

## بررسی تأثیر پارامترهای کریستالیزاسیون بر خواص رئولوژیکی سورتنینگ‌های تولیدشده بر پایه اینتراستریفیکاسیون

مهناز عاملی<sup>۱</sup>، لیلا روفه‌گری نژاد<sup>۲</sup>، عزیز الله زرگران<sup>۳</sup>، فرید زایری<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، ایران

۲- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، ایران

۳- نویسنده مسئول: استادیار گروه سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی غذا و تغذیه، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، انستیتو تحقیقات تغذیه‌ای و صنایع غذایی کشور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. پست الکترونیکی: zargaran@sbmu.ac.ir

۴- استاد مرکز تحقیقات پروتومیکس، گروه آمار زیستی، دانشکده پیراپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۷/۱۸

### چکیده

**سابقه و هدف:** یکی از چالش‌های صنعت روغن و چربی، تولید سورتنینگ‌هایی با ویژگی‌های عملکردی خاص و مورد نظر صنایع مختلف است. ویژگی‌های رئولوژیک سورتنینگ‌ها به طور مستقیم با میزان کارایی آن‌ها در ارتباط است، هدف اصلی پژوهش حاضر، مطالعه و بررسی تأثیرات برخی از پارامترهای اصلی کریستالیزاسیون بر خواص رئولوژیکی سورتنینگ‌های تولید شده بر پایه اینتراستریفیکاسیون شیمیایی بود.

**مواد و روش‌ها:** ویژگی‌های رئولوژیک نوسانی ۵ تیمار شورتنینگ که در تهیه آنها پارامترهای کریستالیزاسیون متفاوتی به کار گرفته شده بود به دست آمد. بدین منظور، اثر نرخ سرمایش و شدت ورز دادن که از مهم‌ترین متغیرهای کریستالیزا سیون هستند بر مدول الاستیک (G') و ویسکوز (G") نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت.

**یافته‌ها:** در آزمون روبش فرکانس و در بازه فرکانس ۰/۶۲۸-۱۲۶ rad/s بیشینه و کمینه مدول الاستیک به ترتیب مربوط به تیمارهای ۴ و ۱ با دمای خروجی شورتنینگ سرمایش "۳" ۲۸ و ۲۹/۵ درجه سانتی‌گراد، شدت ورز دادن خمیر "۲" ۱۹۰ و ۲۸۰ دور بر دقیقه و دمای پر کردن ۳۶ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد بود. همین نتایج در مورد مدول افت مشاهده شد.

**نتیجه گیری:** یافته‌های به دست آمده نشان داد به طور مشخص با کاهش سرمایش در مرحله سوم و افزایش شدت ورز دادن و کاهش دمای پر شدن، هر دو مدول، کاهش می‌یابند و با توجه به داده‌های به دست آمده شرایط مذکور موجب کاهش قدرت ساختاری سورتنینگ‌های تولیدی شد.

**وازگان کلیدی:** رئولوژی، کریستالیزاسیون، مدول الاستیک (G') و مدول ویسکوز (G")

### • مقدمه

شورتنینگ‌ها معمولاً شامل مخلوطی از روغن‌ها و چربی‌های غیرهیدروژنه، بخشی هیدروژنه، امولسیفایرها و سایر افزودنی‌ها هستند. روغن‌های متدالوی مورد استفاده در تولید شورتنینگ‌ها عبارتند از روغن کانولا، پنبه دانه، پالم و سویا.

همان طور که انتظار می‌رود درک تأثیرات ترکیبات مولکولی، شرایط فرآیندی، افزودنی‌ها و امولسیفایرها بر خواص عملکردی به صورت همزمان کار ساده‌ای نیست (۶، ۵).

شورتنینگ‌ها در حقیقت چربی‌هایی هستند که به نحوی فرموله شده و مورد فرآوری قرار می‌گیرند تا شکلی مانند مواد نیمه پلاستیک پیدا کنند. امروزه، شورتنینگ‌ها در کاربردهای متعددی مانند پخت، سرخ کردن، محصولات لبنی حاوی چربی‌های گیاهی و... استفاده شده‌اند. رفتار کریستالیزاسیونی و دامنه ذوب متفاوت به معنی ساختار، پایداری و خواص حسی متفاوت است (۴-۱).

رئولوژی شاخه‌ای از علم فیزیک بوده که رفتار شکل‌پذیری و جریان یافتن مواد را تو صیف می‌کند. به بیان دیگر، رئومتری عبارت است از فناوری اندازه‌گیری ویژگی‌های رئولوژیکی ۱۹-۱۷). ویژگی‌های رئولوژیکی و بافتی سورتنینگ‌ها و مارگارین‌های پخت و قنادی به طور مستقیم جنبه‌های کیفی، ظاهری، حسی و بافتی محصولات پخته شده نهایی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۲۰، ۲۱). بر اساس مطالعه‌ای که میزان کارایی سورتنینگ را به عنوان تابعی از ترکیب مولکولی و تنش برشی بررسی کرده است، رفتار کریستالیزاسیونی و ذوب سیستم‌های سورتنینگ به طور محسوسی وابسته به مقدار تری‌گلیسریدهایی است که شامل اسیدهای چرب خاصی هستند (۵). با عنایت به موارد مذکور، هدف پژوهش حاضر، بررسی تأثیر رژیم کریستالیزاسیون بر ویژگی‌های رئولوژیک سورتنینگ بود. در این پژوهش، اثر فاکتورهای نرخ سرمایش، شدت اختلاط و وزن دادن و همچنین دمای پر شدن بر مدول الاستیک (G') و ویسکوز ("G") مورد مطالعه قرار گرفت.

## • مواد و روش‌ها

محصول سورتنینگ تجاری چند منظوره به دلیل دامنه کاربرد وسیع و مصرف گسترده به منظور مطالعه در پژوهش حاضر انتخاب شد. در فرمول محصول انتخابی از مخلوط چربی اینتراستریفیه شده به روش شیمیایی استفاده شده بود. روغن‌ها و چربی‌های مورد استفاده عبارت بودند از کانولا، پالم، اولئین، و آفتابگردان کاملاً هیدروژن‌ه شده. فرمول سورتنینگ مذکور حاوی ۳۳ درصد روغن اینتراستریفیه بود.

به دلیل پاره‌ای از محدودیتهای فنی، ۵ تیمار انتخاب شد. در تیمارهای انتخابی به منظور پرهیز از افزایش غیر منطقی تعداد آزمایشات، فاکتورهای فرایند کریستالیزاسیون مورد مطالعه به سه مورد اصلی شامل نرخ سرمایش، شدت اختلاط و وزن دادن و همچنین دمای پر شدن محدود شدند.

آرایش کریستالیزاسیون به کار رفته شامل ۴ واحد سرمایش و همچنین ۴ واحد مخصوص وزن دادن مطابق شکل ۱ بود. نمونه‌های سورتنینگ مورد مطالعه تو سط کریستالایزر گشتنبرگ (Gerstenberg and Agger) ساخت کشور دانمارک تهیه شدند. سیستم مذکور شامل تانک ذوب، ۴ واحد مستقل سرمایش و واحدهای مخصوص وزن دادن بود. جدول ۱ پارامترهای کریستالیزاسیون تیمارهای به کار گرفته شده را نمایش می‌دهد. دمای مخلوط روغن ورودی به سیستم مذکور ثابت و  $1\pm65^{\circ}\text{C}$  در نظر گرفته شد.

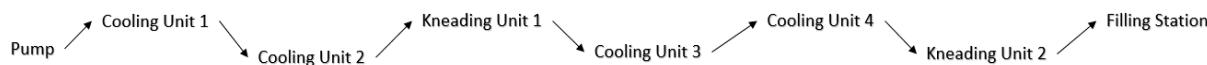
روغن‌ها و چربی‌ها به منظور ایجاد تغییرات دلخواه در خواص فیزیکی که خود تابعی از طول اسیدهای چرب، میزان اشباع بودن و چگونگی توزیع آن‌ها در مولکول‌های تری‌گلیسرید هستند، مورد فرآوری قرار گرفتند (۱۱-۱۷). چربی‌های گیاهی پلاستیکی تغییر یافته به صورت متداول از ترکیبات کلیدی مارگارین‌ها و سایر چربی‌های تخصصی مانند انواع سورتنینگ‌ها هستند. این نکته که ویژگی‌های جامد‌گونه چربی‌های شکل‌پذیر به علت وجود شبکه کریستالی چربی است، کاملاً به اثبات رسیده است (۱۲). سورتنینگ‌های قنادی دارای قابلیت ایجاد بافت، تردی و طعم مطلوب در محصولات پخته شده هستند (۱۳). ایجاد بافت مناسب در سورتنینگ‌ها به منظور بهبود خاصیت شکل‌پذیری به طور معمول، تو سط فرایندهای کریستالیزا سیون (در آن چربی ذوب شده در حین سرمایش، ورز نیز داده می‌شود) ایجاد می‌شود.

کریستالیزاسیون تحت تنش برشی باعث بهبود خواص شکل‌پذیری و بافتی مخلوط چربی و روغن شده و همچنین موجب می‌شود گرمای ناشی از کریستالیزا سیون نیز از توده محصول گرفته شود (۱۴-۱۶). از طریق تغییر در شرایط تعداد، اندازه و شکل عناصر ریزساختار شامل توزیع فضایی، کریستالیزاسیون، ماهیت شبکه کریستالی شامل توزیع فضایی، دست یابی به بافت و کارایی مناسب در سورتنینگ‌ها تو سط فرایندهای اصلاح مانند هیدروژناسیون، جزء به جزء کردن، مخلوط کردن و اینتراستریفیکاسیون آنزیمی و شیمیایی چربی‌ها و روغن‌ها ایجاد می‌شود (۱۳). در نتیجه هیدروژناسیون اسیدهای چرب در روغن‌های خوراکی، روغن‌های مایع به چربی‌های جامد یا نیمه جامد تبدیل می‌شوند (۱۷).

ارتباط بین پارامترهای فرایند کریستالیزاسیون و ویژگی‌های عملکردی و رئولوژیک چربی‌های ساختار یافته‌ای مانند سورتنینگ‌های قنادی و پخت، یکی از موضوعات مهم و مساله برانگیز در صنعت روغن‌ها و چربی‌ها است. یکی از مهم‌ترین چالشهای موجود در این زمینه، فقدان خطوط پایلوت جهت اعمال متغیرهای کریستالیزاسیون به صورت کنترل شده است و واحدهای صنعتی بسیار اندکی وجود دارند که دارای چنین خطوطی باشند. نکته بسیار مهم در این میان این است که حتی با وجود داشتن خطوط پایلوت، امکان تعمیم نتایج به دست آمده در مطالعات پایلوت، به محصول خروجی از خط تولید با دقت مناسب وجود ندارد. دلیل این امر نیز تغییر شرایط انتقال حرارت و ایجاد برخی حافظه‌های کریستالی در اثر تغییر سایز دستگاه‌ها و تفاوت در برخی فرایندها است.

جدول ۱. تیمارهای کریستالیزاسیون

تیمارهای کریستالیزاسیون	(درجه سانتی گراد)	دماهای خروجی شورتنینگ سرمایش ۳ (درجه سانتی گراد)	شدت ورز دادن خمیر در واحد ۲ (دور بر دقیقه)	دماهای پرکردن (درجه سانتی گراد)
تیمار ۱		۲۹/۵	۲۸۰	۳۰
تیمار ۲		۳۱	۲۸۰	۳۳
تیمار ۳		۲۹/۵	۱۰۰	۳۰
تیمار ۴		۲۸	۱۹۰	۳۶
تیمار ۵		۲۸	۱۹۰	۳۰



شکل ۱. آرایش واحدهای سرمایش و ورز دادن فرایند کریستالیزاسیون

به منظور مقایسه میانگین‌ها از آزمون آنالیز واریانس و آزمون تعقیبی دان肯 استفاده شد. کلیه تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ انجام شد و مقادیر  $P < 0.05$  معنی‌دار تلقی گردید.

#### ۰ یافته‌ها

شکل ۲ رئوگرام‌های آزمون روبش کرنش مربوط به تیمارهای کریستالیزاسیون را نمایش می‌دهد. در ارتباط با ضریب الاستیک، در تمامی منحنی‌ها؛ دو ناحیه متمایز قابل تشخیص بود: یک ناحیه کوچک‌تر که در آن مقادیر مدول الاستیک تقریباً ثابت بود و همچنین ناحیه‌ای بزرگ‌تر که در آن مقادیر مدول مذکور با افزایش درصد کرنش با نرخی فزاینده کاهش یافت.

در کرنش‌های کمتر، مقادیر مدول الاستیک به نحو محسوسی بزرگ‌تر از مقادیر مدول ویسکوز بود، در حالی که با افزایش درصدهای کرنش، مقادیر مدول ویسکوز در نهایت از مقادیر مدول الاستیک پیشی گرفت. به این علت که در همه موارد، قبل از نقطه تلاقي؛ مقادیر مدول الاستیک بیشتر از مقادیر مدول ویسکوز بود می‌توان نتیجه گرفت در ناحیه خطی ویسکوالاستیک، تمامی نمونه‌های شورتنینگ دارای رفتاری شبیه جامد بودند. در حالی که در کرنش‌های بزرگ‌تر، نمونه‌های شورتنینگ مرتبط به تیمارهای کریستالیزاسیون، رفتاری شبیه مایع داشتند. این نوع رفتار کاملاً مورد انتظار بوده و طبیعی به نظر می‌رسد. پارامترهای روبش کرنش مربوط به ۵ تیمار مد نظر در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

در مطالعه تو صیفی حاضر، داده‌های مربوطه در آزمایشگاه رئولوژی ادستیتو تحقیقات تغذیه‌ای و صنایع غذایی کشور به دست آمد. اندازه‌گیری پارامترهای رئولوژیکی توسط رئومتر Physica MCR 301 (ساخت شرکت Anton-Paar اتریش) انجام شد. کنترل دما توسط سیستم Peltier مجهز به سیرکولاتور سیال انجام شد. آزمون‌های رئولوژیک در دمای متداول کارگاه‌های قنادی یعنی  $25^{\circ}\text{C}$  انجام گرفت.

در مورد همه نمونه‌ها، رئومتر صفحات موازی (PP40/S) در SN 16891؛  $d=2\text{ mm}$  مورد استفاده قرار گرفت. به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم افزار رئوپلاس (نسخه ۳/۲) شرکت Anton Paar استفاده شد. آزمون‌های روبش کرنش در سرعت زاویه‌ای  $6/28\text{ rad/s}$  در فاصله کرنش‌های بین  $0/001$  تا  $500$  درصد به منظور یافتن ناحیه خطی ویسکوالاستیک (Lve) اجرا شدند.

به منظور دست‌یابی به نسبت حالت شبیه مایع یا شبیه جامد نمونه‌ها به حالت جامد مانند آنها، تانژانت افت (loss tangent) که حاصل تقسیم مدول ویسکوز به مدول الاستیک است نیز در محدوده مربوط به ناحیه خطی ویسکوالاستیک محاسبه شد. نقاط مربوط به محل تلاقي منحنی‌های ضرایب الاستیک به ویسکوز ( $G''=G'$ ) نیز تعیین شدند. آزمون‌های روبش فرکانس در محدوده  $0/0628\text{ rad/s}$  تا  $126\text{ rad/s}$  انجام شد. ضرایب ویسکوز و الاستیک در سه سرعت زاویه‌ای  $6/28\text{ rad/s}$ ،  $3/31\text{ rad/s}$  و  $0/0628\text{ rad/s}$  به عنوان نماینده فرکانس‌های کمینه، میانی و بیشینه اندازه‌گیری و بررسی شدند.

## جدول ۲. پارامترهای روش کرنش مربوط به ۵ تیمار کریستالیزاسیون در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

G <sub>f</sub> (Pa)	$\tan \delta_{Lve}$	$\gamma$ (%)	تیمارهای کریستالیزاسیون
$380/24 \pm 19/636^d$	$0/10 \pm 0/005^{bc}$	$0/05 \pm 0/003^c$	تیمار ۱
$2148/12 \pm 97/613^b$	$0/06 \pm 0/048^c$	$0/06 \pm 0/003^c$	تیمار ۲
$1134/58 \pm 76/792^c$	$0/18 \pm 0/13^a$	$0/29 \pm 0/018^a$	تیمار ۳
$2138/98 \pm 677/345^b$	$0/13 \pm 0/006^{bc}$	$0/10 \pm 0/003^b$	تیمار ۴
$2805/39 \pm 138/004^a$	$0/12 \pm 0/006^b$	$0/06 \pm 0/002^c$	تیمار ۵

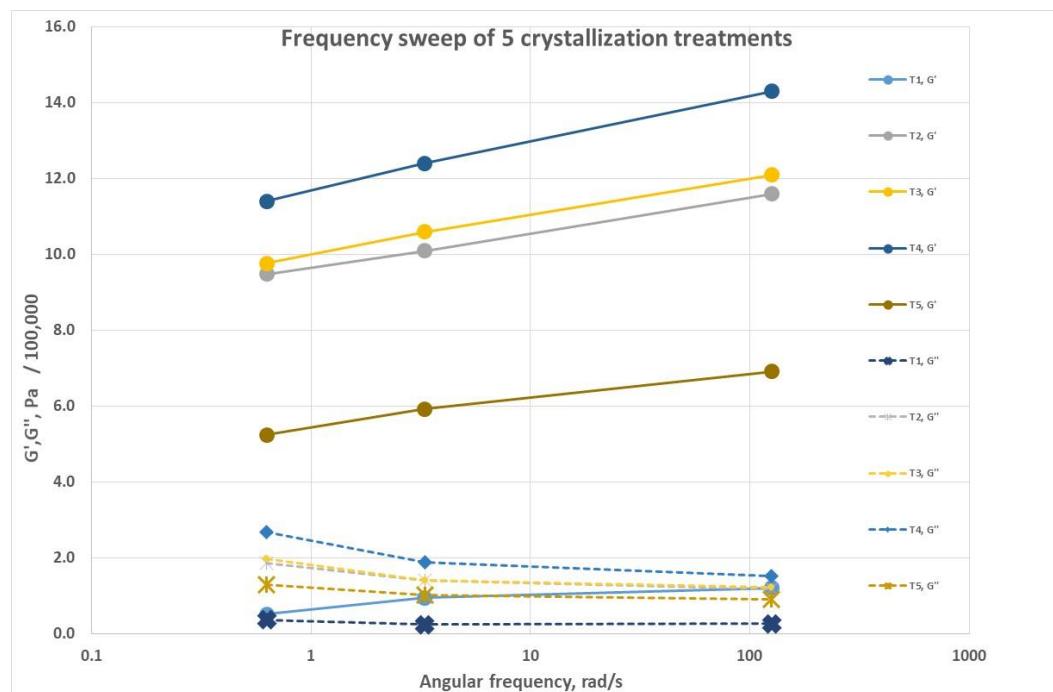
(انحراف استاندارد  $\pm$  میانگین مقدار اندازه‌گیری شده، مقادیر مشخص شده با حروف متفاوت دارای اختلاف آماری معنی دار هستند،  $P < 0.05$ )

آزمایشات رئولوژیکی در دمای ذکر شده انجام شدند، شامل ناحیه ویسکوالاستیک خطی یا Lve (٪)، فاکتور افت در انتهای ناحیه خطی ویسکوالاستیک ( $\tan \delta_{Lve}$ ) و نقاط تلاقي (G''=G')

شده است. در جدول ۳ ضرایب ویسکوز و الاستیک مربوط به ۵ تیمار کریستالیزاسیون مربوطه در سه سرعت زاویه‌ای rad/s  $0/0628$ ،  $3/31$  rad/s و  $126$  rad/s ارائه شده است. بیشینه و کمینه ضریب الاستیک به ترتیب مربوط به تیمارهای ۴ (۱۲۶) و ۱ ( $0/0628$  rad/s) بود. به طور مشابه، بیشترین و کمترین مقادیر ضریب ویسکوز به ترتیب در نتیجه تیمارهای کریستالیزاسیون ۴ ( $0/0628$  rad/s) و ۱ ( $3/31$  rad/s) حاصل شد. در مورد فاکتور افت، تیمار کریستالیزاسیون شماره ۱ منجر به ایجاد بیشترین مقدار در سرعت زاویه‌ای rad/s  $0/0628$  شد.

بیشینه فاکتور افت در پایان ناحیه ویسکوالاستیک ( $\tan \delta_{Lve}$ ) که توصیف‌کننده نسبت مدولهای رئولوژیک مذکور است (نسبت مدول ویسکوز به الاستیک) در تیمار کریستالیزاسیونی شماره ۳ مشاهده شد. در مقابل، تیمار کریستالیزاسیونی شماره ۲ منجر به بروز کمترین مقدار فاکتور الاستیک و ویسکوز مربوط به نقاط تلاقي در تیمارهای شماره ۱ و ۳ دیده شد. در نهایت، بیشترین مقدار دامنه ناحیه ویسکوالاستیک در نتیجه تیمار کریستالیزاسیونی را شماره ۳ ایجاد گردید.

با توجه به نتایج روش کرنش، آزمون‌های روش فرکانس نیز انجام شد که طیف‌های مربوطه در شکل ۳ نمایش داده



شکل ۳. رئوگرام روش فرکانس ۵ تیمار کریستالیزاسیون

جدول ۳. پارامترهای روش فرکانس در ۵ تیمار کریستالیزاسیون

تیمارهای کریستالیزاسیون	مدول الاستیک G' (Pa)/100000						مدول ویسکوز G''/G, tan δ			فاکتور افت G''/G, tan δ
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	
تیمار ۱	۰/۹±۰/۲۶ <sup>c</sup>	۰/۳±۰/۰۱ <sup>a</sup>	۰/۲±۰/۰۶ <sup>a</sup>	۰/۴±۰/۰۱ <sup>d</sup>	۰/۲±۰/۰۱ <sup>d</sup>	۰/۳±۰/۰۱ <sup>d</sup>	۰/۵±۰/۱۱ <sup>d</sup>	۰/۹±۰/۲۶ <sup>c</sup>	۱/۲±۰/۰۳ <sup>d</sup>	۰/۰۶۲۸
تیمار ۲	۰/۱±۰/۰۳ <sup>c</sup>	۰/۱±۰/۰۳ <sup>b</sup>	۱/۹±۰/۰۹ <sup>b</sup>	۱/۴±۰/۰۶ <sup>b</sup>	۱/۲±۰/۰۳ <sup>b</sup>	۹/۶±۰/۲۳ <sup>b</sup>	۱۰/۳±۰/۲۹ <sup>c</sup>	۱۱/۸±۰/۳۳ <sup>b</sup>	۰/۰۶۲۸	
تیمار ۳	۰/۱±۰/۰۵ <sup>c</sup>	۰/۱±۰/۰۳ <sup>b</sup>	۲/۰±۰/۰۶ <sup>b</sup>	۱/۴±۰/۰۴ <sup>b</sup>	۱/۲±۰/۰۳ <sup>b</sup>	۹/۹±۰/۲۳ <sup>b</sup>	۱۰/۸±۰/۳۱ <sup>b</sup>	۱۲/۳±۰/۳۵ <sup>b</sup>	۰/۰۶۲۸	
تیمار ۴	۰/۰۲±۰/۰۶ <sup>b</sup>	۰/۰۲±۰/۰۲ <sup>b</sup>	۰/۱±۰/۰۳ <sup>b</sup>	۲/۴±۰/۰۹ <sup>a</sup>	۱/۹±۰/۰۵ <sup>a</sup>	۱/۵±۰/۰۶ <sup>a</sup>	۱۱/۵±۰/۲۶ <sup>a</sup>	۱۲/۶±۰/۳۶ <sup>a</sup>	۱/۴/۵±۰/۴۱ <sup>a</sup>	
تیمار ۵	۰/۰۲±۰/۰۴ <sup>b</sup>	۰/۰۲±۰/۰۱ <sup>b</sup>	۰/۱±۰/۰۱ <sup>b</sup>	۱/۳±۰/۰۴ <sup>c</sup>	۱/۰±۰/۰۳ <sup>c</sup>	۰/۹±۰/۰۳ <sup>c</sup>	۵/۳±۰/۱۲ <sup>c</sup>	۶/۰±۰/۱۷ <sup>d</sup>	۶/۰±۱/۰۳ <sup>c</sup>	

(انحراف استاندارد  $\pm$  میانگین مقدار اندازه گیری شده، مقادیر مشخص شده با حروف متفاوت دارای اختلاف آماری معنی دار هستند،  $P < 0.05$ )

ضرایب الاستیک (G', Pa) و ویسکوز (G'', Pa) هر تیمار در سه سرعت زاویه‌ای پایین (۰/۰۶۲۸ rad/s)، میانه (۰/۰۶۲۸ rad/s) و بالا (۱/۲ rad/s) مورد اندازه گیری قرار شد.

دیگر استفاده می‌شوند، کمی پیچیده تر خواهد بود. با توجه به تجربیات نویسنندگان مقاله در مطالعات پیشین در حوزه انتخاب آزمون‌های رئولوژی مناسب ویژه شورتنینگ‌های مدل تولید شده در محیط‌های آزمایشگاهی، نتایج مطالعه حاضر نشان داد استفاده از آزمون‌های رئولوژی نوسانی که می‌توانند مولفه‌های ویسکوز و الاستیک یک شورتنینگ تولید شده در خط تولید را به تفکیک بیان کنند به خوبی می‌توانند تفاوت‌های ایجاد شده در تغییرات ترکیبی دما-ورز داد را در فرآیند تولید شورتنینگ‌ها بیان کنند.

یکی از مهم ترین معضلات تولید کنندگان شورتنینگ‌ها، ترجیح نیازهای مصرف کنندگان از ویژگی‌های بافتی شورتنینگ‌ها و انتظارات عملکردی آنها است. از سوی دیگر، در بسیاری از واحدهای تولید کننده شورتنینگ، روش‌های آزمایشگاهی مناسب و به ویژه استفاده از رئومتر مرسوم نیست و عموماً آزمایشات تجربی با قابلیت تکرارپذیری بسیار پایین به منظور ارزیابی بافت محصول نهایی انجام می‌گیرد. لذا با تفکیک این ویژگی‌ها به دومولفه ویسکوز که نمادی از فاز مایع و مؤلفه الاستیک که نمادی از فاز جامد در محصول است در آزمون‌های روش کرنش و روش فرکانس، می‌توان در گام اول، با دقت بیشتری به نیازهای خاص صنایع مختلف مصرف کننده شورتنینگ پاسخ داد و در گام دوم نیز می‌توان با بهینه سازی فرآیندهای تولید، کیفیت مورد نظر را با کارایی، قیمت و مواد اولیه مناسب در اختیار مصرف کنندگان قرار داد. همچنین با توجه به گستره مورد استفاده از شورتنینگ‌ها در محصولات غذایی در ایران که از یک سو در تولید محصولی مانند خامه قنادی شیرین شده (مینارین) و از سوی دیگر در محصولات دارای پخت مانند انواع کیک، کلوچه و بی‌سکوت استفاده می‌شوند، تأثیر مهم دما در عملکرد نهایی شورتنینگ‌ها در محصولات قابل اشاره با استفاده از ترکیب آزمون‌های انجام

## • بحث

در پژوهش حاضر، متغیر دمای خروجی شورتنینگ در سرماشی ۳ و دمای پرکردن شورتنینگ در بسته بندی، ماهیتی از جنس دما داشتند. متغیر دیگر، یعنی شدت ورز دادن خمیر در واحد ۲ مربوط به فرایند ورز دادن ماهیتی از جنس کار مکانیکی داشت. توجه به این نکته ضروری است که در مرحله ورز دادن فرایندهای تولید شورتنینگ‌ها و مارگارین‌ها، به دلیل ماهیت مکانیکی فرایند و اعمال انرژی و همچنین به دلیل ادامه و پیشرفت کریستالیزاسیون که واکنشی گرمایز است، دمای شورتنینگ تا چند درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ۳ پارامتر کریستالیزا سیون مورد برابر سی دارای اثرات متقابل بر یکدیگر هستند.

با مقایسه مقادیر ۳ فاکتور کریستالیزاسیون و نتایج مربوط به مدل‌های رئولوژیک الاستیک و ویسکوز مشاهده می‌شود پارامترهای مربوط به تیمار ۱ منجر به کمترین مقادیر مدل‌های مد نظر شد. در مقابله با مقادیر پارامترهای کریستالیزا سیون تیمارهای ۳ و ۴ منجر به مقادیر بیشینه هر دو مدل مورد مطالعه گردید. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت شدت‌های سرماشی کمتر در مرحله سوم سرماشی، و ورز دادن با شدت‌های بالاتر و دمای‌های پر شدن پایین‌تر به معنی حصول به مقادیر کمینه مدل‌های الاستیک و ویسکوز بوده است. لازم به ذکر است معنی داری اختلاف میانگین‌های ارائه شده در جدول مشخص شده است.

در بررسی اثر تغییر فرآیند یا فرمولاسیون بر بررسی ویژگی‌های رئولوژیک محصولات غذایی می‌توان از آزمون‌های مختلف در محدوده های مختلف دمایی استفاده نمود. این موضوع در برخی محصولات مانند شورتنینگ‌ها که خود محصول نهایی نیستند و به عنوان ماده اولیه تولید محصولات

ویسکوالاستیک ضعیف حاصل شد (۲۴). در تحقیق حاضر نیز با افزایش فرکانس رفتار رئولوژیکی نمونه‌های شورتنینگ مورد بررسی از حالت جامد ویسکوالاستیک به حالتی مایع گونه تغییر یافت.

Stapley و همکاران در سال ۱۹۹۹ به بررسی تأثیرات فاکتورهای دما و تنش بر شری در خواص کریستالیزاسیونی شکلات پرداختند. مشابه تحقیق جاری نشان داده شد که سوابق تنش بر شری و دما هنگام جامد سازی شکلات دارای تأثیرات بسیار محسوسی در ساختار کریستالیزا سیونی، پلی مورفیسم و بافت محصول نهایی دارد (۲۵). به همین دلیل در تحقیق جاری، به طور خاص تأثیر شرایط و پارامترهای اصلی کریستالیزاسیون بر یکی از خواص مرتبط با ویژگی‌های عملکردی یعنی خواص رئولوژیکی به عنوان هدف اصلی انتخاب شده است. در این بررسی نشان داده شد که مدول‌های رئولوژیکی الاستیک ( $G'$ ) و ویسکوز ( $G''$ ) مربوط به یک ترکیب ثابت روغن و چربی به نحو قابل ملاحظه‌ای در اثر تغییر پارامترهای کریستالیزاسیون تحت تأثیر قرار می‌گیرند. هر دو مدول مذکور با اینکه دارای مفاهیم رئولوژیکی متفاوتی هستند به صورتی کاملاً مشابه در اثر اعمال تغییرات در شرایط اصلی کریستالیزا سیون تغییر کردند. این نکته که در تمام تیمارهای کریستالیزاسیون ترکیب مخلوط چربی‌ها و روغن‌ها (فرمول‌ا سیون) مورد استفاده تغییر نکرده است، نشان دهنده اهمیت و جایگاه آرایش و پارامترهای فرایند کریستالیزاسیون در حصول به خواص کاربردی و رئولوژیکی دلخواه و مطلوب است. درک بهتر و شفافتر رابطه بین پارامترهای کریستالیزاسیون و فاکتورهای رئولوژیک (از جمله مدول‌های الاستیک و ویسکوز) اقدامی تأثیر گذار در راستای دستیابی به دانش و مهارت مورد نیاز به منظور تولید شورتنینگ‌هایی است که در کاربردهای مربوطه دارای عملکرد مورد انتظار باشند.

بر اساس روش متدائل در کارخانجات تولیدکننده محصولات شورتنینگ و مارگارین استفاده از نتایج مطالعات رئولوژیک با توجه به نوع خاص تولید و همچنین ویژگی‌های محصولات نهایی که شورتنینگ‌ها در آن‌ها استفاده می‌شوند، از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به گستردگی فاکتورهای مختلف در مطالعات رئولوژیک و همچنین امکان انجام آزمون‌های متفاوت رئولوژیک، کشف نحوه ارتباط این فاکتورها با خواص عملکردی شورتنینگ‌ها و مارگارین‌ها از جمله میزان استحکام بافت، شکل پذیری (پلاستیسیته)، میزان چسبندگی و یکنواختی بافت و همچنین تاثیر آن بر ویژگی‌های کیفی محصول نهایی حاوی شورتنینگ مانند

شده در این پژوهش و همچنین آزمون‌های رمپ دمایی با توجه به کارکرد نهایی شورتنینگ، قابل مشاهده خواهد بود و با تفکیک مولفه‌های ویسکوز و الاستیک به دست آمد، پایش دقیق، علمی و تکرار پذیر ویژگی‌های بافتی شورتنینگ و محصول نهایی امکان پذیر خواهد بود.

یکی از محدودیت‌های مطالعه حاضر که خود بخشی از انگیزه انجام این پژوهش بود، فقدان مطالعات در حوزه تغییر در متغیرهای کریستالیزا سیون و بررسی اثر آن بر ویژگی‌های شورتنینگ‌ها بود. با بررسی‌های انجام شده مشخص شد بیشتر مطالعات مشابه متصرکز بر تأثیر دمای نگهداری یا سرمایش بر رفتار کریستالیزا سیون چربی‌های مشتق از شیر است و بنا بر جستجوهای انجام شده، مطالعه خاصی در زمینه بررسی فاکتورهای کریستالیزاسیون بر خواص کاربردی و رئولوژیکی شورتنینگ‌ها و مارگارین‌ها یافت نشد.

John Foley و همکاران در تحقیقی در سال ۱۹۸۴ به بررسی تأثیر دمای سرمایش به رفتار کریستالیزا سیونی چربی شیر پرداختند. در این مطالعه نشان داده شد که چربی شیر در دماهای بالای ۴۰ درجه سانتی‌گراد دارای رفتار رئولوژیکی مشابه مایعات بود. نکته جالب اینکه در در دماهای کمتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد، چربی شیر دارای رفتار رئولوژیکی مشابه چربی‌های پلاستیک بود. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر دماهای پرکردن بالاتر یعنی ۳۶ درجه سانتی‌گراد، مدول الاستیک دارای مقادیر بالاتری است، می‌توان نتیجه گرفت نتایج تحقیق مذکور و فعلی به نوعی هم راستا هستند (۲۲). منحنی‌های روش کرنش مربوط به پارامترهای رئولوژیکی از جمله مدول‌های الاستیک و ویسکوز ( $G'$  و  $G''$ ، زاویه تغییر شیفت ( $\delta$ ) شورتنینگ چند منظوره که در دو حالت (با و بدون استفاده از امواج فرا صوت) کریستاله شده بودند در مطالعه‌ای مشابه توسط Juhee Lee و همکاران در سال ۲۰۲۰ مورد مطالعه قرار گرفت که در برگیرنده پروفایل‌های  $G'$  و  $G''$  م شباهی بعد از ۶۰ دقیقه فرایند کریستالیزا سیون و نگهداری در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  بود (۲۳). رفتار مشابه پروفایل‌های  $G'$  و  $G''$  مطابق با نتایج تحقیق فعلی است.

Bell و همکاران در سال ۲۰۰۵ در پژوهشی دیگر اعلام نمودند که هنگام کریستالیزاسیون، چربی‌ها از حالت جامد ویسکوالاستیک ضعیف به حالت مایع ویسکوالاستیک ضعیف تبدیل می‌شوند. در پژوهش مذکور، به نظر می‌رسید که در ابتدا ویژگی‌های رئولوژیک، تحت تأثیر تعداد محدودی کریستال‌های بزرگ بود ولی در اثر ادامه ورز دادن و اختلاط به دلیل ماهیت لغزندگی بین کریستال‌ها، رفتار شبیه مایع

## سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت‌های شرکت مارگارین در فراهم آوردن امکان انجام این پژوهش قدردانی می‌گردد.

محصولات فنادی می‌تواند زمینه ساز تولید محصولات با کیفیت ثابت شود. مطالعات بیشتری در این زمینه از جمله ترکیب دادهای ارزیابی حسی، رئولوژی و کریستال مورفولوژی به منظور تعیین دقیق پارامترهای دخیل در ویژگی‌های بافتی شورتنینگ‌ها و اثرگذاری ترکیبی آنها مورد نیاز است.

## ● References

1. Ghotra BS, Dyal SD, Narine SS. Lipid shortenings: A review. *Food Res Int.* 2002;35(10):1015–48.
2. Tourchi Rudsari M, Najafian L, Shahidi SA. Effect of chemical interesterification on the physicochemical characteristics of bakery shortening produced from palm stearin and Ardeh oil (*Sesamum indicum*) blends. *J Food Process Preserv.* 2019;43(10):1–14.
3. Richard DO. *Fats & Oils: Formulating and Processing for Applications*. 2009. 680 p.
4. Nguyen V, Rimaux T, Truong V, Dewettinck K, Van Bockstaele F. Granular Crystals in Palm Oil Based Shortening/Margarine: A Review. *Cryst Growth Des.* 2020;20(2):1363–72.
5. Humphrey KL, Narine SS. A comparison of lipid shortening functionality as a function of molecular ensemble and shear: Crystallization and melting. *Food Res Int.* 2004;37(1):11–27.
6. Shahidi F. Bailey's Industrial Oil and Fat Products [Internet]. Shahidi F, editor. Vols. 1–6, Bailey's Industrial Oil and Fat Products. Wiley; 2005. 1–3686 p. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/047167849X>
7. Bariwere Samuel C, Joy E-E, David Barine K-K. Effect of Chemical Interesterification on the Physicochemical Characteristics and Fatty Acid Profile of Bakery Shortening Produced from Shea Butter and Fluted Pumpkin Seed Oil Blend. *Am J Food Sci Technol.* 2018;6(4):187–94.
8. Gioielli, L.A., Silva, R.C., Soares, F.A.S.M., Silva, K.G. and G. Structured lipids obtained by chemical interesterification of olive oil and palm stearin. *LWT-Food Sci Technol.* 2010;752–8.
9. Humphrey KL, Moquin PHL, Narine SS. Phase Behavior of a Binary Lipid Shortening System: From Molecules to Rheology. *JAOCs, J Am Oil Chem Soc.* 2003;80(12):1175–82.
10. R.J. HAMILTON. *Developments in Oils and Fats. Developments in Oils and Fats*. 1995.
11. List GR, King JW. *Hydrogenation of Fats and Oils: Theory and Practice*: Second Edition. *Hydrogenation of Fats and Oils: Theory and Practice*: Second Edition. 2010.
12. Nguyen V, Rimaux T, Truong V, Dewettinck K, Van Bockstaele F. The effect of cooling on crystallization and physico-chemical properties of puff pastry shortening made of palm oil and anhydrous milk fat blends. *J Food Eng* [Internet]. 2021;291(May 2020):110245. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110245>
13. Saghafi Z, Naeli MH, Tabibazar M, Zargaraan A. Zero-Trans Cake Shortening: Formulation and Characterization of Physicochemical, Rheological, and Textural Properties. *JAOCs, J Am Oil Chem Soc.* 2018;95(2):171–83.
14. Ahmadi L, Marangoni AG. Functionality and physical properties of interesterified high oleic shortening structured with stearic acid. *Food Chem* [Internet]. 2009;117(4):668–73. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.04.072>
15. Erickson DR. *Edible fats and oils processing: basic principles and modern practices*: World Conference Proceedings. The American Oil Chemists Society; 1990.
16. Sato K, Bayés-García L, Calvet T, Cuevas-Diarte MÀ, Ueno S. External factors affecting polymorphic crystallization of lipids. *Eur J Lipid Sci Technol.* 2013;115(11):1224–38.
17. Litwinenko JW, Rojas AM, Gerschenson LN, Marangoni AG. Relationship Between Crystallization Behavior, Microstructure, and Mechanical Properties in a Palm Oil-Based Shortening. *JAOCs, J Am Oil Chem Soc.* 2002;79:647–54.
18. Paar A. *Basic of rheology* [Internet]. Anton Paar. 2020. Available from: <https://wiki.anton-paar.com/en/basics-of-rheology/>
19. Basics. *Basic of Rheology* [Internet]. Anton Paar. Available from: <https://wiki.anton-paar.com/en/basics-of-rheology/>
20. Saghafi Z, Naeli MH, Tabibazar M, Zargaraan A. Modeling the Rheological Behavior of Chemically Interestesterified Blends of Palm Stearin/Canola Oil as a Function of Physicochemical Properties. *JAOCs, J Am Oil Chem Soc.* 2019;96(11):1219–34.
21. Simovic DS, Pajin B, Seres Z, Filipovic N. Effect of low-trans margarine on physicochemical and sensory properties of puff pastry. *Int J Food Sci Technol.* 2009;44(6):1235–44.
22. Foley J, Brady JP. Temperature-induced effects on crystallization behaviour, solid fat content and the firmness values of milk fat. *J Dairy Res.* 1984;51(4):579–89.
23. Lee J, Marsh M, Martini S. Effect of storage time on physical properties of sonocrystallized all-purpose shortening. *J Food Sci.* 2020;85(10):3391–9.
24. Bell A, Gordon MH, Jirasubkunakorn W, Smith KW. Effects of composition on fat rheology and crystallisation. *Food Chem.* 2007;101(2):799–805.
25. Stapley AGF, Tewkesbury H, Fryer PJ. Effects of shear and temperature history on the crystallization of chocolate. *JAOCs, J Am Oil Chem Soc.* 1999;76(6):677–85.

## Effects of Crystallization Parameters on Rheological Properties of Inter-esterified Based Shortenings

Ameli M<sup>1</sup>, Roufegarinejad L<sup>2</sup>, Zargaraan A<sup>3\*</sup>, Zayeri F<sup>4</sup>

- 1- Ph.D. Student, Department of Food Science and Technology, Tabriz branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
- 2- Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Tabriz branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
- 3- \*Corresponding author: Assistant Professor, Department of Food and Nutrition Policy and Planning Research, Faculty of Nutrition Sciences and Food Technology, National Nutrition and Food Technology Research Institute, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran, Email: zargaran@sbmu.ac.ir
- 4- Professor, Proteomics Research Center and Department of Biostatistics, Faculty of Allied Medical Sciences, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received 10 Oct, 2021

Accepted 24 Jan, 2022

**Background and Objectives:** One of the challenges in edible oils and fat industries is the production of shortenings with special functional properties for various industries. Rheological properties of shortenings are directly linked to their functionality. The major objective of this study was to investigate effects of crystallization parameters on rheological properties of inter-esterified based shortenings.

**Materials & Methods:** Steady state and oscillatory shear parameters of five shortening treatments with various crystallization parameters were collected. Effects of cooling rate and kneading intensity on storage modulus ( $G'$ ) and loss modulus ( $G''$ ) were studied.

**Results:** In frequency sweep assay within the frequency range of 0.628–126 rad/s, the maximum and the minimum of elastic moduli were respectively seen in Treatments 1 and 4 with cooling exit temperatures (3) of 28 and 29.5 °C, kneading rates (2) of 190 and 280 rpm and filling temperatures of 36 and 30 °C. Similar results were achieved for loss moduli.

**Conclusion:** Results showed significant decreases in the two moduli with decreasing temperature in third phase, increasing kneading intensity and decreasing filling temperature.

**Keywords:** Rheology, Crystallization, Shortening, Storage modulus ( $G'$ ), Loss modulus ( $G''$ )