

نوع مقاله: پژوهشی

بررسی اثر لستین و کربوکسی متیل سلولز بر خصوصیات ویسکوالاستیک کره ماکادامیا

زهرة سرایی، وحید حکیم زاده^{۱*}، مرتضی کاشانی نژاد^۲^۱ دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران.^۲ دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران.^۳ استادیار گروه فناوریهای سبز مواد غذایی، موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران.

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۹

چکیده

ماکادامیا مغزی خوراکی با روغن بالا و طعم مطلوب است که به عنوان ماده اولیه تولید کره های گیاهی به کار می رود. کره حاصل نیز یک سیستم نیمه جامد غنی از روغن است که کیفیت و پایداری آن به ساختار امولسیون و ویژگی های رئولوژیکی وابسته است. در این پژوهش اثر لستین (۱/۲-۰ درصد) و کربوکسی متیل سلولز (CMC) (۰/۱-۰/۰۵ درصد) بر پایداری امولسیون و ویژگی های رئولوژیکی کره ماکادامیا بررسی شده است. نتایج بررسی ها نشان داد اثر خطی لستین بر پایداری امولسیون در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P < 0.05$) معنی دار است و با افزایش آن در حضور کربوکسی متیل سلولز، پایداری ابتدا کمی کاهش و سپس افزایش می یابد. مدول ذخیره (G'_{LVE}) و مدول اتلاف (G''_{LVE}) نیز به طور معنی داری تحت تأثیر غلظت این دو ماده قرار گرفتند، به طوری که در لستین پایین افزایش کربوکسی متیل سلولز باعث افزایش چشمگیر این مدول ها و تقویت ساختار شبکه ای شده اما در لستین بالاتر این اثر کاهش یافته است. افزایش کربوکسی متیل سلولز در حضور لستین کم موجب افزایش تنش تسلیم (τ_y) و کرنش بحرانی (γ_c) و افزایش مقاومت ساختاری در برابر تغییر شکل شد. از سوی دیگر، تانژانت اتلاف در ناحیه خطی ($\tan \delta_{LVE}$) با افزایش لستین افزایش و با افزایش کربوکسی متیل سلولز کاهش یافت که نشان دهنده تغییر نسبت رفتار ویسکوز به الاستیک است. در نتایج بهینه یابی، بهترین فرمولاسیون شامل ۰/۱۷ درصد لستین و ۰/۱ درصد کربوکسی متیل سلولز بود که در این شرایط پایداری امولسیون و ویژگی های ویسکوالاستیک بهینه شدند و نشان داد استفاده همزمان از این دو ماده در مقادیر مناسب موجب بهبود ساختار و پایداری کره ماکادامیا می شود.

واژه های کلیدی: کره ماکادامیا، لستین، کربوکسی متیل سلولز، مدول ذخیره، مدول ویسکوز، تنش تسلیم

مقدمه

شناخته می شوند که می توانند نقش مهمی در پیشگیری از بیماری های قلبی-عروقی و بهبود سلامت عمومی داشته باشند (Liu et al., 2025). بازار جهانی کره مغزهای خوراکی در سال ۲۰۲۱ به ارزش ۴/۳۳ میلیارد دلار رسید و پیش بینی می شود تا سال ۲۰۲۸ با رشد سالانه ۷/۲ درصد به ۷/۸۲ میلیارد دلار افزایش یابد (Bernaschina et al., 2024).

در سال های اخیر تقاضای جهانی برای محصولات فراوری شده مغزهای خوراکی، به ویژه کره مغزهای خوراکی، به دلیل ارزش تغذیه ای بالا و نقش آنها در رژیم های غذایی سالم، به طور چشمگیری افزایش یافته است (Shakerardekani et al., 2013). کره مغزهای خوراکی به عنوان منابع غنی از پروتئین، چربی های غیراشباع، ویتامین ها، مواد معدنی و ترکیبات زیست فعال

و تمایل به جداسازی فاز روغن است. این پدیده که به دلیل مقدار بالای چربی و تفاوت در چگالی {دانسیته} فازهای تشکیل دهنده رخ می‌دهد، می‌تواند منجر به کاهش کیفیت محصول و کوتاه شدن عمر ماندگاری و نارضایتی مصرف‌کننده شود (McClements *et al.*, 2017). مطالعات نشان داده‌اند که جداسازی روغن در کره مغزهای خوراکی می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله اندازه ذرات، دما، شرایط فرآوری و حضور عوامل پایدارکننده قرار گیرد (Bernaschina *et al.*, 2024). علاوه بر این، اکسیداسیون لیپیدها و تغییرات بافتی طی نگهداری نیز از دیگر چالش‌های مهم در تولید کره ماکادامیا محسوب می‌شوند که نیازمند راهکارهای مناسب برای کنترل و بهبود است (Das *et al.*, 2020).

برای غلبه بر چالش‌های ناپایداری و بهبود خواص رئولوژیکی کره ماکادامیا، استفاده از امولسیفایرها و پایدارکننده‌ها راهکاری مؤثر شناخته شده است. لسیترین امولسیفایری است طبیعی با ساختار آمفی‌فیلیک که با کاهش کشش سطحی بین فازهای آبی و روغنی و تشکیل لایه‌ای محافظ در سطح قطرات نقش مهمی در پایداری سازی امولسیون‌ها دارد (Kim *et al.*, 2011). این ترکیب همچنین می‌تواند با تأثیرگذار کردن بر اندازه و توزیع ذرات، خواص رئولوژیکی محصول را بهبود بخشد (Hernández-*et al.*, 2013). از سوی دیگر، کربوکسی متیل سلولز (CMC) هیدروکلوئیدی است با قابلیت جذب آب بالا که از طریق افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته و ایجاد شبکه‌های سه‌بعدی به پایداری فیزیکی سیستم کمک می‌کند (Radi and Amiri, 2013). مطالعات نشان داده‌اند که استفاده همزمان از لسیترین و CMC می‌تواند اثر هم‌افزایی در پایداری سازی امولسیون‌ها داشته باشد، به طوری که لسیترین با کاهش کشش بین‌سطحی و CMC با افزایش

در میان انواع مغزهای خوراکی، ماکادامیا^۱ یکی از مغزهای خوراکی ارزشمند و بومی استرالیا است که به دلیل طعم مطبوع، بافت لطیف و مقدار بالای روغن مورد توجه قرار دارد. این مغز در سال‌های اخیر به عنوان ماده اولیه مهم در تولید محصولات غذایی، از جمله انواع کره‌های گیاهی، کاربرد فزاینده‌ای یافته است. روغن ماکادامیا حاوی بیش از ۸۰ درصد اسیدهای چرب تک غیراشباع، به‌ویژه اسید اولئیک (C18:1) و پالمیتولیک (C16:1) است که این ترکیب خاص می‌تواند در کاهش کلسترول خون و بهبود سلامت قلب مؤثر باشد (Buthelezi *et al.*, 2021). علاوه بر این، ماکادامیا منبع خوبی از توکوفرول‌ها، فیتواسترول‌ها و ترکیبات فنولی است که خواص آنتی‌اکسیدانی قابل توجهی دارند (مانند کامنت پیشین). این ویژگی‌های منحصر به فرد، ماکادامیا را به گزینه‌ای ایده‌آل برای تولید محصولات با ارزش افزوده مانند کره ماکادامیا تبدیل کرده است.

کره ماکادامیا یک سیستم امولسیون پیچیده است که از خرد کردن و آسیاب کردن مغز ماکادامیا تا رسیدن به بافتی نرم و روان تهیه می‌شود. این محصول حاوی حدود ۷۰ تا ۷۵ درصد چربی، ۸ تا ۱۰ درصد پروتئین، ۵ تا ۷ درصد کربوهیدرات و مقادیر قابل توجهی ویتامین‌های انحلال‌پذیر در چربی و مواد معدنی است (Buthelezi *et al.*, 2021). فرآیند تولید کره ماکادامیا شامل برشته کردن، خرد کردن، آسیاب کردن و همگن‌سازی است که هر یک از این مراحل می‌تواند بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و رئولوژیکی محصول نهایی تأثیرگذار باشد (Norton *et al.*, 2010). خواص رئولوژیکی کره ماکادامیا، به‌ویژه رفتار ویسکوالاستیک آن، نقش مهمی در کیفیت، قابلیت گسترش‌پذیری و پذیرش مصرف‌کننده دارد.

با این حال، تولید کره ماکادامیا با چالش‌های متعددی روبه‌رو است که مهم‌ترین آنها ناپایداری فیزیکی

¹ Macadamia integrifolia Maiden & Betche

مغز ماکادامیا به مدت ۳۰ دقیقه با نسبت وزنی یک به پنج در محلول آب نمک ۲۵ درصد قرار گرفتند. در این مدت، نمونه ها به آرامی و با سرعت یکنواخت هم زده شدند. در مرحله بعد، نمونه ها از آب نمک خارج شدند و با فیلتر پارچه ای آب نمک سطحی آنها گرفته شد و فرایند برشته کردن مغزهای ماکادامیا با دستگاه تفت آجیل ساخت شرکت تبریز کار (Model ALZ800, Iran) در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس و زمان ۱۰ دقیقه و با سرعت جابه جایی هوای داغ ثابت (۱ متر بر ثانیه) طی گردید. به منظور تهیه فرمول های کره، در ابتدا لستین (۱) تا ۳ درصد وزنی- وزنی) (Sigma-Aldrich, Germany) و کربوکسی متیل سلولز (۰/۵ تا ۰/۱ درصد وزنی- وزنی) (Merck, Germany) در آب فرمول حل و پس از آن با مغز ماکادامیا مخلوط شدند و برای همگن کردن محصول از یک آسیاب برقی دور بالا همیلتون ساخت چین (Model GH-108) در سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۸ دقیقه استفاده شد. نمونه های تهیه شده در داخل ظرف های پلاستیکی پلی اتیلنی دردار (دارای درپوش پیچی) پر شدند، این ظرف ها پیش تر در معرض تابش پرتو فرابنفش (UV) استریل شده بودند. ظروف به مدت ۲۴ ساعت درون یخچال (دمای ۴ درجه سلسیوس) نگهداری شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند (Liu et al., 2025).

آزمون رئولوژیکی دینامیکی (آزمون کرنش متغیر)
پارامترهای رئولوژیکی دینامیک با استفاده از رئومتر پارفیزیکا (Anton Paar GmbH, Germany) اندازه گیری شدند. این رئومتر مجهز به هندسه دو صفحه موازی با قطر ۵۰ میلی متر و فاصله دو صفحه (فاصله ای میان صفحه ای^۲) ۲ میلی متر است. از نرم افزار Rheoplus/32, version ۷3.40 برای تعیین پارامترهای رئولوژیکی مختلف مدول الاستیک (G')، مدول ویسکوز (G'') و ویسکوزیته کمپلکس (η^*) استفاده شد. دمای صفحه پایینی نیز با به

ویسکوزیته، مکانیسم های مکمل را برای پایداری ایجاد می کنند (Dickinson, 2009).

مطالعات متعددی در زمینه پایداری کره مغزهای خوراکی در دسترس هستند اما بیشتر این تحقیقات بر کره بادام زمینی متمرکز بوده اند (Liu et al., 2025). در مورد کره ماکادامیا، مطالعات محدودی در زمینه بهبود خواص رئولوژیکی و پایداری فیزیکی صورت گرفته است. برای مثال، بوتلزی و همکاران (Buthelezi et al., 2021) تأثیر شرایط فرآوری بر خواص فیزیکوشیمیایی روغن ماکادامیا را بررسی کردند، اما به جنبه های رئولوژیکی محصول نپرداختند. به رغم پتانسیل بالای استفاده همزمان از لستین و کربوکسی متیل سلولز در پایداری امولسیون ها، تاکنون مطالعه ای جامع در مورد برهم کنش این دو ترکیب و تأثیر آنها بر خواص ویسکوالاستیک کره ماکادامیا صورت نگرفته است.

هدف اصلی این پژوهش، بررسی اثرهای متقابل لستین و کربوکسی متیل سلولز بر خواص رئولوژیکی کره ماکادامیا و بهینه یابی فرمولاسیون برای دستیابی به محصولی با پایداری و ویژگی های رئولوژیک مطلوب است. اهمیت این تحقیق آنجاست که نتایج آن می تواند به توسعه فرمولاسیون های بهینه برای تولید کره ماکادامیا با کیفیت بالا و عمر ماندگاری طولانی تر کمک کند و درک عمیق تری از نقش امولسیفایرها و پایدارکننده ها در سیستم های امولسیونی پیچیده فراهم آورد.

مواد و روش ها

روش تهیه کره ماکادامیا

مغز ماکادامیا در این پژوهش از فروشگاه محصولات خشکبار در شهر مشهد تهیه شد. مغزها از نظر ظاهری سالم، بدون شکستگی، بدون آثار کپک زدگی و عاری از آلودگی های خارجی انتخاب شدند. پس از تهیه شدن مغزها، برای آماده سازی نمونه های کره ابتدا نمونه های

² Gap

کارگیری سیستم پلتیر کنترل شد. برای تعیین مدول الاستیک در ناحیه خطی (G'_{LVE})، مدول افت در ناحیه

طرح آزمایش و آنالیز آماری

خطی (G'_{LVE})، کرنش بحرانی (γ_c)، تنش تسلیم (τ_y)، تانژانت اتلاف در ناحیه خطی ($\tan \delta_{LVE}$)، تنش تسلیم در نقطه جریان (τ_f) و مدول الاستیک در نقطه جریان G_f : $G' = G''$ آزمون تنش متغیر در محدوده ۰/۰۱ تا ۱۰۰ درصد و فرکانس یک هرتز و در دمای ۲۰ درجه سلسیوس به اجرا در آمد (Balaghi *et al.*, 2011).

پایداری امولسیون

برای ارزیابی پایداری امولسیون، ۵ گرم از نمونه درون لوله سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتری قرار داده شد و با نیروی گریز از مرکز معادل ۸۵۰۰g به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ گردید. پس از سانتریفیوژ شدن، مقدار روغن جدا شده از نمونه اندازه‌گیری شد و مقدار آن (بر حسب

جدول ۱- سطوح متغیرهای فرایند در طرح مرکب مرکزی

Table 1 - Process Variable Levels in Central Composite Design

تیمار	لستین	کربوکسی متیل سلولز
Treatment	Lecithin	CMC
۱	۰	۰
۲	۰	۰/۱
۳	۰	۰/۰۵
۴	۱/۵	۰/۱
۵	۱/۵	۰/۰۵
۶	۱/۵	۰/۰۵
۷	۱/۵	۰/۰۵
۸	۱/۵	۰/۰۵
۹	۱/۵	۰/۰۵
۱۰	۱/۵	۰
۱۱	۳	۰/۱
۱۲	۳	۰
۱۳	۳	۰/۰۵

نتایج و بحث

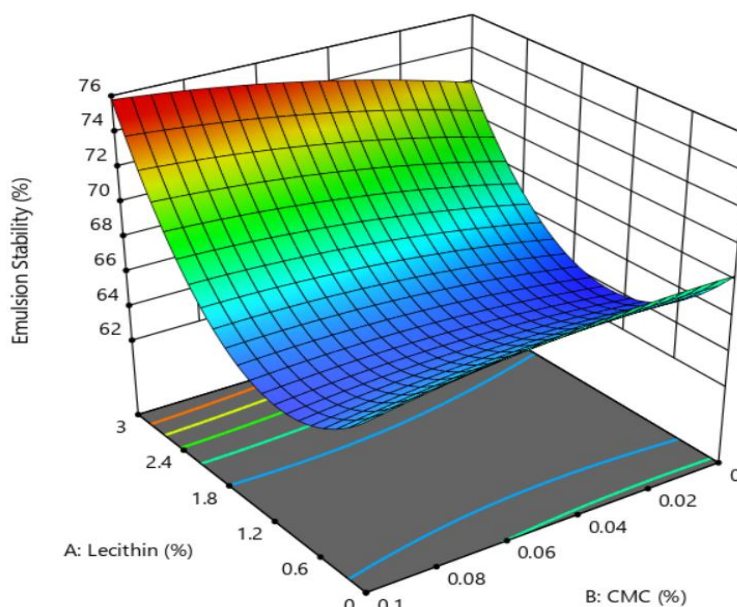
پایداری امولسیون

آزمون به ترتیب بین ۶۴/۰۹ تا ۷۵ درصد متغیر بود. مدل چند جمله‌ای درجه دو (معادله ۱) نیز به دلیل ضریب تبیین ۰/۹۵ و معنی دار نبودن فاکتور عدم برازش ۴ در سطح اطمینان ۹۵ درصد بهترین برازش را بر داده های پاسخ پایداری امولسیون داشت که در این مدل A و B به ترتیب لسیتین و کربوکسی متیل سلولز هستند.

$$Emulsion\ Stability = 68 + 6.9A + 4.7B + 17.7AB + 2.7A^2 - 203B^2 \quad (1)$$

نتایج بررسی‌ها نشان داد که اثر خطی لسیتین در سطح ۹۵ درصد بر پایداری امولسیون نمونه‌ها معنی‌دار است در حالی که کربوکسی متیل سلولز تأثیر معنی‌داری بر پایداری امولسیون نمونه‌ها نداشت. شکل ۱ تأثیر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز را بر پایداری امولسیون نمونه‌ها با توجه به ضریب‌های معادله ۱ نشان می‌دهد.

پایداری امولسیون در کره، به توانایی سیستم در حفظ یکپارچگی و جلوگیری از جداسازی فازهای روغن و آب اطلاق می‌شود که پایداری نبودن آن منجر به خروج روغن ۳ می‌گردد (McClements *et al.*, 2017) و یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفی در محصولات امولسیونی مانند کره ماکادامیا است که به توانایی سیستم در حفظ یکپارچگی و جلوگیری از جداسازی فازها اشاره دارد. در بررسی اثر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز بر ویژگی‌های کیفی کره ماکادامیا، مطالعه پایداری امولسیون اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا جداسازی روغن می‌تواند منجر به کاهش کیفیت محصول، تغییرات نامطلوب بافتی و کاهش پذیرش مصرف‌کننده شود. پایداری امولسیون نمونه‌های مورد



شکل ۱ - تأثیر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز بر پایداری امولسیون نمونه‌های کره ماکادامیا

Figure 1 - Effect of Lecithin and Carboxymethyl Cellulose on Emulsion Stability of Samples

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود با افزایش لسیتین می‌توان به افزایش پایداری امولسیون ابتدای کاهش و پس از آن کاهش اولیه و بعد افزایش پایداری) را می‌توان به

⁴ lack of fit factor

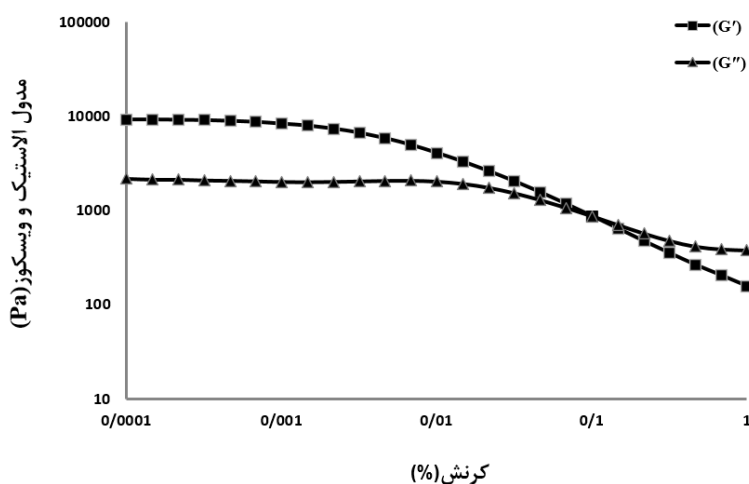
³ Oil-off

امولسیفایرهای دیگر پایدار شده‌اند، تأثیر قابل توجهی بر پایداری فیزیکی ندارد. این امر به دلیل ناتوانایی کربوکسی متیل سلولز در جذب مؤثر در سطح مشترک روغن-آب است (Dickinson, 2009). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که در سیستم‌های امولسیون حاوی روغن‌های گیاهی مانند روغن ماکادامیا، عملکرد لسیترین به عنوان امولسیفایر به شدت تحت تأثیر ترکیب اسیدهای چرب و ساختار مولکولی روغن قرار می‌گیرد (Liu *et al.*, 2025).

ویژگی‌های رئولوژیکی تغییر شکل کوچک کره ماکادامیا (آزمون کرنش متغیر)

شکل ۲ آزمون کرنش متغیر را برای تیمار شماره ۵ (حاوی ۱/۵ درصد لسیترین و ۰/۰۵ درصد کربوکسی متیل سلولز) در دمای ۲۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد.

خواص فیزیکوشیمیایی لسیترین نسبت داد. مطالعات نشان داده‌اند که لسیترین به عنوان یک امولسیفایر دوگانه‌دوست، در غلظت‌های پایین ممکن است باعث ناپایداری موقت سیستم شود. این پدیده به دلیل تداخل با لایه‌های بین سطحی موجود و تغییر در نیروهای الکترواستاتیک بین قطره‌هاست (McClements *et al.*, 2017). با افزایش غلظت لسیترین، پوشش کامل‌تر قطره‌های روغن و تشکیل یک لایه محافظ قوی‌تر اتفاق می‌افتد که منجر به افزایش پایداری امولسیون می‌شود (Guzey and McClements, 2006). در خصوص عدم تأثیرگذاری کربوکسی متیل سلولز بر پایداری امولسیون، این نتیجه با یافته‌های آروواجوی و همکاران (Aruwajoye *et al.*, 2023) مطابقت دارد. این محققان نشان دادند که کربوکسی متیل سلولز به عنوان یک هیدروکلوئید آب‌دوست در سیستم‌های امولسیونی روغن در آب که قبلاً توسط



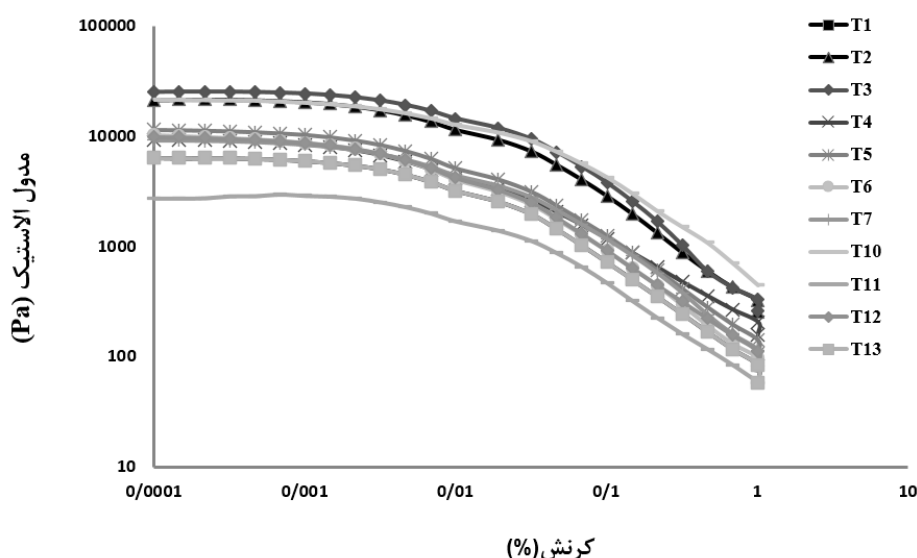
شکل ۲- نمودار مدول الاستیک (G') و مدول ویسکوز (G'') در برابر کرنش تیمار شماره ۵ (حاوی ۱/۵ درصد لسیترین و ۰/۰۵ درصد کربوکسی متیل سلولز) (در فرکانس ۱ هرتز و در دمای ۲۰°C)

Figure 2 - Graph of Elastic Modulus (G') and Viscous Modulus (G'') versus Strain for Treatment Number 5 (containing 1.5% Lecithin and 0.05% Carboxymethyl Cellulose) (at frequency of 1 Hz and temperature of 20°C)

در بررسی رفتار رئولوژیکی کره ماکادامیا در آزمون کرنش متغیر، همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، دو ناحیه متمایز دیده می‌شود. ناحیه اول، ناحیه مدول ذخیره (G') و افت (G'') تقریباً ثابت هستند. در این ناحیه، مدول ذخیره بزرگ‌تر از مدول افت است که نشان‌دهنده

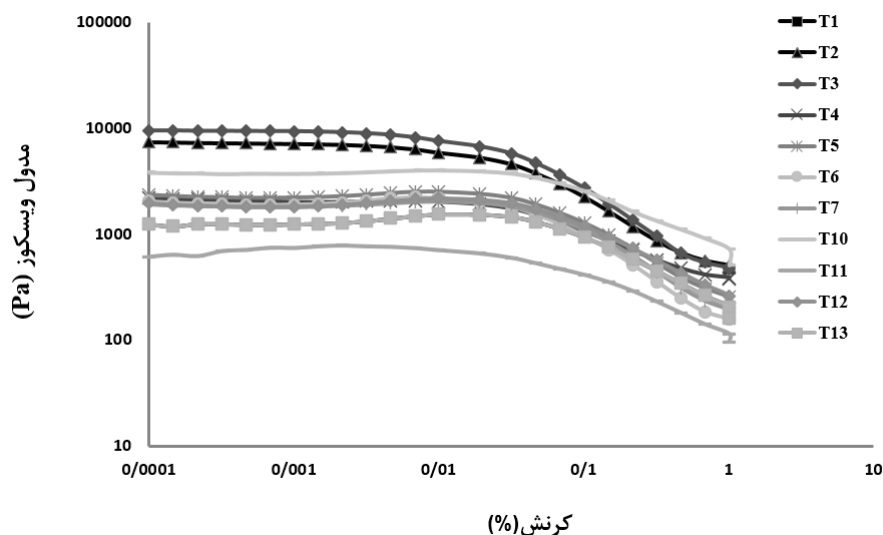
غالب بودن خاصیت جامدگونه در ساختار امولسیون است. این رفتار به دلیل وجود شبکه سه بعدی قوی بین ذرات و مولکول های موجود در سیستم است (Buthelezi *et al.*, 2021). در ناحیه دوم که ناحیه غیرخطی نامیده می شود، با افزایش کرنش اعمالی هر دو مدول G' و G'' شروع به کاهش می کنند. نقطه ای که در آن این دو مدول با یکدیگر برابر می شوند، نقطه جریان نامیده می شود و پس از آن، مدول افت از مدول ذخیره پیشی می گیرد که نشان دهنده تغییر رفتار سیستم از حالت جامدگونه به مایع گونه است. این تغییر رفتار به دلیل شکسته شدن ساختار شبکه ای امولسیون تحت تنش اعمالی است (Rao, 2013). کرنش یا تنش بحرانی (γ_c یا τ_y)، که نقطه شروع رفتار غیرخطی و کاهش سریع مدول الاستیک است، پارامتر مهمی در ارزیابی پایداری ساختاری امولسیون محسوب می شود. در نمونه های کره ماکادامیا، با افزایش تنش از این نقطه بحرانی، پیوندهای نگهدارنده شبکه شروع به گسستن می کنند و ساختار سه بعدی امولسیون تخریب می شود (Norton *et al.*, 2010). این پدیده با کاهش شدید مدول ذخیره همراه است که نشان دهنده از بین رفتن خاصیت الاستیک سیستم است.

شکل های ۳ و ۴ نیز نمودار مدول الاستیک و مدول ویسکوز در برابر کرنش را برای تیمارهای ۱ تا ۱۳ (بدون نقاط تکرار) (جدول ۱) (در فرکانس ۱ هرتز و در دمای ۲۰ درجه سلسیوس) نشان می دهد. با در نظر گرفتن این نمودار ها پارامترهای مهم حاصل از این آزمون که در دمای ۲۰ درجه سلسیوس و فرکانس یک هرتز اندازه گیری شده اند (جدول ۲)، شامل مدول های ذخیره و افت در ناحیه خطی (G'_{LVE} و G''_{LVE})، کرنش بحرانی (γ_c)، تنش تسلیم (τ_y)، تانژانت اتلاف در ناحیه خطی ($\tan \delta$)، تنش تسلیم در نقطه جریان (τ_f) و مدول الاستیک در نقطه جریان (G_f) هستند. این پارامترها اطلاعات ارزشمندی درباره خواص ساختاری و مکانیکی امولسیون کره ماکادامیا ارائه می دهند (Tabilo-Munizaga and Barbosa-Cánovas, 2005).



شکل ۳ - نمودار مدول الاستیک (G') در برابر کرنش برای تیمارهای ۱ تا ۱۳ (بدون نقاط تکرار) (جدول ۱) (در فرکانس ۱ هرتز و در دمای ۲۰ °C)

Figure 3 – Graph of Elastic modulus (G') versus strain for treatments 1–13 (without replicate points) (Table 1) at a frequency of 1 Hz and a temperature of 20 °C.



شکل ۴ - نمودار مدول ویسکوز (G'') در برابر کرنش برای تیمارهای ۱ تا ۱۳ (بدون نقاط تکرار) (جدول ۱) (در فرکانس ۱ هرتز و در دمای 20°C)

Figure 4 - Graph of Viscous modulus (G'') versus strain for treatments 1–13 (without replicate points) (Table 1) at a frequency of 1 Hz and a temperature of 20°C .

جدول ۲- پارامترهای حاصل از آزمون کرنش متغیر نمونه های کره ماکادامیا (دمای 20°C درجه سلسیوس و فرکانس یک هرتز)

Table 2 - Parameters Obtained from Variable Strain Test of Macadamia Butter Samples (temperature 20°C and frequency 1 Hz)

G_r (Pa)	τ_r (Pa)	$\tan \delta_{LVE}$	τ_y (Pa)	γ_c (%)	G''_{LVE} (Pa)	G'_{LVE} (Pa)	CMC	لستیتین	تیمار
								Lecithin	Treatment
1186.6	28.2	0.242334	5.75703	0.000246	6803.2	3979.7	0	0	1
745.8	277.5	0.510159	7.2405	0.000198	7301.2	21573	0.1	0	2
812	147.9	0.374871	5.86309	0.000222	7052.2	12247.5	0.05	0	3
761.6	132.8	0.229428	51.426	0.000318	2102.2	9162.8	0.1	1.5	4
1490.5	116	0.201065	3.622	0.000318	1946.3	9113.1	0.05	1.5	5
1105.6	87.4	0.196915	2.1957	0.000216	2246.3	9013.1	0.05	1.5	6
1000.3	114.8	0.202763	2.9552	0.000318	2046.3	9513.1	0.05	1.5	7
1053	101.1	0.202763	2.57545	0.000267	2346.3	8913.1	0.05	1.5	8
1026.6	107.9	0.202763	2.76532	0.000292	2246.3	9113.1	0.05	1.5	9
1451.4	58.3	0.175831	153.695	0.000217	2390.4	6947.9	0	1.5	10
394.91	45.5	0.247675	1.3913	0.000467	716.92	2894.6	0.1	3	11
1580.8	86.5	0.191614	2.1419	0.000217	1860.9	9711.7	0	3	12
1239.8	66.8	0.338442	2.069	0.000318	1254.1	6387.6	0.05	3	13

جمله‌ای درجه دو (معادله ۲) نیز به دلیل ضریب تبیین ۰/۹۶ و معنی دار نبودن فاکتور عدم برآزش در سطح اطمینان ۹۵ درصد، بهترین برآزش را بر داده های پاسخ $G' LVE$ دارد که در این مدل A و B به ترتیب لسیتین و کربوکسی متیل سلولز هستند.

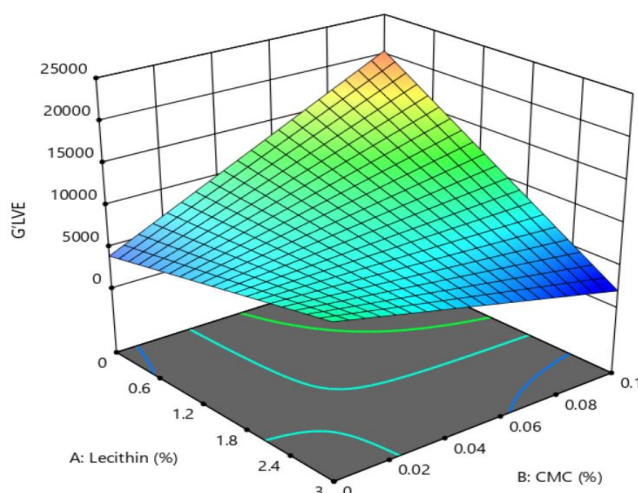
$$G' LVE = 3979 + 1978A + 1.6E5 + 05B - 81368AB \quad (2)$$

نتایج بررسی ها همچنین نشان می دهد اثر خطی لسیتین در سطح ۹۹ درصد و کربوکسی متیل سلولز در سطح ۹۸ درصد و اثر متقابل لسیتین - کربوکسی متیل سلولز در سطح ۹۹ درصد بر $G' LVE$ نمونه ها معنی دار هستند. شکل ۵ تأثیر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز بر $G' LVE$ نمونه ها را با توجه به ضریب های معادله ۲ نشان می دهد.

مدول الاستیک و ویسکوز در ناحیه خطی ($G' LVE$ و $G'' LVE$)

مدول الاستیک در ناحیه خطی ($G' LVE$)

مدول الاستیک در ناحیه خطی ($G' LVE$) یکی از پارامترهای کلیدی در بررسی خواص رئولوژیکی مواد به ویژه در سیستم های امولسیون و کلوئیدی مانند کره ماکادامیا است که نشان دهنده میزان انرژی ذخیره شده در ماده هنگام اعمال تنش و توانایی آن در بازگشت به شکل اولیه خود است. در بررسی اثر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز بر کره ماکادامیا، تحلیل $G' LVE$ به درک عمیق تری از نوع و میزان تأثیر این دو ماده بر ویژگی های رئولوژیکی کمک می کند. $G' LVE$ نمونه های مورد آزمون به ترتیب بین ۲۸۹۵ تا ۲۱۵۷۳ پاسکال متغیر است. مدل چند



شکل ۵ - تأثیر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز بر $G' LVE$ نمونه های کره ماکادامیا

Figure 5 - Effect of Lecithin and Carboxymethyl Cellulose on $G' LVE$ of Macadamia Butter Samples

همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود در غلظت های پایین لسیتین، افزایش کربوکسی متیل سلولز منجر به افزایش قابل توجه $G' LVE$ می شود. این پدیده را می توان به توانایی منحصر به فرد کربوکسی متیل سلولز در تشکیل شبکه های پلیمری و ایجاد پیوندهای هیدروژنی نسبت داد. برابر مطالعات شو و همکاران (Xu et al., 2025)، کربوکسی متیل سلولز با افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته و تشکیل شبکه های سه بعدی باعث افزایش پایداری و قدرت ژل می شود. به همین دلیل، بیشترین مقدار $G' LVE$ در نمونه حاوی ۰/۱ درصد کربوکسی متیل سلولز مشاهده می شود. در غلظت های پایین کربوکسی متیل سلولز، افزایش لسیتین تأثیر مثبت اما محدودی بر $G' LVE$ دارد. سور و همکاران (Surh et al., 2008) در مطالعات خود نشان دادند که لسیتین به عنوان یک

پایین لسیتین، افزایش کربوکسی متیل سلولز منجر به افزایش قابل توجه $G' LVE$ می شود. این پدیده را می توان به توانایی منحصر به فرد کربوکسی متیل سلولز در تشکیل شبکه های پلیمری و ایجاد پیوندهای هیدروژنی نسبت داد. برابر مطالعات شو و همکاران (Xu et al., 2025)، کربوکسی متیل سلولز با افزایش ویسکوزیته فاز

امولسیفایر با کاهش کشش بین سطحی و تثبیت قطره - های امولسیون می تواند تا حدودی ساختار را تقویت کند. با این حال، این اثر در مقایسه با نقش ساختاری کربوکسی متیل سلولز کمتر چشمگیر است. نکته قابل توجه این است که در غلظت های بالای کربوکسی متیل سلولز، افزایش لسیتین منجر به کاهش شدید $G' LVE$ می شود. کای و همکاران (Cai *et al.*, 2023) در تحقیقات خود نشان دادند که این کاهش می تواند ناشی از تداخل مولکول های لسیتین با شبکه پلیمری کربوکسی متیل سلولز باشد. در این شرایط، لسیتین می تواند با اختلال در پیوندهای بین مولکولی کربوکسی متیل سلولز، ساختار شبکه ای را تضعیف کند. مک لمنتس و همکاران (McClements *et al.*, 2017) تایید می کنند که در سیستم های امولسیونی تعادل بین امولسیفایرها و پایدارکننده ها نقش حیاتی در خواص رئولوژیکی دارد. این یافته ها اهمیت بهینه یابی نسبت کربوکسی متیل سلولز به لسیتین را در فرمولاسیون محصولات امولسیونی نشان می دهد.

مدول ویسکوز در ناحیه خطی ($G'' LVE$)

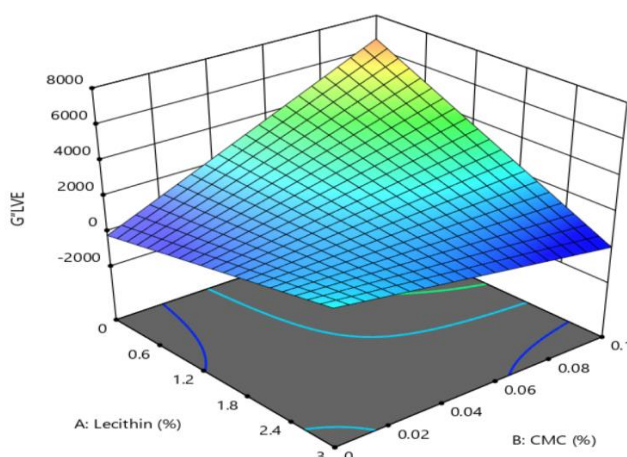
مدول ویسکوز در ناحیه خطی ($G'' LVE$) یکی از پارامترهای مهم رئولوژیکی است که نشان دهنده میزان

انرژی اتلاف شده طی تغییر شکل مواد است و به عنوان معیاری برای ارزیابی خاصیت ویسکوز مواد در سیستم های کلوئیدی و امولسیونی به کار می رود. در مطالعه اثر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز بر کره ماکادامیا، بررسی $G'' LVE$ اهمیت ویژه ای دارد زیرا این پارامتر می تواند اطلاعات ارزشمندی درباره نحوه تأثیر این دو ترکیب بر رفتار جریان و ویسکوز محصول ارائه دهد.

$G'' LVE$ نمونه های مورد آزمون به ترتیب بین ۷۱۶ تا ۷۳۰۱ پاسکال متغیر است. مدل چند جمله ای درجه دو (معادله ۳) نیز به دلیل ضریب تبیین ۰/۹۶ و معنی دار نبودن فاکتور عدم برازش در سطح اطمینان ۹۱ درصد، بهترین برازش را بر داده های پاسخ $G' LVE$ دارد که در این مدل A و B به ترتیب لسیتین و کربوکسی متیل سلولز هستند.

$$G' LVE = -188 + 871A + 68541B - 30665AB \quad (3)$$

نتایج بررسی ها نشان می دهد اثر خطی کربوکسی متیل سلولز و اثر متقابل لسیتین - کربوکسی متیل سلولز در سطح ۹۵ درصد بر $G'' LVE$ نمونه ها معنی دار است. شکل ۶ تأثیر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز بر $G'' LVE$ نمونه ها را با توجه به ضریب های معادله ۳ نشان می دهد.



شکل ۶- تأثیر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز بر $G'' LVE$ نمونه های کره ماکادامیا

Figure 6 - Effect of Lecithin and Carboxymethyl Cellulose on $G'' LVE$ of Macadamia Butter Samples

غیرخطی را نشان می‌دهد (Kashaninejad *et al.*, 2019). بررسی این پارامتر در مطالعه اثر لستین و کربوکسی متیل سلولز بر کره ماکادامیا از این رو با اهمیت است که مستقیماً با پایداری ساختاری و مقاومت امولسیون در برابر تغییر شکل ارتباط دارد.

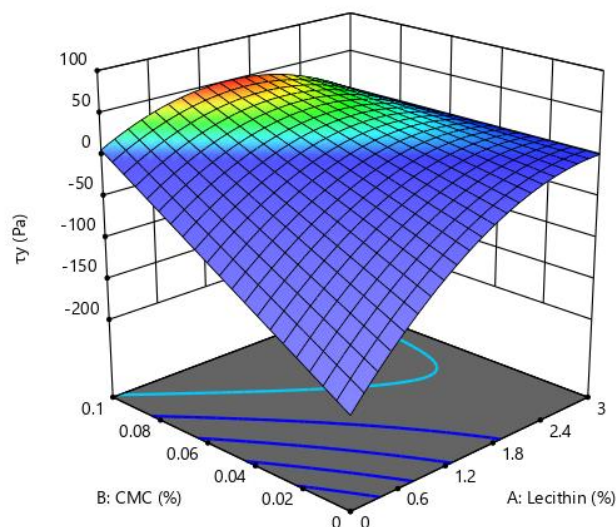
ty نمونه های مورد آزمون به ترتیب بین ۱/۳۹ تا ۵۱/۴۲ پاسکال متغیر است. مدل چند جمله ای درجه دو (معادله ۴) نیز به دلیل ضریب تبیین ۰/۹۶ و معنی دار نبودن فاکتور عدم برازش در سطح اطمینان ۹۶ درصد، بهترین برازش را بر داده های پاسخ ty دارد که در این مدل A و B به ترتیب لستین و کربوکسی متیل سلولز هستند.

(۴)
$$\tau_y = 28.28 + 20.06A + 2393B - 967AB$$
 نتایج بررسی ها نشان می‌دهد اثر خطی کربوکسی متیل سلولز، لستین و اثر متقابل لستین - کربوکسی متیل سلولز در سطح ۹۹ درصد بر ty نمونه ها معنی دار است. شکل ۷ تأثیر لستین و کربوکسی متیل سلولز بر ty نمونه ها را با توجه به ضریب های معادله ۴ نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در حضور مقادیر پایین لستین با افزایش کربوکسی متیل سلولز، ty نمونه ها افزایش می یابد در حالی که در حضور مقادیر بالای لستین تغییرات کربوکسی متیل سلولز تأثیر چندانی بر ty نمونه ها ندارد. در غلظت های پایین لستین، افزایش کربوکسی متیل سلولز منجر به افزایش تنش بحرانی می‌شود که این پدیده را می‌توان به خاصیت قوام دهنده گی و تشکیل شبکه توسط کربوکسی متیل سلولز نسبت داد. کربوکسی متیل سلولز، به عنوان یک هیدروکلوئید، با افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته و ایجاد پیوندهای بین مولکولی باعث تقویت ساختار شبکه ای امولسیون می‌شود (Dickinson, 2009). این افزایش استحکام ساختاری منجر به افزایش مقاومت سیستم در برابر تغییر شکل و در نتیجه افزایش تنش بحرانی می‌گردد (McClements *et al.*, 2017).

همان طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، روند تغییرات G' LVE مشابه روند تغییرات G'' LVE است به طوری که در غلظت های پایین لستین، افزایش کربوکسی متیل سلولز منجر به افزایش G'' LVE می‌شود. این پدیده را می‌توان به چند عامل نسبت داد. برابر مطالعات شو و همکاران (Xu *et al.*, 2025) کربوکسی متیل سلولز با افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته و تشکیل شبکه های پلیمری باعث افزایش اتلاف انرژی در حین تغییر شکل می‌شود. زنجیره های طولانی کربوکسی متیل سلولز با ایجاد اصطکاک مولکولی بیشتر، منجر به افزایش خاصیت ویسکوز سیستم می‌شوند. در غلظت های پایین کربوکسی متیل سلولز، افزایش لستین تأثیر مثبت اما محدودی بر G' LVE دارد. سور و همکاران (Surh, *et al.*, 2008) نشان دادند که لستین، به عنوان یک امولسیفایر، با کاهش اندازه قطره ها و افزایش سطح تماس بین فازها می‌تواند اتلاف انرژی را در سیستم افزایش دهد. این افزایش محدود G' LVE به دلیل برهم کنش های ضعیف بین مولکول های لستین و شبکه کربوکسی متیل سلولز در غلظت های پایین است. اما در غلظت های بالای کربوکسی متیل سلولز، افزایش لستین منجر به کاهش شدید G'' LVE می‌شود. مک لمنتس و همکاران (McClements *et al.*, 2017) در تحقیقات خود نشان دادند که این کاهش می‌تواند ناشی از تداخل مولکول های لستین با شبکه پلیمری کربوکسی متیل سلولز باشد. در این شرایط، لستین با اختلال در پیوندهای بین مولکولی کربوکسی متیل سلولز، ساختار شبکه ای را تضعیف می‌کند و در نتیجه توانایی سیستم در اتلاف انرژی کاهش می‌یابد.

تنش بحرانی (ty)

تنش بحرانی (ty) به عنوان حداقل تنش مورد نیاز برای شروع جریان و تغییر شکل ساختار امولسیون تعریف می‌شود که نقطه گذار از رفتار الاستیک به ویسکوالاستیک



شکل ۷ - تأثیر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز بر τ_y نمونه های کره ماکادامیا

Figure 7 - Effect of Lecithin and Carboxymethyl Cellulose on τ_y of Macadamia Butter Samples

غلظت‌های بالا سطح مشترک قطره‌ها را کاملاً پوشش می‌دهد و یک لایه محافظ قوی ایجاد می‌کند (Guzey and McClements, 2006). در این شرایط، حضور کربوکسی متیل سلولز نمی‌تواند تأثیر قابل توجهی بر پایداری مکانیکی سیستم داشته باشد، زیرا برهم‌کنش‌های بین قطره‌ها عمدتاً توسط لایه لسیتین کنترل می‌شود (Mun *et al.*, 2007). علاوه بر این، مطالعات نشان داده‌اند که در غلظت‌های بالای لسیتین ممکن است تشکیل میسل‌های لسیتین در فاز پیوسته رخ دهد که می‌تواند با عملکرد کربوکسی متیل سلولز تداخل ایجاد کند. این میسل‌ها می‌توانند مانع از برهم‌کنش مؤثر مولکول‌های کربوکسی متیل سلولز با یکدیگر با سطح قطره‌ها شوند (McClements *et al.*, 2017).

کرنش بحرانی (γ_c)

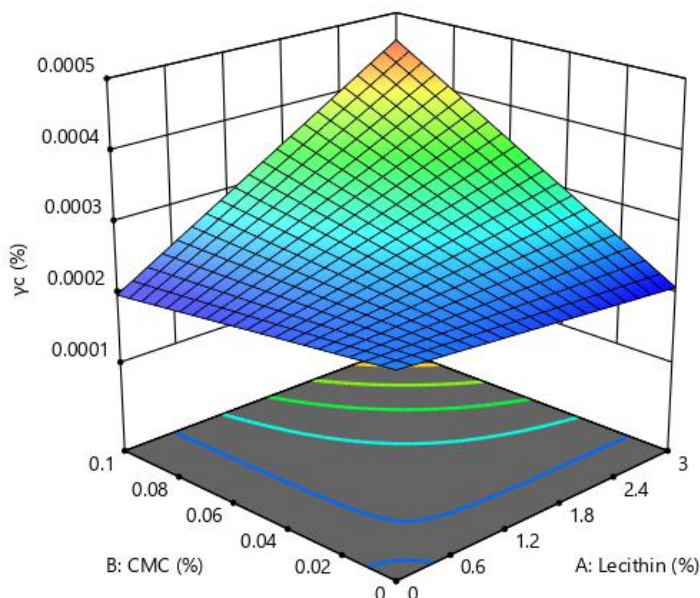
کرنش بحرانی (γ_c) حد آستانه تغییر شکل در ساختار مواد ویسکوالاستیک تعریف می‌شود که در آن رفتار ماده از حالت خطی به غیرخطی تغییر می‌کند و ساختار شبکه‌ای شروع به تخریب خواهد کرد (Ak and Gunasekaran, 2001). بررسی این پارامتر در مطالعه اثر

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در حضور مقادیر پایین لسیتین با افزایش کربوکسی متیل سلولز، τ_y نمونه‌ها افزایش می‌یابد در حالی که در حضور مقادیر بالای لسیتین تغییرات کربوکسی متیل سلولز تأثیر چندانی بر τ_y نمونه‌ها ندارد. در غلظت‌های پایین لسیتین، افزایش کربوکسی متیل سلولز منجر به افزایش تنش بحرانی می‌شود که این پدیده را می‌توان به خاصیت قوام‌دهندگی و تشکیل شبکه توسط کربوکسی متیل سلولز نسبت داد. کربوکسی متیل سلولز، به عنوان یک هیدروکلوئید، با افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته و ایجاد پیوندهای بین مولکولی باعث تقویت ساختار شبکه‌ای امولسیون می‌شود (Dickinson, 2009). این افزایش استحکام ساختاری منجر به افزایش مقاومت سیستم در برابر تغییر شکل و در نتیجه افزایش تنش بحرانی می‌گردد (McClements *et al.*, 2017). در مقابل، در غلظت‌های بالای لسیتین، تغییرات کربوکسی متیل سلولز تأثیر چندانی بر تنش بحرانی ندارد. این پدیده را می‌توان به اشباع شدن سطح مشترک قطره‌ها با مولکول‌های لسیتین نسبت داد. لسیتین، به عنوان یک امولسیفایر قوی، در

لسیتین و کربوکسی متیل سلولز بر کره ماکادامیا از این رو با اهمیت است که می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره پایداری ساختاری و مقاومت امولسیون در برابر تغییر شکل ارائه دهد. به عبارت دیگر، کرنش بحرانی نشان‌دهنده محدوده‌ای است که در آن شبکه امولسیون تحت تأثیر برهم‌کنش‌های بین لسیتین (به عنوان امولسیفایر) و کربوکسی متیل سلولز (به عنوان پایدارکننده) می‌تواند تغییر شکل را بدون تخریب ساختار تحمل کند (McClements, et al., 2017). این پارامتر همچنین می‌تواند در پیش‌بینی رفتار محصول در فرآیند تولید، حمل و نقل و نگهداری به کار رود زیرا تغییر شکل‌های بیش از حد کرنش بحرانی می‌تواند منجر به ناپایداری و جدایی فازها در امولسیون شود (Tadros, 2013). γ_c نمونه‌های مورد آزمون به ترتیب بین

$$\gamma_c = 0.000246 - 0.000012A - 0.000480B + 0.000993AB \quad (5)$$

نتایج بررسی‌ها همچنین نشان داد که اثر متقابل لسیتین - کربوکسی متیل سلولز در سطح ۹۵ درصد بر γ_c نمونه‌ها معنی دار است. شکل ۸ تأثیر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز بر γ_c نمونه‌ها را با توجه به ضریب - های معادله ۵ نشان می‌دهد.



شکل ۸- تأثیر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز بر γ_c نمونه‌های کره ماکادامیا

Figure 8 - Effect of Lecithin and Carboxymethyl Cellulose on γ_c of Macadamia Butter Samples

در شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش لسیتین و کربوکسی متیل سلولز، γ_c نمونه‌ها افزایش می‌یابد. لسیتین به عنوان یک امولسیفایر دوگانه‌دوست، با کاهش کشش سطحی بین فاز آبی و روغنی، باعث تشکیل و

پایداری قطره‌های ریز امولسیون می‌شود. مولکول‌های لسیتین در سطح مشترک قطره‌ها قرار می‌گیرند و با ایجاد لایه‌ای محافظ، از به هم پیوستن قطره‌ها جلوگیری می‌کنند. این لایه محافظ، مقاومت سیستم را در برابر

تغییر شکل افزایش می‌دهد و در نتیجه کرنش بحرانی افزایش می‌یابد (Dickinson, 2009). لسیتین با ایجاد نیروهای دفع‌کننده الکترواستاتیک و فضایی بین قطره‌ها، پایداری فیزیکی سیستم را بهبود می‌بخشد (McClements et al., 2017). از سوی دیگر، کربوکسی متیل سلولز به عنوان یک هیدروکلوئید آنیونی، با افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته و ایجاد شبکه سه‌بعدی، نقش مهمی در پایداری ساختار امولسیون خواهد داشت. این پلیمر با ایجاد پیوندهای هیدروژنی و برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک شبکه‌ای منسجم تشکیل می‌دهد که مقاومت سیستم را در برابر تغییر شکل افزایش می‌دهد (Sahan et al., 2008). علاوه بر این، کربوکسی متیل سلولز با افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته، حرکت قطره‌ها را محدود خواهد کرد و از برخورد و ادغام آنها جلوگیری می‌کند (Phillips and Williams, 2009). اثر هم‌افزایی بین لسیتین و کربوکسی متیل سلولز نیز در افزایش کرنش بحرانی نقش دارد. مطالعات نشان داده‌اند که حضور همزمان امولسیفایر و پایدارکننده می‌تواند منجر به تشکیل ساختاری پیچیده و مستحکم‌تر شود. در این حالت، لسیتین با پایداری‌سازی سطح مشترک قطره‌ها و کربوکسی متیل سلولز با تشکیل شبکه در فاز پیوسته، به طور همزمان باعث افزایش مقاومت ساختاری سیستم می‌شوند (Guzey and McClements, 2006). این ساختار مستحکم می‌تواند کرنش‌های بزرگ‌تری را پیش از تخریب تحمل کند که به معنای افزایش کرنش بحرانی است.

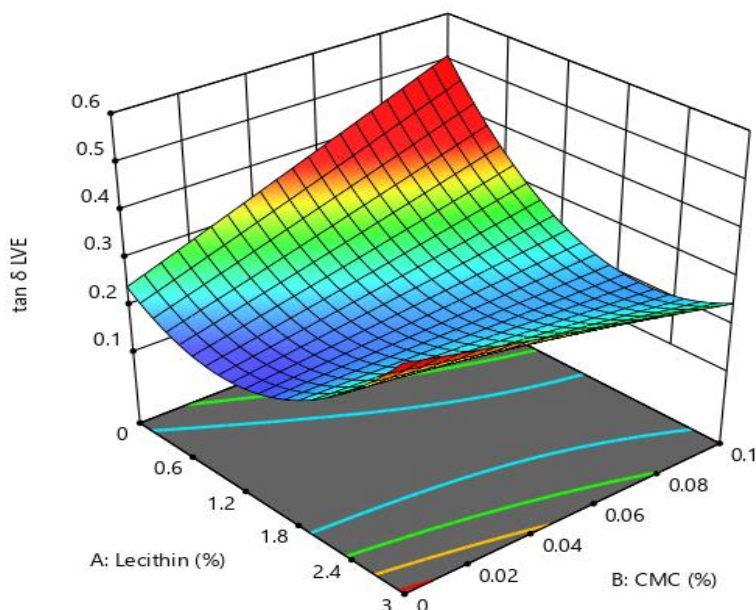
تانژانت اتلاف

تانژانت اتلاف ($\tan \delta$) که از نسبت مدول افت (G'') به مدول ذخیره (G') محاسبه می‌شود، معیاری برای ارزیابی رفتار ویسکوالاستیک مواد است و نشان می‌دهد

که خواص ویسکوز یا الاستیک کدام یک در رفتار ماده غالب است (Wang et al., 2019). مقادیر $\tan \delta$ کمتر از ۱ نشان‌دهنده غالب بودن خواص الاستیک و رفتار جامدگونه و مقادیر بیشتر از ۱ بیانگر غالب بودن خواص ویسکوز و رفتار مایع‌گونه است (McClements et al., 2017). بررسی این پارامتر در مطالعه اثر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز بر کره ماکادامیا از این رو با اهمیت است که می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره تغییرات ساختاری و برهم‌کنش‌های مولکولی در سیستم ارائه دهد. برای مثال، کاهش $\tan \delta$ می‌تواند نشان‌دهنده تقویت شبکه و افزایش خاصیت الاستیک در اثر برهم‌کنش‌های مؤثر بین لسیتین (در سطح مشترک) و کربوکسی متیل سلولز (در فاز پیوسته) باشد که این امر می‌تواند به پیش‌بینی پایداری فیزیکی و رفتار رئولوژیکی محصول در شرایط مختلف کمک کند (Tadros, 2013). تانژانت اتلاف نمونه‌های مورد آزمون به ترتیب بین ۰/۱۹۶ تا ۰/۳۷۴ درصد متغیر است. مدل چند جمله‌ای درجه دو (معادله ۶) نیز به دلیل ضریب تبیین ۰/۹۶ و معنی‌دار نبودن فاکتور عدم برآزش در سطح اطمینان ۹۶ درصد، بهترین برآزش را بر داده‌های پاسخ تانژانت اتلاف دارد که در این مدل A و B به ترتیب لسیتین و کربوکسی متیل سلولز هستند.

$$\tan \delta = 0.242 - 0.143A + 2.62B - 1.42AB + 0.066A^2 + 0.550B^2 \quad (6)$$

نتایج بررسی‌ها نشان داد که اثر خطی لسیتین، کربوکسی متیل سلولز و اثر متقابل لسیتین - کربوکسی متیل سلولز در سطح ۹۹ درصد بر تانژانت اتلاف نمونه‌ها معنی‌دار است. شکل ۹ تأثیر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز را بر تانژانت اتلاف نمونه‌ها با توجه به ضرائب معادله ۶ نشان می‌دهد.



شکل ۹ - تأثیر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز بر تانژانت اتلاف نمونه‌های کره ماکادامیا

Figure 9 - Effect of Lecithin and Carboxymethyl Cellulose on Loss Tangent of Macadamia Butter Samples

و نیز خواص ژلاتینی، که معمولاً از ایجاد شبکه‌های گرانولی در سیستم‌های امولسیون ناشی می‌شود، به اندازه‌ای زیاد می‌شود که باعث افزایش تانژانت اتلاف می‌گردد. این افزایش تانژانت اتلاف می‌تواند ناشی از افزایش لزوجت و اتلاف بیشتر انرژی در نتیجهٔ تحرکات مولکولی پیچیده‌تر باشد (Kashaninejad *et al.*, 2019). کربوکسی متیل سلولز مادهٔ گرانی‌تری است که می‌تواند با ایجاد پیوندهای هیدروژنی با آب و چربی در ساختار ماتریکس کره ماکادامیا تأثیرات مهمی بر رفتار رئولوژیکی آن داشته باشد. در مقادیر پایین لسیتین، هنگامی که کربوکسی متیل سلولز به کره اضافه می‌شود، این ماده می‌تواند به شدت باعث افزایش ویسکوزیته و به تبع آن افزایش تانژانت اتلاف شود. این امر به دلیل افزایش مقاومت در برابر جریان و کاهش قابلیت جریان پذیری است که به طور طبیعی موجب اتلاف بیشتر انرژی می‌شود (Rao, 2013).

افزایش تانژانت اتلاف در مقادیر پایین لسیتین ممکن است به این دلیل باشد که لسیتین ناکافی برای

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش لسیتین تانژانت اتلاف نمونه‌ها ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. مطابق شکل در مقادیر پایین لسیتین با افزایش کربوکسی متیل سلولز تانژانت اتلاف نمونه‌ها به شدت افزایش می‌یابد این در حالی است که شدت این افزایش در مقادیر بالای لسیتین کمتر است. کاهش اولیهٔ تانژانت اتلاف با افزایش لسیتین را می‌توان به رفتار رئولوژیکی امولسیون‌ها و تأثیر لسیتین به عنوان یک امولسیفایر مرتبط دانست. لسیتین به دلیل خاصیت آمفیپاتیک خود می‌تواند به عنوان عامل امولسیون‌کننده عمل کند و در ابتدا ساختار یکنواخت‌تری از چربی‌ها و آب را در کره ماکادامیا ایجاد کند. این ساختار یکنواخت به کاهش میزان اتلاف انرژی در بافت کمک می‌کند و باعث کاهش تانژانت اتلاف می‌شود. علاوه بر این، لسیتین به دلیل ویژگی‌های خود می‌تواند در کاهش ویسکوزیته و تسهیل جریان مواد نقش داشته باشد (Steffe, 1996). اما پس از یک نقطهٔ بحرانی، افزایش بیشتر لسیتین می‌تواند منجر به اثر معکوس شود. در این مرحله، میزان امولسیون

تشکیل امولسیون پایدار باعث می‌شود تا کربوکسی متیل سلولز بیشتر در فاز آب-چربی ارتباط برقرار کند و به صورت موثری موجب افزایش گرانی و اتلاف انرژی در سیستم شود. در نتیجه، انرژی بیشتری در فازها و مرزهای فازی تلف می‌شود که به افزایش مقدار تانژانت اتلاف می-انجامد.

در مقادیر بالاتر لسیتین، ترکیب لسیتین و کربوکسی متیل سلولز می‌تواند به ایجاد شبکه‌ای پایدارتر کمک کند که از اتلاف انرژی زیاد در اثر تعاملات نامطلوب جلوگیری می‌کند. این افزایش در میزان لسیتین باعث بهبود ساختار امولسیون و کاهش تجمعات گرانی و ساختارهای ویسکوز می‌شود. در نتیجه، با توجه به پایداری بیشتر امولسیون در مقادیر بالاتر لسیتین، میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد و در نتیجه تغییرات در تانژانت اتلاف کمتر محسوس است. به عبارت دیگر، در مقادیر بالاتر لسیتین رفتار رئولوژیکی سیستم بهینه‌تر خواهد شد و کمتر دچار اتلاف انرژی می‌شود (Steffe, 1996).

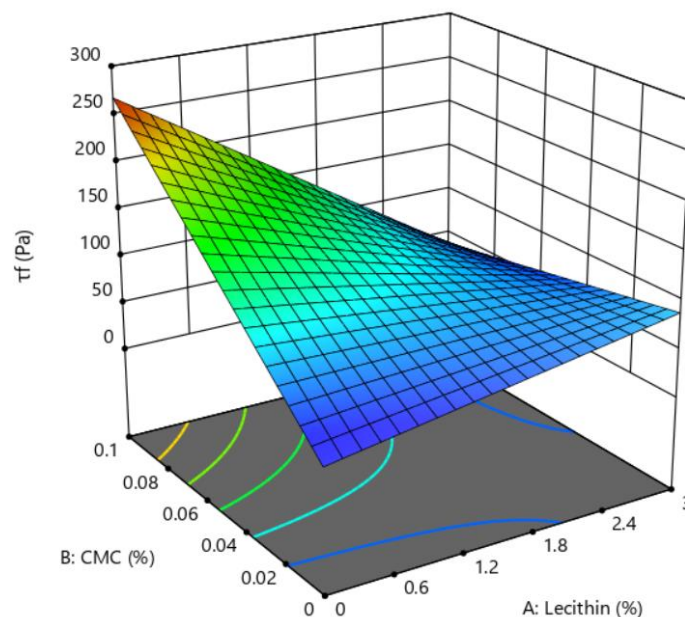
تنش تسلیم و مدول الاستیک در نقطه جریان (τ_f) و (G')

تنش تسلیم در نقطه جریان (τ_f)

تنش تسلیم در نقطه جریان (τ_f) نمونه های مورد آزمون به ترتیب بین ۴۵/۵۸ تا ۲۷۷/۵ پاسکال متغیر است. مدل چند جمله‌ای درجه دو (معادله ۷) نیز به دلیل ضریب تبیین ۰/۹۶ و معنی دار نبودن فاکتور عدم برازش در سطح اطمینان ۹۵ درصد، بهترین برازش را بر داده های پاسخ τ_f دارد که در این مدل A و B به ترتیب لسیتین و کربوکسی متیل سلولز هستند.

$$\tau_f = 28.28 + 20.06A + 2393.2B - 967.34AB \quad (7)$$

نتایج بررسی ها نشان می‌دهد که اثر خطی لسیتین و کربوکسی متیل سلولز و اثر متقابل لسیتین - کربوکسی متیل سلولز در سطح ۹۹ درصد بر τ_f نمونه ها معنی دار هستند. شکل ۱۰ تأثیر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز بر τ_f نمونه ها را با توجه به ضریب‌های معادله ۷ نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ - تأثیر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز بر τ_f نمونه های کره ماکادامیا

Figure 10 - Effect of Lecithin and Carboxymethyl Cellulose on τ_f of Macadamia Butter Samples

برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک بین گروه‌های باردار لستین و کربوکسی متیل سلولز باشد که منجر به تضعیف پیوندهای بین مولکولی کربوکسی متیل سلولز می‌شود (Dickinson, 2009). علاوه بر این، لستین اضافی می‌تواند به صورت میسل در فاز پیوسته حضور داشته باشد و با ایجاد اثر روان‌کنندگی، باعث کاهش τ_f شود (Tadros, 2013).

مدول الاستیک در نقطه جریان (Gf)

مدول الاستیک در نقطه جریان (Gf) که نشان‌دهنده مقاومت ساختاری ماده در لحظه شروع جریان است، پارامتر مهمی در ارزیابی خواص رئولوژیکی مواد غذایی محسوب می‌شود (Steffe, 1996). در مطالعه اثر لستین و کربوکسی متیل سلولز بر کره ماکادامیا، بررسی از این جهت حائز اهمیت است که می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره استحکام شبکه و برهم‌کنش‌های بین مولکولی ارائه دهد؛ به طوری که افزایش Gf می‌تواند نشان‌دهنده تقویت ساختار شبکه‌ای در اثر برهم‌کنش مؤثر بین لستین و کربوکسی متیل سلولز باشد (Dickinson, 2009)، در حالی که کاهش آن می‌تواند بیانگر تضعیف ساختار و کاهش پایداری سیستم باشد (McClements *et al.*, 2017). این پارامتر همچنین می‌تواند در پیش‌بینی رفتار محصول در حین فرآیندهای مختلف مانند پمپاژ، اختلاط و پر کردن، که نیازمند جریان یافتن ماده هستند، کمک‌کننده باشد (Rao, 2013).

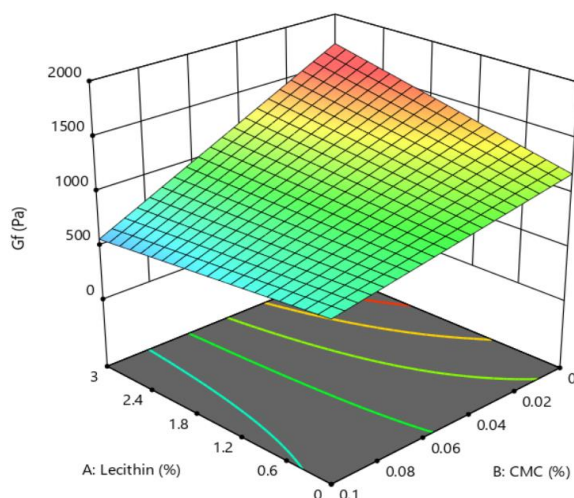
مدول الاستیک در نقطه جریان (Gf) نمونه‌های مورد آزمون به ترتیب بین ۳۹۴/۹۱ تا ۱۵۸۰/۸۵ پاسکال متغیر است. مدل چند جمله‌ای درجه دو (معادله ۸) نیز به دلیل ضریب تبیین ۰/۷۵ و معنی دار نبودن فاکتور عدم برازش در سطح اطمینان ۹۵ درصد بهترین برازش را بر داده‌های پاسخ Gf دارد که در این مدل A و B به ترتیب لستین و کربوکسی متیل سلولز هستند.

$$Gf = 1186.62 + 176.52A - 3996B - 2483AB \quad (8)$$

در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که در غلظت‌های پایین لستین، افزایش کربوکسی متیل سلولز منجر به افزایش قابل توجه τ_f می‌شود. در غلظت‌های پایین کربوکسی متیل سلولز، افزایش لستین تأثیر مثبت اما محدودی بر τ_f دارد. نکته قابل توجه این است که در غلظت‌های بالای کربوکسی متیل سلولز، افزایش لستین منجر به کاهش شدید τ_f می‌شود. در غلظت‌های پایین لستین، افزایش کربوکسی متیل سلولز منجر به افزایش قابل توجه τ_f می‌شود که این پدیده را می‌توان به توانایی کربوکسی متیل سلولز در تشکیل شبکه‌های سه‌بعدی در فاز پیوسته نسبت داد. مولکول‌های کربوکسی متیل سلولز ایجاد پیوندهای هیدروژنی و برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک، شبکه پلیمری منسجمی تشکیل می‌دهند که مقاومت سیستم را در برابر جریان افزایش می‌دهد (Sahan *et al.*, 2008). این شبکه همچنین با محدود کردن حرکت قطره‌های روغن، به افزایش استحکام ساختاری سیستم کمک می‌کند (Phillips and Williams, 2009). در غلظت‌های پایین کربوکسی متیل سلولز، افزایش لستین تأثیر مثبت اما محدودی بر τ_f دارد. این اثر محدود را می‌توان به نقش دوگانه لستین نسبت داد. لستین از یک طرف با کاهش کشش بین سطحی و تشکیل لایه محافظ در سطح قطره‌ها باعث پایداری امولسیون می‌شود (McClements, Bai and Chung, 2017) و از طرف دیگر در غیاب مقادیر کافی کربوکسی متیل سلولز شبکه سه‌بعدی قوی تشکیل نمی‌شود و در نتیجه افزایش τ_f محدود می‌ماند.

کاهش شدید τ_f در غلظت‌های بالای کربوکسی متیل سلولز با افزایش لستین را می‌توان به رقابت بین این دو ماده و اختلال در تشکیل شبکه نسبت داد. در غلظت‌های بالای کربوکسی متیل سلولز، شبکه پلیمری قوی تشکیل می‌شود، اما افزایش بیش از حد لستین می‌تواند باعث اختلال در این شبکه شود. این پدیده می‌تواند به دلیل

نتایج بررسی ها نشان می دهد اثر خطی کربوکسی متیل سلولز در سطح ۹۵ درصد بر Gf نمونه ها معنی دار است. در حالی که لسیتین تاثیر معنی داری بر Gf نمونه ها ندارد. شکل ۱۱ تاثیر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز بر Gf نمونه ها را با توجه به ضریب های معادله ۸ نشان می دهد.



شکل ۱۱ - تأثیر لسیتین و کربوکسی متیل سلولز بر Gf نمونه های کره ماکادمیا

Figure 11 - Effect of Lecithin and Carboxymethyl Cellulose on Gf of Macadamia Butter Samples

همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود افزایش کربوکسی متیل سلولز منجر به افزایش قابل توجه Gf نمونه ها می شود. در حالی که تغییرات لسیتین تأثیری بر Gf نمونه ها ندارد. افزایش قابل توجه Gf با افزایش غلظت کربوکسی متیل سلولز را می توان به چندین مکانیسم نسبت داد. اولین و مهم ترین عامل، توانایی منحصر به فرد کربوکسی متیل سلولز در تشکیل شبکه های سه بعدی از طریق پیوندهای هیدروژنی و برهم کنش های الکترواستاتیک است. این شبکه ها باعث افزایش مقاومت ساختاری سیستم در برابر تغییر شکل می شوند (BeMiller, 2018). علاوه بر این، مولکول های کربوکسی متیل سلولز با افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته، حرکت قطره های روغن را محدود می کنند و باعث افزایش پایداری و استحکام ساختاری امولسیون می شوند (Sahan et al., 2008). تأثیر نداشتن معنی دار لسیتین بر Gf را می توان به ماهیت عملکردی این امولسیفایر نسبت داد. لسیتین عمدتاً در سطح مشترک آب و روغن فعالیت می کند و نقش اصلی آن کاهش کشش سطحی و پایداری سازی قطره های امولسیون است (McClements et al., 2017). در واقع، لسیتین بیشتر بر پایداری فیزیکی امولسیون از طریق جلوگیری از به هم پیوستن قطره ها تأثیر می گذارد تا بر خواص الاستیک کل سیستم. این یافته با مطالعات قبلی همخوانی دارد که نشان داده اند لسیتین تأثیر قابل توجهی بر خواص رئولوژیکی حجمی سیستم های امولسیونی ندارد (Dickinson, 2009). تأثیر نداشتن معنی دار لسیتین بر Gf می تواند به این دلیل باشد که در حضور کربوکسی متیل سلولز، شبکه پلیمری تشکیل شده توسط این هیدروکلوئید عامل غالب در تعیین خواص الاستیک سیستم است. به عبارت دیگر، تأثیر ساختار سازی کربوکسی متیل سلولز به قدری قوی است که اثر احتمالی لسیتین بر خواص الاستیک را تحت الشعاع قرار می دهد (Phillips and Williams, 2009). این پدیده در سیستم های امولسیونی پایدار شده با هیدروکلوئیدها معمول است، جایی که خواص رئولوژیکی عمدتاً توسط

درصد به دست آمد. در این شرایط بهینه، پاسخ‌های رئولوژیکی به شرح زیر حاصل شدند: پایداری امولسیون ۶۶ درصد، مدول الاستیک در ناحیه خطی (G'LVE) = ۱۹۴۵۲ پاسکال، مدول افت در ناحیه خطی (G''LVE) = ۶۵۱۵ پاسکال، کرنش بحرانی (γc) = ۰/۰۰۰۲۱ درصد، تنش تسلیم (τy) = ۱۷ پاسکال، تانژانت اتلاف در ناحیه خطی (tan δ LVE) = ۰/۴۴، تنش تسلیم در نقطه جریان (τf) = ۲۵۴ پاسکال، مدول الاستیک در نقطه جریان (Gf) = ۶۰۹ پاسکال به دست آمد.

نتیجه گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که افزودن لستین و کربوکسی متیل سلولز به فرمولاسیون کره ماکادامیا به طور معنی داری بر خواص ویسکوالاستیک آن تأثیر می‌گذارد. نتایج همچنین نشان داد که تغییر غلظت این دو ترکیب می‌تواند برخی از ویژگی‌های رئولوژیکی محصول را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد. نتایج همچنین نشان داد که لستین به طور معنی داری بر پایداری امولسیون تأثیر می‌گذارد، در حالی که کربوکسی متیل سلولز به تنهایی اثر قابل توجهی بر پایداری امولسیون نشان نمی‌دهد. با افزایش غلظت لستین، پایداری امولسیون ابتدا کاهش و سپس افزایش یافت که احتمالاً ناشی از تشکیل و تقویت لایه‌های بین سطحی پایدارتر در اطراف قطره‌های روغن است. بررسی خواص رئولوژیکی نیز نشان داد که در غلظت‌های پایین لستین، افزایش کربوکسی متیل سلولز منجر به افزایش قابل توجه در G'LVE و G''LVE می‌شود. این افزایش نشان‌دهنده تشکیل شبکه‌های پلیمری قوی‌تر است. با این حال، در غلظت‌های بالای لستین، به دلیل تداخل مولکول‌های لستین با شبکه پلیمری کربوکسی متیل سلولز، این اثر کاهش می‌یابد. تنش بحرانی (τy) و کرنش بحرانی (γc) نیز تحت تأثیر این برهمکنش‌ها قرار می‌گیرند. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان داد که تنظیم غلظت لستین و

ساختار شبکه‌ای هیدروکلوئید تعیین می‌شود (Tadros, 2013).

بهینه‌یابی عددی

در بهینه‌یابی عددی کره ماکادامیا با افزودن لستین و کربوکسی متیل سلولز، انتخاب چهار پارامتر پایداری امولسیون، تنش تسلیم (τy)، تانژانت اتلاف در ناحیه خطی (tan δ LVE) و مدول الاستیک در ناحیه خطی (G'LVE) بر اساس اهمیت آنها در پایداری و کیفیت محصول نهایی صورت گرفته است. تنش تسلیم (τy) به عنوان شاخصی کلیدی، مقاومت سیستم را در برابر جریان و پایداری ساختاری نشان می‌دهد (McClements *et al.*, 2017). تانژانت اتلاف در ناحیه خطی (tan δ LVE) نسبت بین خواص ویسکوز و الاستیک را مشخص می‌کند که برای درک رفتار رئولوژیکی و پیش‌بینی پایداری امولسیون ضروری است (Tadros, 2013). مدول الاستیک در ناحیه خطی (G'LVE) نیز به عنوان معیاری از قدرت شبکه و پایداری فیزیکی سیستم عمل می‌کند و ارتباط مستقیمی با عملکرد امولسیفایرها و پایدارکننده‌ها دارد (Norton *et al.*, 2010). این پارامترها در مجموع، اطلاعات جامعی درباره ساختار، پایداری و رفتار رئولوژیکی سیستم ارائه می‌دهند که برای بهینه‌یابی فرمولاسیون ضروری است. بدین منظور برای بهینه‌یابی عددی در این پژوهش، با استفاده از مدل‌های به دست آمده برای هر پاسخ، مقادیر بهینه متغیرهای مستقل (درصد کربوکسی متیل سلولز و لستین) توسط نرم‌افزار Design Expert محاسبه شد. در این حالت با توجه به اهمیت متفاوت پارامترها، به هر یک ضریب وزنی مناسب اختصاص داده شد. در این تحقیق پایداری امولسیون، تنش تسلیم (τy)، مدول الاستیک در ناحیه خطی (G'LVE) و فاکتور افت (tan δ LVE) با هدف حداکثرسازی در نظر گرفته شدند. نقطه بهینه فرآیند با توجه به پارامترهای مذکور، غلظت کربوکسی متیل سلولز برابر با ۰/۱ درصد و غلظت لستین ۰/۱۷

کربوکسی‌متیل سلولز می‌تواند نقش مؤثری در بهبود پایداری امولسیون در وضعیت مطلوب‌تری قرار داشتند. ویژگی‌های رئولوژیکی و پایداری امولسیون در کره این یافته‌ها می‌تواند در توسعه و تولید کره ماکادامیا با ماکادامیا داشته باشد. بر اساس نتایج بهینه‌سازی، بهترین کیفیت بالاتر و پایداری بهتر به کار گرفته شود. شرایط فرمولاسیون در محدوده مورد بررسی در غلظت **تعارض منافع** ۰/۱ درصد کربوکسی‌متیل سلولز و ۰/۱۷ درصد لسیتین به نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تعارض منافع دست آمد. در این شرایط، ویژگی‌های ویسکوالاستیک و علمی یا مالی در ارتباط با این پژوهش وجود ندارد.

منابع

- Ak, M.M., Gunasekaran, S., 2001. Linear viscoelastic methods. *Nondestructive Food Evaluation: Techniques to Analyze Properties and Quality*, 287-333.
- Aruwajoye, N.N., Buthelezi, N.M.D., Mditshwa, A., Tesfay, S.Z., Magwaza, L.S., 2023. Assessing the impact of roasting temperatures on biochemical and sensory quality of macadamia nuts (*Macadamia integrifolia*). *Foods* 12, 2116.
- Balaghi, S., Mohammadifar, M.A., Zargaraan, A., Gavlighi, H.A., Mohammadi, M., 2011. Compositional analysis and rheological characterization of gum tragacanth exudates from six species of Iranian *Astragalus*. *Food Hydrocolloids* 25, 1775-1784.
- BeMiller, J.N., 2018. *Carbohydrate chemistry for food scientists*. Elsevier.
- Bernaschina, M., Leser, M.E., Limbach, H.J., Fischer, P., Roucher, A., 2024. Lentil protein stabilized emulsion-Impact of lecithin addition on emulsions properties. *Food Hydrocolloids* 147, 109337.
- Buthelezi, N.M.D., Tesfay, S.Z., Magwaza, L.S., 2021. Influence of roasting on antioxidants, fatty acids, sensory properties and oxidative stability of macadamia nuts. *Scientia Horticulturae* 278, 109850.
- Cai, W.-Q., Liu, X., Chen, W., Huang, Z., Li, C., Huang, X., Harold, C., Su, B.-L., Zhang, B.B., Yang, Q.-Q., 2023. Synergistic Effect of Lecithin and Alginate, CMC, or PVP in Stabilizing Curcumin and Its Potential Mechanism. *Food Chemistry* 413, 135634.
- Das, A.K., Nanda, P.K., Bandyopadhyay, S., Banerjee, R., Biswas, S., McClements, D.J., 2020. Application of nanoemulsion-based approaches for improving the quality and safety of muscle foods: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 19, 2677-2700.
- Dickinson, E., 2009. Hydrocolloids as emulsifiers and emulsion stabilizers. *Food hydrocolloids* 23, 1473-1482.
- Guzey, D., McClements, D.J., 2006. Formation, stability and properties of multilayer emulsions for application in the food industry. *Advances in colloid and interface science* 128, 227-248.
- Hernández-Marín, N., Lobato-Calleros, C., Vernon-Carter, E., 2013. Stability and rheology of water-in-oil-in-multiple emulsions made with protein-polysaccharide soluble complexes. *Journal of Food Engineering* 119, 181-187.
- Kashaninejad, M., Najaf Najafi, M., Ghods Rohani, M., Kashaninejad, M., 2019. Optimization of labane (concentrated yogurt) formulation produced by wheyless process using mixture-process variable experiments. *Journal of Food Processing and Preservation* 43, e14193.
- Kim, H.G., Kim, G.W., Oh, H., Yoo, S.Y., Kim, Y.O., Oh, M.S., 2011. Influence of roasting on the antioxidant activity of small black soybean (*Glycine max* L. Merrill). *LWT-Food Science and Technology* 44, 992-998.
- Liu, X., Zhu, X., Han, Z., Liu, H., 2025. Recent Advances in the Mechanisms of Quality Degradation and Control Technologies for Peanut Butter: A Literature Review. *Foods* 14, 105.

- McClements, D.J., Bai, L., Chung, C., 2017. Recent advances in the utilization of natural emulsifiers to form and stabilize emulsions. *Annual review of food science and technology* 8, 205-236.
- Mun, S., Decker, E.A., McClements, D.J., 2007. Influence of emulsifier type on in vitro digestibility of lipid droplets by pancreatic lipase. *Food Research International* 40, 770-781.
- Norton, I.T., Spyropoulos, F., Cox, P., 2010. *Practical food rheology: an interpretive approach*. John Wiley & Sons.
- Phillips, G.O., Williams, P.A., 2009. *Handbook of hydrocolloids*. Elsevier.
- Radi, M., Amiri, S., 2013. Comparison of the rheological behavior of solutions and formulated oil-in-water emulsions containing carboxymethylcellulose (CMC). *Journal of dispersion science and technology* 34, 582-589.
- Rao, M.A., 2013. *Rheology of fluid, semisolid, and solid foods: principles and applications*. Springer Science & Business Media.
- Sahan, N., Yasar, K., Hayaloglu, A., 2008. Physical, chemical and flavour quality of non-fat yogurt as affected by a β -glucan hydrocolloidal composite during storage. *Food hydrocolloids* 22, 1291-1297.
- Shakerardekani, A., Karim, R., Ghazali, H.M., Chin, N.L., 2013. Textural, rheological and sensory properties and oxidative stability of nut spreads—a review. *International journal of molecular sciences* 14, 4223-4241.
- Steffe, J.F., 1996. *Rheological methods in food process engineering*. Freeman press.
- Surh, J., Jeong, Y.G., Vladislavljević, G.T., 2008. On the preparation of lecithin-stabilized oil-in-water emulsions by multi-stage premix membrane emulsification. *Journal of Food Engineering* 89, 164-170.
- Tabilo-Munizaga, G., Barbosa-Cánovas, G.V., 2005. Rheology for the food industry. *Journal of food engineering* 67, 147-156.
- Tadros, T.F., 2013. Emulsion formation, stability, and rheology. *Emulsion formation and stability*, 1-75.
- Wang, Q., Shi, A., Shah, F., 2019. Rheology instruments for food quality evaluation. *Evaluation technologies for food quality*. Elsevier, pp. 465-490.
- Xu, Y., Zhang, R., Wang, K., Chisoro, P., Huang, F., Wang, J., Zhang, C., 2025. Effect of carboxymethyl cellulose and/or wheat gluten on the pasting, rheological and quality properties of wheat starch-based batter for deep-fried products. *Food Chemistry: X* 26, 102262.

Original Research

The Effect of Lecithin and Carboxymethyl Cellulose on the Viscoelastic Properties of Macadamia Butter

Zohre Saraie¹, Vahid Hakimzadeh^{2*}, Morteza Kashaninejad³

***Corresponding Author:** Associate Professor, Department of food science and technology, Qu. C., Islamic azad University, Quchan, Iran

Email: v.hakimzadeh@iaau.ac.ir

Received: 7 April 2025 **Accepted:** 19 June 2026

http://doi: 10.22092/fooder.2026.369083.1419

Abstract

Macadamia is an edible nut with high oil content and a desirable flavor, commonly used as a raw material for producing plant-based butters. The resulting butter is a semi-solid, oil-rich system whose quality and stability depend on its emulsion structure and rheological properties. Therefore, this study investigated the effects of lecithin (0.1–0.2%) and carboxymethyl cellulose (CMC) (0.05–0.1%) on the emulsion stability and rheological properties of macadamia butter. The results showed that the linear effect of lecithin on emulsion stability was significant at the 95% confidence level ($P < 0.05$). Increasing lecithin concentration in the presence of CMC caused a slight initial decrease followed by an increase in emulsion stability. The storage modulus (G'_{LVE}) and loss modulus (G''_{LVE}) were also significantly affected by lecithin and CMC concentrations. At low lecithin levels, increasing CMC markedly increased these moduli, indicating strengthening of the system's network structure, whereas this effect diminished at higher lecithin concentrations. Additionally, increasing CMC in the presence of low lecithin increased yield stress (τ_y) and critical strain (γ_c), indicating greater structural resistance to deformation. Furthermore, the loss tangent in the linear viscoelastic region ($\tan \delta_{LVE}$) increased with lecithin concentration but decreased with increasing CMC, reflecting changes in the balance between viscous and elastic behavior. Optimization results indicated that the best formulation consisted of 0.17% lecithin and 0.1% CMC, under which emulsion stability and viscoelastic properties were optimized. These findings suggest that the simultaneous use of lecithin and CMC at appropriate levels can improve the structure and stability of macadamia butter.

Keywords: Macadamia butter, Lecithin, Carboxymethyl cellulose, Storage modulus, Loss modulus, Yield stress