییر می‌دهند. این عوامل باعث اختلاف در خواص حرارتی اولئوژل‌های مختلف می‌شود [۶،۷،۱۵]. همچنین هاشمی و همکاران [۲۷] دلیل اختلاف در خواص حرارتی نمونه‌های مختلف را تفاوت در ساختار شیمیایی ژلاتورها، نوع روغن، برهم‌کنش‌های بین مولکولی و اندازه کریستال‌ها نسبت داده‌اند. ترکیبات بلند زنجیر با تشکیل شبکه‌هایی با پیوندهای قوی‌تر، پایداری حرارتی بیشتری نسبت به ترکیبات زنجیره کوتاه در ارگانوژل‌ها ایجاد می‌کنند. داویدویچ-پیناس و همکاران [۲۶] بیان کرده‌اند که

موج  $1164\text{ cm}^{-1}$  برای کششی  $C-O$  و یک پیک نسبتاً ضعیف در عدد موج  $965\text{ cm}^{-1}$  برای خمشی  $trans-CH=CH-$  مشاهده شد. در نهایت یک پیک متوسط در عدد موج  $723\text{ cm}^{-1}$  برای خمشی  $cis-CH=CH-$  مشاهده شد. بررسی شدت پیک‌ها نشان می‌دهد که ضعیف‌ترین سیگنال مربوط به پیوند خمشی  $trans-CH=CH$  در  $968\text{ cm}^{-1}$ ، ارتعاش کششی پیوند استری در  $1092\text{ cm}^{-1}$ ، کشش گروه کربونیل در  $1238\text{ cm}^{-1}$  و پیوندهای خمشی  $C-H$  در گروه‌های متیل در  $1375\text{ cm}^{-1}$  بودند. در مقابل، بیشترین شدت جذب مربوط به پیوند خمشی  $C-H$  در گروه‌های متیل در ناحیه  $1745\text{ cm}^{-1}$  و ارتعاشات کششی  $C-H$  در باندهای  $2854$  و  $2925$  اختصاص داشته است. افزایش قابل توجه شدت این باندها در اولئوژل‌ها نسبت به روغن کانولا، حاکی از وجود تعاملات غیرکووالانسی از جمله پیوندهای هیدروژنی و واندروالسی میان اجزای سازنده اولئوژل‌هاست. این مسئله نشان‌دهنده تشکیل کمپلکس‌های در برگیرنده و ایجاد ساختارهای نیمه بلوری در ماتریس اولئوژل به واسطه برهم‌کنش اجزای آن است. پیوندهای هیدروژنی و واندروالسی ظاهر شده در محدوده  $2920\text{ cm}^{-1}$  و  $2854$  و  $1746$ ، بالاترین سطح را در میان پیک‌های ظاهر شده نشان می‌دهند. شدت این پیوندها پس از تشکیل اولئوژل افزایش یافته و بیشترین مقدار، مربوط به اولئوژل‌های  $O-CG$  و سپس  $O-XG$  و کمترین آنها به  $O-LBG$  مربوط است.

*(source not found)*، نواحی پر انرژی در محدوده  $350-4000\text{ cm}^{-1}$  ظاهر شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تفاوتی میان روغن کانولای خالص و اولئوژل‌های تولید شده از نظر نوع پیک‌های مشاهده شده وجود ندارد و تنها شدت پیک در نمونه‌های مختلف تغییر کرده است. در طیف‌سنجی نمونه‌ها یک پیوند ضعیف در محدوده  $3473\text{ cm}^{-1}$  مشاهده گردید که مربوط به ارتعاشات گروه هیدروکسیلی ( $OH$  کششی) و پیوند هیدروژنی درون مولکولی<sup>۱</sup> یا بین مولکولی<sup>۲</sup> بین پلی ساکاریدهاست [۲۹]. طبق **Error!** *Reference source not found.* قدرت این پیوند پس از تشکیل اولئوژل کاهش یافته و شدت پیک به ترتیب برای نمونه‌های  $O-CG$ ،  $O-AG$ ،  $O-XG$ ،  $O-LBG$ ،  $O-GG$ ،  $O-$  و  $CMC$  و  $O-HPMC$  کاهش می‌یابد. همچنین یک پیک نسبتاً قوی در محدوده  $3007\text{ cm}^{-1}$  برای پیوند کششی  $=CH$  مشاهده شد. دو پیک قوی در محدوده  $2920$  و  $2854\text{ cm}^{-1}$  مربوط به پیوند کششی متقارن و نامتقارن  $=CH(CH_2)$  و یک پیک قوی در عدد موج  $1746\text{ cm}^{-1}$  برای کششی  $C=O$  مشاهده گردید. یک پیک ضعیف در محدوده  $1654\text{ cm}^{-1}$  برای خمشی  $C=C$  *cis* و یک پیک نسبتاً قوی در محدوده  $1462\text{ cm}^{-1}$  برای خمشی  $C-H(CH_2)$  مشاهده شد. یک پیک متوسط در عدد موج  $1375\text{ cm}^{-1}$  برای خمشی متقارن  $-C-$  و  $H(CH_3)$  و یک پیک متوسط در عدد موج  $1237\text{ cm}^{-1}$  برای کششی  $C=O$  مشاهده گردید. یک پیک نسبتاً قوی در عدد

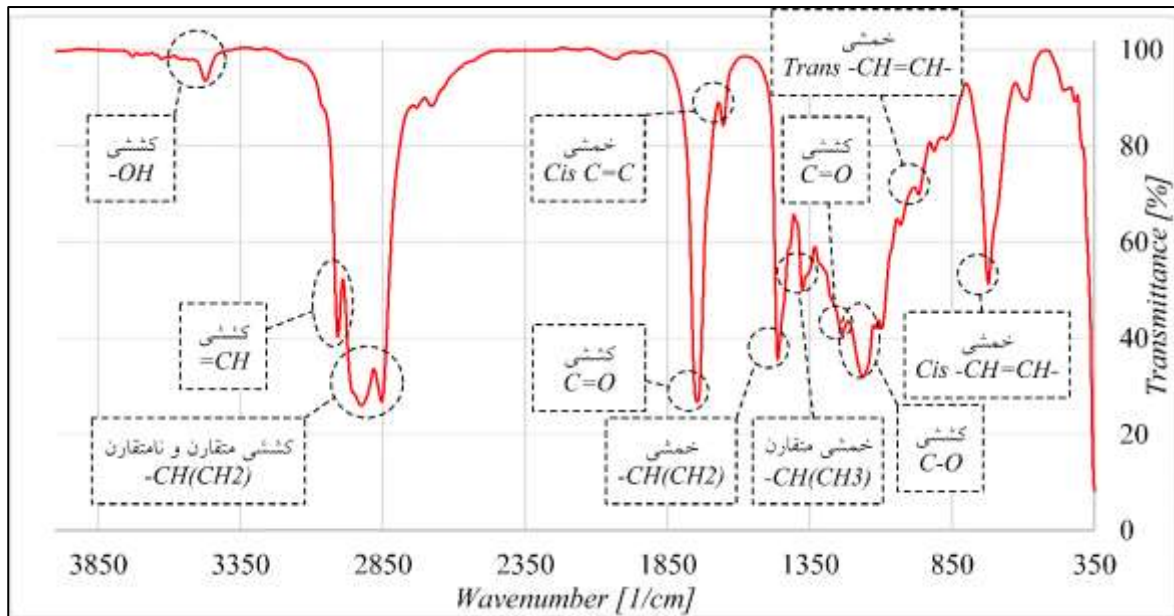


Figure (4) Schematic of Functional Group Positions in Canola Oil

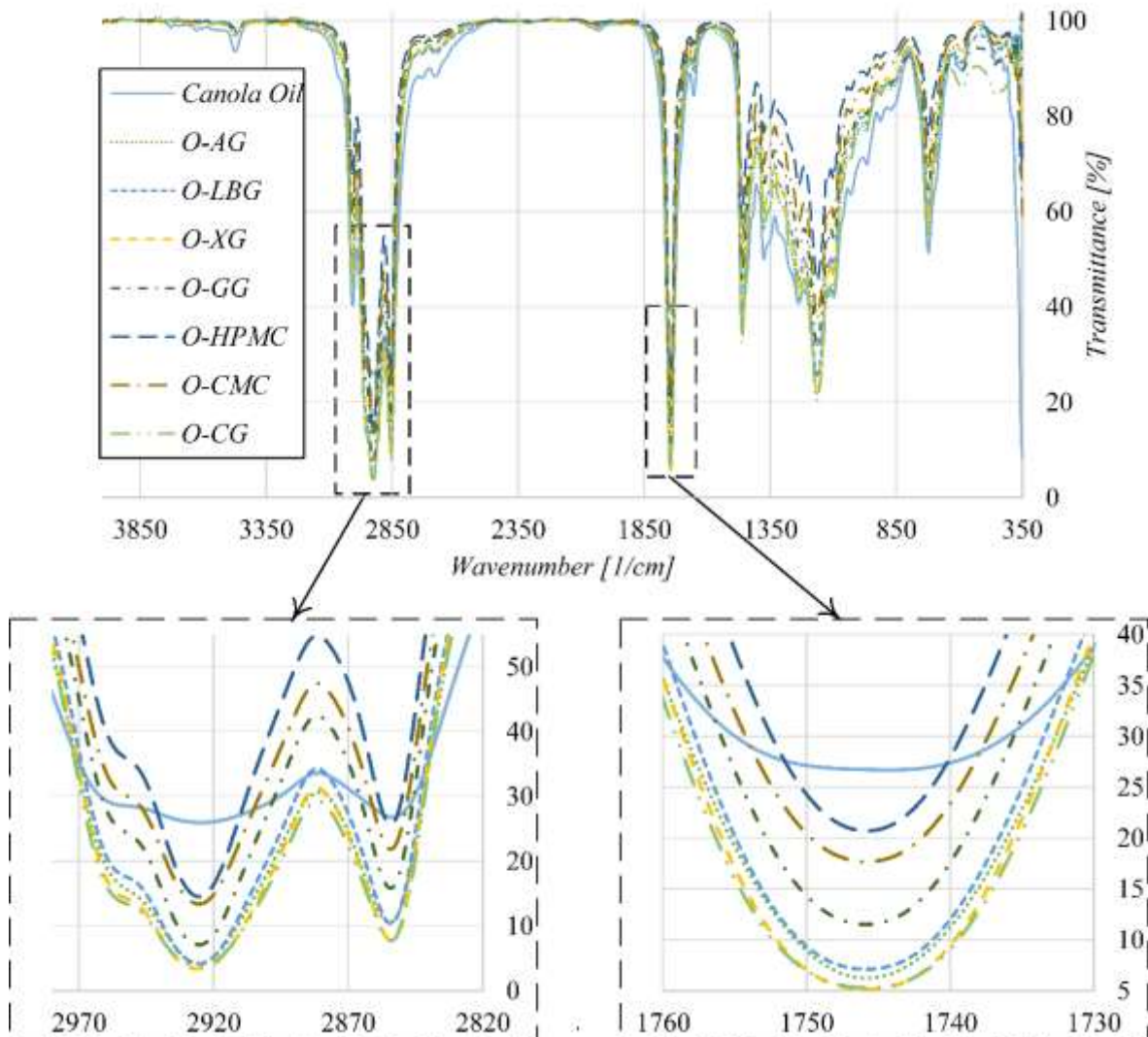


Figure (5) FTIR Spectra of Canola Oil and Oleogels formulated with Different Hydrocolloids

(O-AG: Arabic Gum Oleogel, O-LBG: Locust Beam Gum Oleogel, O-XG: Xanthan Gum Oleogel, O-GG: Guar Gum Oleogel, O-HPMC: Hydroxypropyl methylcellulose Oleogel, O-CMC: Carboxymethyl cellulose Oleogel, O-CG: Carrageenan Gum Oleogel)

— Canola Oil      ..... O-AG      - - - - O-LBG      - - - - O-XG  
 - - - - O-GG      - - - - O-HPMC      - - - - O-CMC      - - - - O-CG

فرم  $\beta$  بیشتر باشد [۳۲،۳۳]. طبق نتایج این پژوهش اولئوژل‌های O-AG، O-XG، O-GG، O-CMC، O-HPMC و O-CG پلی‌مورف‌های مشابه به فرم مخلوطی از کریستال‌های  $\beta'$  و  $\beta$  دارند و O-LBG تنها دارای کریستال‌های از نوع  $\beta$  است. پیک‌های مشاهده شده در محدوده ۳/۶۴ تا ۴/۱۳ آنگستروم، مربوط به فرم‌های کریستالی  $\beta'$  و پیک‌های موجود در فاصله ۴/۴۷ تا ۴/۵۵ آنگستروم به وجود فرم کریستالی  $\beta$  در کریستال مربوط می‌شود که با الگوهای مشاهده شده در اولئوژل‌های ساختار یافته در پژوهش‌های دیگر نیز مطابقت دارند [۳۲،۳۴]. شایان ذکر است که با تغییر نوع هیدروکلوئیدها، شدت پیک‌های موجود نیز تغییر می‌یابد که به دلیل تغییر در آرایش اسیدهای چرب در مواجهه با شرایط متفاوت کریستاله شدن است [۶].

### ساختار کریستالی

الگوی پراش پرتو  $x$  در **Error! Reference source not found.** برای روغن کانولای خالص و اولئوژل‌های تولید شده نشان داده شده است. این الگو می‌تواند ساختار کریستالی روغن‌ها را مشخص نماید. اسیدهای چرب می‌توانند به یکی از سه فرم اصلی  $\alpha$  (شش ضلعی<sup>۱</sup>)،  $\beta'$  (أرثرمبیک<sup>۲</sup>) و  $\beta$  (تریکلینیک<sup>۳</sup>) یا مخلوطی از آن‌ها کریستالیزه شوند. در این فرم‌ها نقطه ذوب، چگالی، تراکم و پایداری به ترتیب افزایش پیدا می‌کند [۳۰،۳۱]. کریستال‌های تشکیل شده در فرم  $\beta$  درشت‌تر و خشن‌تر بوده و کریستال‌های  $\beta'$  فرم گرم‌تری به ماده غذایی می‌دهند، لذا در صنعت غذایی برای تولید مارگارین، شورتینگ و اسپرد، مطلوب این است که میزان کریستال‌های با فرم  $\beta'$  نسبت به

Triclinic<sup>۳</sup>Hexagonal<sup>۱</sup>Orthorhombic<sup>۲</sup>

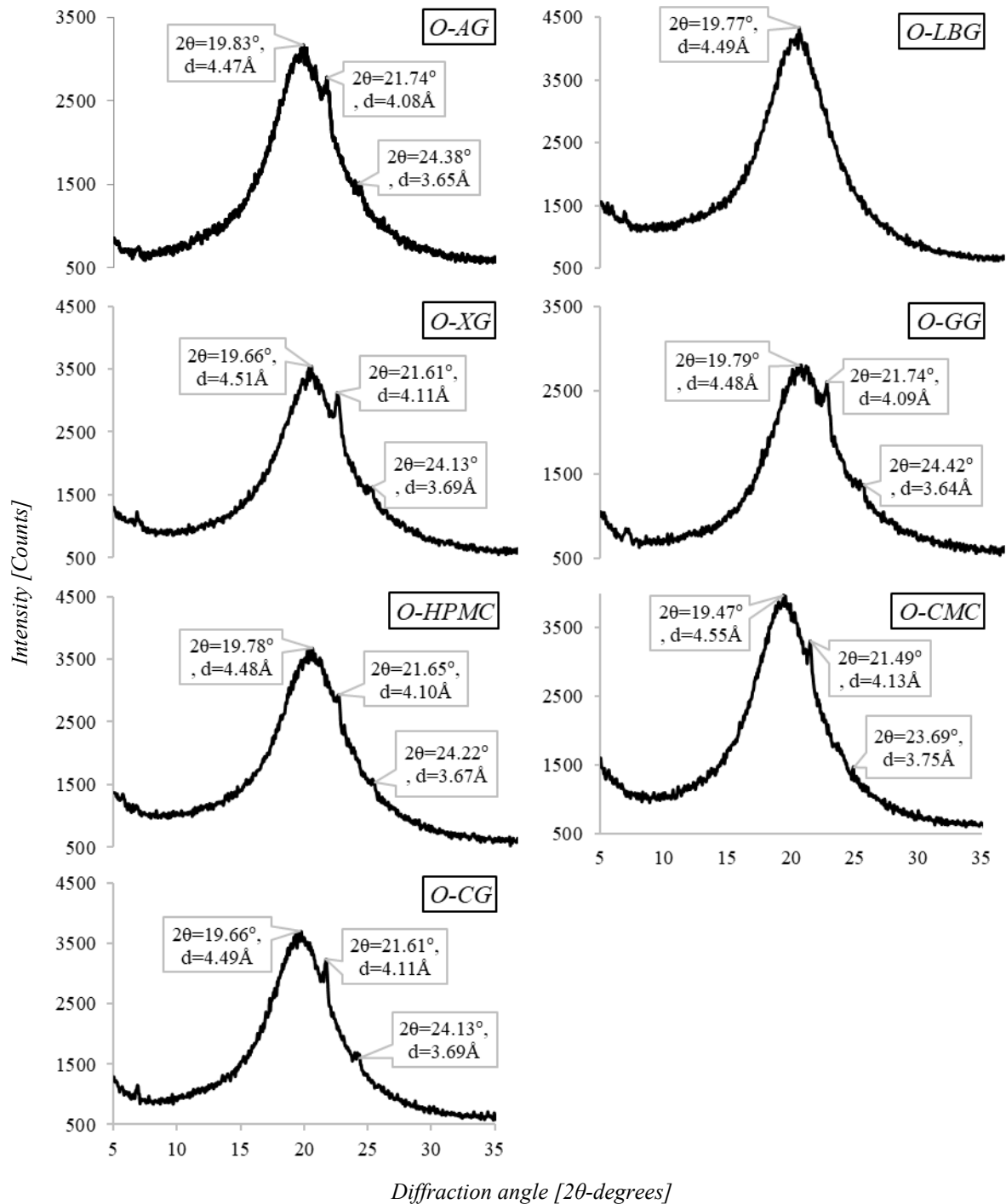


Figure (6) XRD Patterns of Canola Oil and Oleogels Formulated with Different Hydrocolloids

(O-AG: Arabic Gum Oleogel, O-LBG: Locust Beam Gum Oleogel, O-XG: Xanthan Gum Oleogel, O-GG: Guar Gum Oleogel, O-HPMC: Hydroxypropyl methylcellulose Oleogel, O-CMC: Carboxymethyl cellulose Oleogel, OCG: Carrageenan Gum Oleogel)

ویژگی‌های شبکه، خصوصیات رئولوژی و ساختار اولئوژل‌ها ایفا می‌کند. بالاترین سفتی بافت با امکان حفظ مطلوب روغن در اولئوژل تولید شده با صمغ عربی مشاهده

#### ۴- نتیجه گیری

نوع هیدروکلوئیدهای مورد استفاده به عنوان ژلاتور نقش کلیدی در برهمکنش‌های روغن-پلیمر و در نتیجه در

### دسترسی به داده ها

داده‌های پژوهش بنا به درخواست در دسترس قرار خواهند گرفت.

### تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ گونه منافع مالی یا روابط شخصی که بر نتایج گزارش شده در این مقاله تأثیر گذار باشد ندارند.

### بیانیه تامین مالی

در این پژوهش هیچ کمک مالی از سازمان‌های تأمین کننده مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نشده است.

### مشارکت نویسندگان

آرزو توکلی نجف آبادی: گردآوری داده‌ها، نگارش و تهیه پیش‌نویس اولیه، انجام تحقیق و مصورسازی؛ هاجر عباسی: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، نظارت، اعتبارسنجی، بررسی و ویرایش نهایی.

### ۵- منابع

- [1] A. Esmailinezhad, H. Abbasi, "Physicochemical, thermal and microstructural properties of new developed bigels through Zein and Persian gum biopolymers," *Journal of Food Measurement and Characterization*, vol. 19, no. 3, pp. 1693–1706, Mar. 2025, doi: doi.org/10.1007/s11694-024-03064-x
- [2] A. Aliasl Khiabani, M. Tabibiazar, L. Roufegarinejad, H. Hamishehkar, and A. Alizadeh, "Preparation and characterization of carnauba wax/adipic acid oleogel: A new reinforced oleogel for application in cake and beef burger," *Food Chem*, vol. 333, p. 127446, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127446.
- [3] Z. Pourdavoud1, H. Abbasi, "Optimization of sesame oil organogel production and its effect on physicochemical and qualitative properties of Sohan," *Research and Innovation in Food Science and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 189–202, 2020, doi: 10.22101/JRIFST.2020.191765.1098.
- [4] A. Esmailinezhad, H. Abbasi, "Effect of zein-persian gum water-in-oleogels on quality characteristics of unsaturated fatty acid-rich and low-Fat croissant," *Food Science & Nutrition*, 13: e4649. 2025, doi:10.1002/fsn3.4649.

شد. ضعیف‌ترین ویژگی‌های ویسکوالاستیک و کمترین آنتالپی ذوب در اولئوژل تهیه شده با صمغ دانه لوکاست با کمترین سطح از مدول‌های الاستیک و ویسکوز و پائین‌ترین نقطه ذوب نمایان گردید. هیچ برهمکنش شیمیایی جدیدی میان اجزای اولئوژل در تشکیل شبکه ژل مشاهده نگردید و بررسی طیف‌های FTIR نشان از تأثیر زیاد پیوندهای هیدروژنی و واندروالسی در تشکیل شبکه ایجاد شده دارد. ارزیابی ساختار کریستالی نمونه‌ها، وجود ترکیبی از ساختارهای نیمه پایدار  $\beta'$  و پایدار  $\beta$  در اولئوژل‌ها (به جز نمونه O-LBG) را تایید می‌کند. اولئوژل‌های تولید شده با به‌کارگیری هیدروکلئیدها به عنوان ژلاتور، می‌توانند در تولید محصولات غذایی با اسیدهای چرب اشباع و ترانس پائین مورد استفاده قرار گیرند. بررسی عملکرد سایر هیدروکلئیدها و ترکیب آنها با دیگر بیوپلیمرها در تولید ارگانوژل‌ها با هدف بهبود ویژگی‌های کیفی و استفاده از آنها در فرمولاسیون محصولات غذایی به منظور بهبود کیفیت تغذیه‌ای و یا استفاده به عنوان بستری برای محافظت و آزادسازی ریزمغذی‌ها در پژوهش‌های آتی ضروری است.

- [5] F. R. Lupi, D. Gabriele, V. Greco, N. Baldino, L. Seta, and B. de Cindio, "A rheological characterisation of an olive oil/fatty alcohols organogel," *Food Research International*, vol. 51, no. 2, pp. 510–517, May 2013, doi: 10.1016/j.foodres.2013.01.013.
- [6] A. Salari and H. Abbasi, "Hydrocolloids as an organogelator: Investigation of their effect on physical, rheological, and morphological properties of corn oil oleogel," *Acta Alimentaria*, vol. 54, no. 2, Mar. 2025, doi: 10.1556/066.2024.00264.
- [7] S. Yang *et al.*, "Functional Characteristics of Oleogel Prepared from Sunflower Oil with  $\beta$ -Sitosterol and Stearic Acid," *J Am Oil Chem Soc*, vol. 94, no. 9, pp. 1153–1164, Sep. 2017, doi: 10.1007/s11746-017-3026-7.
- [8] J. Milani and G. Maleki, "Hydrocolloids in Food Industry," in *Food Industrial Processes: Methods and Equipment*, B. Valdez, Ed., BoD – Books on Demand, 2012.
- [9] F. Renou, O. Petibon, C. Malhiac, and M. Grisel, "Effect of xanthan structure on its interaction with locust bean gum: Toward prediction of rheological properties," *Food Hydrocoll*, vol. 32, no. 2, pp. 331–340, Aug. 2013, doi:

- 10.1016/j.foodhyd.2013.01.012.
- [10] H. Khouryieh, G. Puli, K. Williams, and F. Aramouni, "Effects of xanthan–locust bean gum mixtures on the physicochemical properties and oxidative stability of whey protein stabilised oil-in-water emulsions," *Food Chem*, vol. 167, pp. 340–348, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.009>.
- [11] M. Zaeri, S. Asadollahi, and M. Hashemiravan, "Effects of locust bean gum and xanthan gum as a fat substitute on the physicochemical, rheological and sensory properties of oil cake," *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 55–65, 2019, doi: <https://doi.org/10.22067/iftstrj.v0i0.66890>.
- [12] F. Shokri, M. Salehi Far, and M. H. Azizi, "Effect of hydroxy propyl methyl cellulose and microbial transglutaminase enzyme on farinograph and quality characteristics of gluten-free pasta," *Food Science and Technology*, vol. 13, no. 10, pp. 123–132, 2017, Accessed: Apr. 21, 2025. [Online]. Available: [magiran.com/p1564609](http://magiran.com/p1564609)
- [13] S. Bascuas, M. Espert, E. Llorca, A. Quiles, A. Salvador, and I. Hernando, "Structural and sensory studies on chocolate spreads with hydrocolloid-based oleogels as a fat alternative," *LWT*, vol. 135, p. 110228, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.lwt.2020.110228.
- [14] Y. Jiang *et al.*, "Cellulose-rich oleogels prepared with an emulsion-templated approach," *Food Hydrocoll*, vol. 77, pp. 460–464, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.foodhyd.2017.10.023.
- [15] M. D. Bin Sintang, T. Rimaux, D. Van de Walle, K. Dewettinck, and A. R. Patel, "Oil structuring properties of monoglycerides and phytosterols mixtures," *European Journal of Lipid Science and Technology*, vol. 119, no. 3, Mar. 2017, doi: 10.1002/ejlt.201500517.
- [16] M. A. Cerqueira, L. H. Fasolin, C. S. F. Picone, L. M. Pastrana, R. L. Cunha, and A. A. Vicente, "Structural and mechanical properties of organogels: Role of oil and gelator molecular structure," *Food Research International*, vol. 96, pp. 161–170, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.foodres.2017.03.021.
- [17] F. Valoppi, S. Calligaris, L. Barba, N. Šegatin, N. Poklar Ulrih, and M. C. Nicoli, "Influence of oil type on formation, structure, thermal, and physical properties of monoglyceride-based organogel," *European Journal of Lipid Science and Technology*, vol. 119, no. 2, p. 1500549, Feb. 2017, doi: <https://doi.org/10.1002/ejlt.201500549>.
- [18] Z. Meng, Y. Guo, Y. Wang, and Y. Liu, "Organogels based on the polyglyceryl fatty acid ester and sunflower oil: Macroscopic property, microstructure, interaction force, and application," *LWT*, vol. 116, p. 108590, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.lwt.2019.108590.
- [19] T. Tipvarakarnkoon and B. Senge, "Rheological behaviour of gum solutions and their interactions after mixing," *Annual transactions of the nordic rheology society*, vol. 16, pp. 73–80, 2008.
- [20] T. Valenta, B. Lapčíková, and L. Lapčík, "Determination of kinetic and thermodynamic parameters of food hydrocolloids/water interactions by means of thermal analysis and viscometry," *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 555, pp. 270–279, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.colsurfa.2018.07.009.
- [21] T. A. Stortz, A. K. Zetzl, S. Barbut, A. Cattaruzza, and A. G. Marangoni, "Edible oleogels in food products to help maximize health benefits and improve nutritional profiles," *Lipid Technol*, vol. 24, no. 7, pp. 151–154, Jul. 2012, doi: 10.1002/lite.201200205.
- [22] K. Abdolmaleki, L. Alizadeh, K. Nayebedeh, S. M. Hosseini, and R. Shahin, "Oleogel production based on binary and ternary mixtures of sodium caseinate, xanthan gum, and guar gum: Optimization of hydrocolloids concentration and drying method," *J Texture Stud*, vol. 51, no. 2, pp. 290–299, Apr. 2020, doi: 10.1111/jtxs.12469.
- [23] A. Ashkar, S. Laufer, J. Rosen-Kligvasser, U. Lesmes, and M. Davidovich-Pinhas, "Impact of different oil gelators and oleogelation mechanisms on digestive lipolysis of canola oil oleogels," *Food Hydrocoll*, vol. 97, p. 105218, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105218>.
- [24] Z. Meng, K. Qi, Y. Guo, Y. Wang, and Y. Liu, "Effects of thickening agents on the formation and properties of edible oleogels based on hydroxypropyl methyl cellulose," *Food Chem*, vol. 246, pp. 137–149, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.foodchem.2017.10.154.
- [25] A. K. Zetzl, A. J. Gravelle, M. Kurylowicz, J. Dutcher, S. Barbut, and A. G. Marangoni, "Microstructure of ethylcellulose oleogels and its relationship to mechanical properties," *Food Structure*, vol. 2, no. 1–2, pp. 27–40, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.foostr.2014.07.002.
- [26] M. Davidovich-Pinhas, S. Barbut, and A. G. Marangoni, "Development, Characterization, and Utilization of Food-Grade Polymer Oleogels," *Annu Rev Food Sci Technol*, vol. 7, no. 1, pp. 65–91, Feb. 2016, doi: 10.1146/annurev-food-041715-033225.
- [27] B. Hashemi, M. Varidi, E. Assadpour, F. Zhang, and S. M. Jafari, "Natural oleogelators for the formulation of oleogels by considering their rheological and textural perspective; a review," *Int J Biol Macromol*, vol. 259, p. 129246, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.129246.
- [28] S. Bascuas, P. Morell, I. Hernando, and A. Quiles, "Recent trends in oil structuring using hydrocolloids," *Food Hydrocoll*, vol. 118, p. 106612, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.foodhyd.2021.106612.
- [29] A. Filopoulou, S. Vlachou, and S. C. Boyatzis, "Fatty Acids and Their Metal Salts: A Review of Their Infrared Spectra in Light of Their Presence in Cultural Heritage," *Molecules*, vol. 26,

- no. 19, p. 6005, Oct. 2021, doi: 10.3390/molecules26196005.
- [30] A. G. Marangoni *et al.*, "Structure and functionality of edible fats," *Soft Matter*, vol. 8, no. 5, pp. 1275–1300, 2012, doi: 10.1039/C1SM06234D.
- [31] K. Sato, "Crystallization behaviour of fats and lipids — a review," *Chem Eng Sci*, vol. 56, no. 7, pp. 2255–2265, Apr. 2001, doi: 10.1016/S0009-2509(00)00458-9.
- [32] G. Fayaz, S. A. H. Goli, and M. Kadivar, "A Novel Propolis Wax-Based Organogel: Effect of Oil Type on Its Formation, Crystal Structure and Thermal Properties," *J Am Oil Chem Soc*, vol. 94, no. 1, pp. 47–55, Jan. 2017, doi: 10.1007/s11746-016-2915-5.
- [33] S. Zomorodi, R. Shokrani, M. Shahedi Bagh Khandan, and S. Dokhani, "Utilization of Soybean Oil and Fully Hydrogenated Oil Blends for the Production of Various Types of Shortening," *Iranian Journal of Agriculture Science*, vol. 34, no. 3, 2003, Accessed: Apr. 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.sid.ir/paper/429390/fa>
- [34] A. I. Blake, E. D. Co, and A. G. Marangoni, "Structure and Physical Properties of Plant Wax Crystal Networks and Their Relationship to Oil Binding Capacity," *J Am Oil Chem Soc*, vol. 91, no. 6, pp. 885–903, Jun. 2014, doi: 10.1007/s11746-014-2435-0.



## Scientific Research

## Effect of different hydrocolloids as gelator on the qualitative properties of canola oil oleogel

Arezou Tavakoli Najafabadi<sup>1</sup>, Hajar Abbasi<sup>2\*</sup>

- 1- M.Sc. Graduate of Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Water, Food and Nutraceuticals, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran  
 2- Associate Professor of Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Water, Food and Nutraceuticals, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

## ARTICLE INFO

## ABSTRACT

### Article History:

Received: 2025/08/03

Review: 2026/02/08

Accepted: 2026/02/16

### Keywords:

Oleogelation,

Rheology,

Canola oil,

Hydrocolloid

DOI: 10.48311/fsct.2026.84081.0

\*Corresponding Author E-

[hajarabbasi@iaui.ac.ir](mailto:hajarabbasi@iaui.ac.ir)

Considering the special ability of hydrophilic polymers in forming oleogels, in this study, the properties of seven selected hydrocolloids and their ability to form oleogels was investigated. For this purpose, canola oil-based oleogels were prepared using 3% solutions of gum arabic (AG), locust bean gum (LBG), xanthan (XG), guar (GG), hydroxypropyl methylcellulose (HPMC), carboxymethylcellulose (CMC), and carrageenan (CG). The oil retention ability, texture, thermal behavior, rheological properties, crystallinity, and infrared spectra of the produced oleogels were evaluated. Oleogels exhibited solid viscoelastic behavior and their elastic and complex moduli increased with increasing frequency and their complex viscosity decreased, indicating shear thinning behavior. Locust bean gum and the prepared oleogel showed the weakest viscoelastic properties and the highest oil release. In the thermal profile of the oleogels, one to five endothermic peaks were observed, which indicated the different crystallization characteristics and melting behavior of the oleogels and the formation of different polymorphs in them. The oleogel containing AG had the highest and the LBG-containing sample had the lowest texture stiffness and melting enthalpy. Evaluation of the crystal structures showed that all samples except the oleogels containing LBG had a mixture of semi-stable and stable  $\beta'$  and  $\beta$  crystals. No significant chemical change in the structure of the samples was observed, but an increase in the intensity of hydrogen and van der Waals bonds was confirmed after oleogel formation. Type of hydrocolloids has a significant effect on the oil-polymer interactions and functional properties of oleogels. LBG with the weakest viscoelastic properties and melting temperature was not suitable for oleogelation, while oleogels prepared based on canola oil with AG, followed by HPMC and CMC with suitable oil binding capacity, strength and viscoelastic properties appropriate for food products with low saturated and trans fatty acid content.