مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران
سال بیست و یکم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، صفحات ۸۲-۷۳

مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند تبلور شورتنینگ: پیش‌بینی رفتار رئولوژیکی و عملکردی بر اساس پارامترهای سردکردن و ورزدهی

مهناز عاملی[۱]، لیلا روفه‌گری‌نژاد[۲]، عزیزالله زرگران[۳]، فرید زایری[۴]

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

۲- نویسنده مسئول: گروه علوم و صنایع غذایی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران. پست الکترونیکی: l.roufegari@iaut.ac.ir

۳- نویسنده مسئول: گروه تحقیقات سیاستگذاری و برنامه‌ریزی غذا و تغذیه، انستیتو تحقیقات تغذیه‌ای و صنایع غذایی کشور، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران. پست الکترونیکی: aziz.zargaran@gmail.co

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۷

چکیده

سابقه و هدف: این مطالعه با هدف بهینه‌سازی تولید شورتنینگ چربی و ارزیابی تأثیرات نرخ سردکردن و ورزدهی بر ویژگی های رئولوژیک آن انجام شد.

مواد و روش‌ها: دمای خروجی مرحله سوم سردکن (۳۱-۲۸ درجه سانتی‌گراد)، نرخ ورزدهی (۲۸۰-۱۰۰ دور بر دقیقه) و دمای پرکن (۳۶-۳۰ درجه سانتی‌گراد) به عنوان پارامترهای کلیدی تبلور انتخاب شدند. نوع طراحی و مدل به ترتیب باکس-بنکن و درجه دوم بود. آزمون های رئولوژی بر روی ۱۷ نمونه با عوامل تبلور متفاوت انجام شد. نرخ‌های سردکردن و ورزدهی برای بررسی تغییرات به وجود آمده در پارامترهای روبش فرکانس و روبش کرنش تغییر داده شدند.

یافته‌ها: پارامترهای بهینه تبلور (دمای خروجی ۳۱ درجه سانتی‌گراد، نرخ ورزدهی ۲۸۰ دور بر دقیقه و دمای پرکن ۳۳ درجه سانتی‌گراد) منجر به بهترین ویژگی‌های عملکردی شد. در این شرایط، مقادیر مدول ذخیره (G') و مدول اتلاف (G'') در کمترین حد خود قرار گرفتند که نشان‌دهنده بافت مطلوب و پلاستیسیته بالاتر بود. تحلیل‌های رئولوژیک رفتار جامدگونه غالب در محدوده خطی ویسکوالاستیک و وجود نقطه جریان را برای همه نمونه‌ها تأیید کرد. برازش مدل‌های رگرسیون و آنالیز واریانس معناداری مدل‌های پیش‌بینی‌کننده پاسخ‌ها را نشان داد.

نتیجه‌گیری: این مطالعه پیش بینی ارزشمندی در مورد اثرات شرایط فرآیند بر ویژگی‌های شورتنینگ در شرایط مختلف ارائه می‌دهد و می تواند با توجه به نیازهای مصرف کنندگان، راهنمایی برای تغییر در فرایندهای تولید به منظور ایجاد ویژگی های مطلوب در محصول نهایی باشد

واژگان کلیدی: شورتنینگ، نرخ سردکردن، نرخ ورزدهی، رئولوژی، تبلور، طراحی آزمایش

پیام‌های اصلی

- **نرخ ورزدهی** تأثیرگذارترین عامل بر بافت شورتنینگ است و افزایش آن تا ۲۸۰ دور بر دقیقه، پلاستیسیته مطلوب‌تری ایجاد می‌کند.
- **شرایط بهینه تبلور** (دمای خروجی ۳۱ درجه، ورزدهی ۲۸۰ دور و دمای پرکن ۳۳ درجه) کمترین مدول‌های ذخیره و اتلاف را به همراه دارد.
- **مدل‌های ارائه‌شده** با دقت بالا قادر به پیش‌بینی رفتار رئولوژیک شورتنینگ و راهنمایی برای تنظیم فرآیند تولید هستند.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.66224/nsft.21.2.73]

• مقدمه

شورتنینگ‌ها در علوم و صنایع غذایی، به چربی‌ها و روغن‌های گیاهی یا حیوانی جامد اطلاق می‌شود که به منظور ایجاد بافت ترد، قابلیت ورآمدن و بهبود ساختار در محصولاتی مانند نان، کیک، بیسکویت و شیرینی‌جات مورد استفاده قرار می‌گیرند. عملکرد اصلی این چربی‌ها، ایجاد مانع فیزیکی بین رشته‌های گلوتن و ذرات نشاسته، کوتاه کردن شبکه گلوتن و در نتیجه جلوگیری از تشکیل بافت سفت و چرمی است. شورتنینگ‌ها معمولاً از طریق فرآیند هیدروژناسیون، مخلوط‌سازی (بلندینگ) یا اینتراستریفیکاسیون تولید می‌شوند تا نقطه ذوب، بافت و پایداری مطلوب برای کاربردهای غذایی خاص را به دست آورند {Ghotra, 2002 #8}. شورتنینگ‌ها عموماً از مخلوط روغن‌هایی از چندین منبع، مانند روغن‌های هیدروژنه نشده، هیدروژنه جزئی و کامل، امولسیفایرها و سایر افزودنی‌ها تشکیل می‌شوند (۱). روغن کلزا، پنبه دانه، پیه، پالم، سویا و آفتابگردان از روغن‌های خوراکی معمول در تولید شورتنینگ‌ها هستند (۲). شورتنینگ‌ها، گروهی از چربی‌ها هستند که حاوی مخلوطی از روغن‌ها و چربی‌های مختلف بوده و معمولاً حاوی مقادیر زیادی اسیدهای چرب اشباع هستند. عوامل مختلف از جمله نوع و مقدار مواد اولیه و شرایط فرآیند بر ویژگی‌های شورتنینگ‌ها تأثیر می‌گذارند (۳).

عملکرد شورتنینگ ها به رفتار تبلور، پروفایل ذوبی و خواص ویسکوالاستیک بستگی دارد. خواص بافتی و رئولوژیک شورتنینگ مستقیماً بر جنبه‌های کیفیت، ظاهر فیزیکی، ارزیابی حسی و بافت محصولات بیکری به عنوان محصولات نهایی تأثیر می‌گذارد (۴). رفتار جامدگونه چربی‌های پلاستیک ناشی از وجود شبکه کریستالی چربی است (۵). ازدیدگاه علم رئولوژی، شورتنینگ‌ها مواد نیمه پلاستیکی هستند که قادر به تشکیل خواص بافتی مطلوب در محصولات غذایی مبتنی بر چربی هستند. ماهیت شبکه کریستالی، از جمله توزیع فضایی آن و همچنین تعداد، اندازه و شکل عناصر ریزساختاری تشکیل‌دهنده آن می‌تواند با تغییر در شرایط تبلور به شدت تغییر کند(۷، ۶).

بافت‌دهی شورتنینگ‌ها برای افزایش پلاستیسیته عمدتاً از طریق یک فرآیند سرمایش حاصل می‌شود، که در آن چربی ذوب شده به سرعت در یک واحد سردکن خنک می‌شود (۸). علاوه بر پلاستیسیته و بافت بهبودیافته، تبلور تحت تنش برشی، گرمای تبلور را نیز از مخلوط خارج می‌کند (Ahmadi & Marangoni, 2009; Erickson, 1990).

بررسی اثر سرمایش بر تبلور دینامیک چربی و خواص فیزیکوشیمیایی شورتنینگ ویژه خمیرهای لایه ای در یک سیستم مبدل حرارتی خراش دهنده سطح نشان داد که دمای تبلور به طور قابل توجهی بر خواص رئولوژیکی و سختی شورتنینگ‌های حاصل تأثیر می‌گذارد (۹). سیستم مبدل حرارتی خراش دهنده شامل یک محور فولادی است که در یک لوله می‌چرخد و به طور خارجی توسط آمونیاک جوشان خنک می‌شود (۱۰). محور چرخان مجهز به تیغه‌های خراش‌دهنده است که توسط نیروی گریز از مرکز در سرعت‌های چرخش بالا به سطح داخلی خنک شده فشرده می‌شوند (۱۱).

شایان ذکر است که طولانی‌تر کردن مراحل سرمایش و عملیاتی برای به حداقل رساندن پدیده پساتبلور و اطمینان از توسعه ساختار بلوری مناسب و پلاستیسیته مطلوب ضروری خواهد بود (۱۳، ۱۲). با توجه به تعداد نسبتاً زیاد عوامل تأثیرگذار، درک تأثیر شرایط فرآوری و اثرمتقابل آنها بر یکدیگر، بر عملکرد فیزیکی شورتنینگ‌ها چالش‌برانگیز خواهد بود (۱۴).

از این رو، بهینه‌سازی شرایط تولید شورتنینگ از طریق روش مدل سازی برای دستیابی به بهترین ویژگی‌های رئولوژیک، از اهمیت خاصی برخوردار است (۱۵). بر اساس شواهد موجود، تأثیر پارامترهای تبلور، از جمله نرخ‌های سرمایش و ورزدهی، بر خواص ویسکوالاستیک شورتنینگ‌های چربی عمدتاً ناشناخته باقی مانده است. این مطالعه با هدف تعیین میزان تأثیر پارامترهای فرآیند تبلور بر بافت نهایی، ذخیره و خواص کشسانی شورتنینگ انجام شد. در این راستا، اثرات نرخ سرمایش، همزدن و دمای پرکن بر خواص عملکردی شورتنینگ‌ها، شامل چسبندگی، سختی، پلاستیسیته و همگنی و همچنین مدول‌های ذخیره (G') و اتلاف(G'') ، با تمرکز بر پارامترهای فرآیند تبلور و تعاملات آنها بر خواص عملکردی و حسی شورتنینگ‌ها با استفاده از روش مدل سازی مورد بررسی قرار گرفت.

• مواد و روش‌ها

مواد: یک شورتنینگ چندمنظوره حاوی مخلوط چربی بین استری شده شیمیایی متشکل از ۴/۲ درصد روغن کلزا، ۷۱/۸ درصد پالم و ۲۴ درصد روغن آفتابگردان هیدروژنه کامل در شرکت مارگارین (تهران، ایران) تولید شد. فرمولاسیون نهایی شورتنینگ شامل ۳۳/۲۵ درصد مخلوط چربی بین استری شده

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.66224/nsft.21.2.73]

شیمیایی، ۱۱/۲۵ درصد روغن آفتابگردان هیدروژنه کامل، ۳/۷۵ درصد کلزا و ۵۱/۷۵ درصد پالم بود.

بهینه‌سازی روش تولید: نرم‌افزار Design-Expert (نسخه ۱۲) برای تعیین اجراهای عامل تبلور و برازش مدل‌های پاسخ با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) استفاده شد. علاوه بر این ، در این مطالعه از طراحی باکس-بنکن و یک مدل درجه دوم استفاده شد. به دلیل محدودیت‌های فنی، مطالعه ۱۷ اجرا در یک بلوک واحد شد. جدول ۱ طراحی آزمایشی، مقادیر کدگذاری شده، درصدهای واقعی و محدوده متغیرهای مستقل برای فرآیند تبلور را ارائه می‌دهد. برای حفظ یک محدوده معقول از اجراهای آزمایشی، سه پارامتر فرآیندی به عنوان شاخص‌های کلیدی تبلور انتخاب شدند. نمونه‌های شورتنینگ در یک کریستالایزر Gerstenberg and Agger آماده شدند. این واحد شامل یک مخزن ذوب، سیستم سرمایش (چهار واحد سردکن مجزا) و یک ورزدهنده پینی بود. جدول ۲ پارامترهای اجراهای تبلور اعمال شده را ارائه می‌دهد. شایان ذکر است که دمای ورود چربی به سیستم تبلور ثابت (۱±۶۵ درجه سانتی‌گراد) نگه داشته شد.

مطالعات رئولوژیک: داده‌ها در آزمایشگاه رئولوژی انستیتو تحقیقات تغذیه‌ای و صنایع غذایی کشور (تهران، ایران) به دست آمد. اندازه‌گیری‌های رئولوژیک با رئومترَ Anton Paar Physica MCR 301 انجام شد. دما با استفاده از یک سیستم پلتیر مجهز به یک گردش‌کننده مایع کنترل شد. آزمون‌های رئولوژیک در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، که دمایی معمول در یک کارگاه قنادی است، انجام شد. برای همه نمونه‌ها از ژئومتری صفحه موازی ((PP40/S-SN 16891; d=2 mm)) استفاده شد و داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Rheoplus (نسخه ۳/۲۱) تحلیل شدند. آزمون‌های تعیین بازه تنش درمحدوده ۵۰۰-۰/۰۰۱ ٪ ، ۶,۲۸ rad/s برای تعیین مقدار محدودکننده محدوده خطی ویسکوالاستیک (LVE) انجام شدند. علاوه بر این، تانژانت اتلاف (نسبت مدول اتلاف به مدول الاستیک) در ناحیه LVE محاسبه شد تا دید مستقیمی از اینکه نمونه‌ها به عنوان مایع یا جامد رفتار می‌کنند ارائه دهد. همچنین، نقطه تقاطع ($G'= G''$) تعیین شد.

آزمون‌های روبش فرکانس با استفاده از یک رمپ فرکانسی از ۰,۰۶۲۸ تا ۱۲۶ rad/s انجام شدند. G' و G'' در سه فرکانس زاویه‌ای ۰,۰۶۲۸، ۳,۳۱ و ۱۲۶ rad/s به عنوان نماینده فرکانس‌های زاویه‌ای کم، متوسط و بالا محاسبه شدند.

جدول ۱. محدوده‌های آزمایشی و سطوح متغیرهای مستقل استفاده‌شده در طرح سطح پاسخ باکس-بنکن درجه دوم

فاکتور (متغیر)	نماد	یکا	نوع	دامنه سطوح ا				میانگین	انحراف معیار
				پایین (واقعی)	پایین (کدگذاری‌شده)	بالا (واقعی)	بالا (کدگذاری‌شده)		
دمای خروجی شورتینگ از واحد خنک‌کن شماره ۳	T3	درجه سلسیوس	عددی	۲۸	-۱	۳۱	+۱	۲۹,۵	۱,۰۶
شدت هم‌زنی واحد خمیرگیری ۲	RPM	دور بر دقیقه	عددی	۱۰۰	-۱	۲۸۰	+۱	۱۹۰	۶۳,۶۴
دمای پرکردن (فیلینگ)	FT	درجه سلسیوس	عددی	۳۰	-۱	۳۶	+۱	۳۳	۲,۱۲

• یافته‌ها و بحث

ویژگی های رئولوژیک: شکل ۱ رئوگرام‌های روبش کرنش مربوط به تیمارهای تبلور را نشان می‌دهد. برای G' مربوط به ۱۷ تیمار تبلور، امکان تشخیص دو ناحیه مختلف وجود داشت، یعنی یک ناحیه خطی ویسکوالاستیک کوچک، که در آن G' تقریباً ثابت بود، و یک ناحیه غیرخطی بزرگتر، که در آن G' با افزایش تنش شروع به کاهش می‌کرد. ناحیه LVE برای تسهیل تشخیص ساختارهای قوی و ضعیف نمونه‌ها تعیین شد. همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است، ناحیه LVE در نمونه ۴ بیشتر بود.

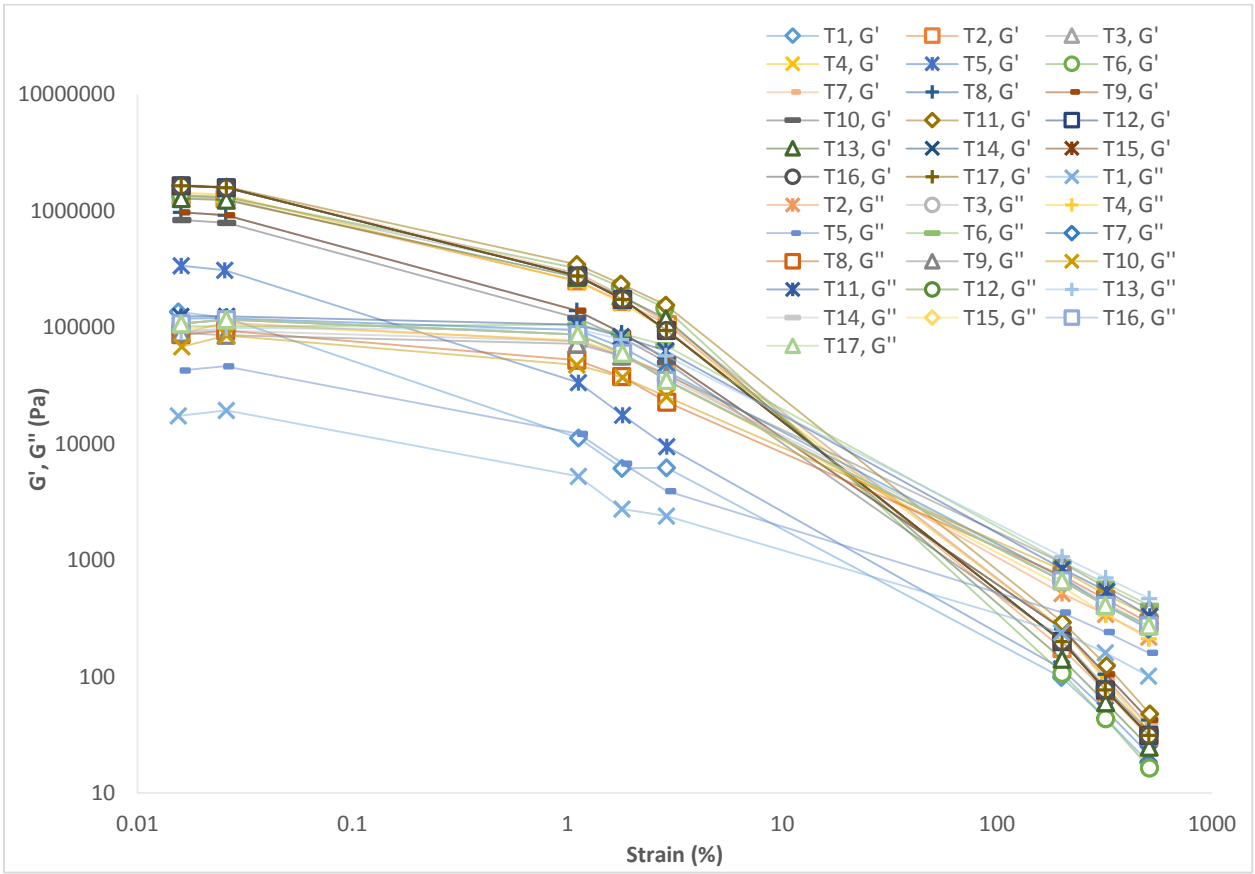
LVE در اکثر غذاهای جامد معمولاً از ۰,۱٪ تا ۲٪ متغیر است. در این مطالعه، با این حال، یک تنش ۰,۰۵٪ درون ناحیه LVEانتخاب شد. رفتار نمونه‌ها در آزمون رنج تنش برای G'' مشابه آنچه برای G' ذکر شد بود. در همه نمونه‌ها، هر دو مدول در نهایت به سمت تقاطع تمایل داشتند، که نشان می‌دهد هر ۱۷ تیمار تبلور یک نقطه جریان نشان دادند. در تنش‌های پایین‌تر، مقادیر G' به طور محسوسی بالاتر از مقادیر G'' بود. با افزایش تنش، مقادیر G'' در نهایت از مقادیر G' فراتر رفت. از آنجا که G' قبل از نقطه جریان بالاتر از G'' باقی ماند، همه نمونه‌ها رفتار جامدگونه را درون محدوده خطی ویسکوالاستیک

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]
[DOI: 10.66224/nsft.21.2.73]

نشان دادند. با این حال، در تنش‌های بالاتر، G″ بالاتر بود و نمونه‌ها رفتار مایع‌گونه بیشتری نشان دادند. بررسی تنش در نقطه تقاطع (Gf) در شکل ۱، نشان می‌دهد که فراتر رفتن از این تنش باعث فروپاشی ساختار می‌شود و در نتیجه به ماده اجازه جریان می‌دهد (۳).

جدول ۲. تیمارهای تبلور و پارامترهای آزمون روبش کرنش تیمارها

تیمارهای تبلور	دمای خروجی شورتینگ از واحد خنک‌کن شماره ۳ (درجه سلسیوس)	شدت ورزدهی واحد ۲ (دور بر دقیقه)	دمای پرکردن (درجه سلسیوس)	γl (%)	Tan δLve	Gf (Pa)
T1	۲۹/۵	۲۸۰	۳۰	۰/۰۵۱۳	۰/۱۰۶۰	۴۰۰/۰۰
T2	۳۱	۱۹۰	۳۶	۰/۰۵۹۶	۰/۰۷۰۳	۱۲۴۰/۰۰
T3	۳۱	۲۸۰	۳۳	۰/۰۶۵۰	۰/۰۸۳۳	۲۱۶۵/۳۰
T4	۲۹/۵	۱۰۰,۰	۳۰	۰/۲۹۵۰	۰/۱۹۳۲	۱۱۷۱/۱۰
T5	۲۸	۲۸۰	۳۳	۰/۰۷۰۱	۰/۱۹۲۰	۷۴۱/۲۸
T6	۲۹/۵	۲۸۰	۳۶	۰/۱۰۶۰	۰/۱۲۹۰	۲۴۷۱۴/۰۰
T7	۲۸	۱۹۰	۳۶	۰/۰۹۳۲	۰/۱۲۶۰	۲۴۵۹/۷۰
T8	۳۱,۰	۱۰۰,۰	۳۳	۰/۰۷۹۹	۰/۱۴۹۰	۱۷۴۰/۴۰
T9	۳۱,۰	۱۹۰	۳۰	۰/۰۹۷۲	۰/۱۳۴۰	۴۳۹۸/۹۰
T10	۲۸	۱۹۰	۳۰	۰/۰۵۹۵	۰/۱۲۹۰	۲۷۶۰/۲۰
T11	۲۸	۱۰۰,۰	۳۳	۰/۰۶۱۹	۰/۱۰۴۰	۳۵۷۸/۷۰
T12	۲۹/۵	۱۹۰	۳۳	۰/۰۵۹۸	۰/۰۹۵۲	۱۹۶۵/۷۰
T13	۲۹/۵	۱۰۰,۰	۳۶	۰/۰۶۰۵	۰/۱۰۸۰	۱۳۰۵۱/۰۰
T14	۲۹/۵	۱۹۰	۳۳	۰/۰۷۰۱	۰/۱۹۲۰	۷۴۱/۲۸
T15	۲۹/۵	۱۹۰	۳۳	۰/۰۷۰۱	۰/۱۹۲۰	۷۴۱/۲۸
T16	۲۹/۵	۱۹۰	۳۳	۰/۰۷۰۱	۰/۱۹۲۰	۷۴۱/۲۸
T17	۲۹/۵	۱۹۰	۳۳	۰/۰۷۰۱	۰/۱۹۲۰	۷۴۱/۲۸



شکل ۱. نمودار روبش کرنش

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.66224/nsft.21.2.73]

پس از این نقطه، G″ بالاتر از G′ خواهد بود(Tan(δ)>1) ، که نشان‌دهنده درهم ریختگی ساختاری و آغاز رفتار جریان است. بالاترین Gf در نمونه ۹ اندازه‌گیری شد . Tan(δ)LVE نسبت G′ به G″ در ناحیه LVE است. چنین پارامتری می‌تواند نشان‌دهنده خواص فیزیکی نمونه‌های تولید شده باشد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، کمترین Tan(δ)LVE در نمونه‌های ۱ و ۲ مشاهده شد.

منحنی‌های روبش کرنش برای پارامترهای رئولوژیک، مانند G′،G″ و تانژانت اتلاف یک شورتنینگ چند منظوره متبلورشده با و بدون اولتراسوند با شدت بالا در یک بررسی مشابه مورد مطالعه قرار گرفت که پروفایل G′ و G″ مشابهی را پس از ۶۰ دقیقه تبلور و در طول نگهداری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نشان داد (۱۶).

پژوهش‌های مشابه نشان داده اند که در طول تبلور، رئولوژی چربی‌ها از یک سیستم جامد ویسکوالاستیک ضعیف به یک مایع ویسکوالاستیک ضعیف تغییر می‌کند. در ابتدا، چند کریستال بزرگ موجود غالب هستند. با این حال، پس از هم زدن طولانی‌مدت، رفتار مایع ویسکوالاستیک ضعیف که همان مشخصه صفحات لغزش مایع بین کریستال‌های جامد، بر رفتار است مسلط می‌گردد (۱۷). در مطالعه‌ای درباره فرمولاسیون و بررسی ویژگی های شورتنینگ کیک بدون ترانس، ارزیابی تغییرات مدول‌های ذخیره و اتلاف در ترکیبات دوتایی روغن کلزا و استئارین پالم الگوهای مشابهی با مطالعه حاضر را پیشنهاد کرد (۴).

نتایج آزمون روبش فرکانس نشان داد که مدول G′ در تمام محدوده‌های فرکانسی از مدول G″ بزرگتر بود، بدون اینکه تقاطعی مشاهده شود. در سیستم‌های ژل، G′ عموماً در محدوده فرکانس اعمال‌شده بزرگتر از G″ است. بر اساس داده‌های روبش فرکانس، یک رفتار جامدگونه در تمام محدوده‌های فرکانسی مشاهده شد که نشان‌دهنده یک شبکه قوی به دلیل تشکیل ساختار شبکه مربوطه بود.

برازش برای بهترین مدل: پارامترهای تحلیل آماری شامل مقدار آزمون فیشر(F-value) ، p-valueمدل، ضریب تعیین (R2)، ضرایب تعیین تعدیل‌شده(R2-adj) ، R2پیش‌بینی شده، p-value عدم برازش(LOF) ، دقت کافی و CV% به دست آمده از تحلیل واریانس (ANOVA) برای ارزیابی خوبی برازش در مدل‌ها استفاده شدند. معادلات درجه دوم برازش یافته برای دستیابی به فرمولاسیون بهینه اعمال شدند. معناداری آماری پارامترهای مدل در سطح ۵٪ (p-value = 0.05) تنظیم شد. جداول ۳ و ۴ پاسخ‌های به دست آمده ۱۷ اجرای متناظر را ارائه می‌دهند که به یک مدل درجه دوم برازش داده شدند. همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، p-value برای مدل در سطح کمتر از ۰/۰۵ معناداری را نشان می‌دهد.

مدول‌های ذخیره و اتلاف: معادلات مدل پیش‌بینی شده در جدول ۳ ارائه شده‌اند. معادلات رگرسیون مقدار هر متغیر پاسخ را وقتی عوامل مستقل تغییر می‌کنند پیش‌بینی می‌کنند؛ علامت مثبت در جلوی عبارات نشان‌دهنده اثر سینرژیستی است، در حالی که علامت منفی یک اثر آنتاگونیستی را نشان می‌دهد{Ajala, 2016 #9;Montgomery, 2017 #10} . شکل ۲ مدول اتلاف را در فرکانس های زاویه ای مختلف و دمای پرکن ۳۳ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. شکل ۳ مدول‌های ذخیره و اتلاف در سرعت زاویه‌ای ۱۲۶ (rad/s را هنگام انحراف پارامترهای تبلور از یک نقطه مرجع نمایش می‌دهد، جایی که هر سه عامل تبلور در مقادیر میانگین خود بودند یعنی T3=29.5 درجه سانتی‌گراد، RPM=190 و FT=33 درجه سانتی‌گراد.

تیمار تبلور بهینه: طبق بررسی های انجام شده، نمونه شورتنینگ تیمار ۳ (T3=31 درجه سانتی‌گراد، RPM=280 و FT=33 درجه سانتی‌گراد) نزدیکترین نمونه به نمونه روتین خط تولید است که با نیازهای مشتریان تطبیق دارد. یعنی . جالب توجه است که در پارامترهای مرتبط ذکر شده، تمامی مدول‌های ذخیره و اتلاف مدل‌سازی شده یعنی G′ و G″ در ۰/۰۶۲۸، ۳/۳۱ و ۱۲۶ (rad/s) در محدوده مقدار حداقل بودند. شکل ۳، مدول‌های ذخیره و اتلاف را در محدوده سرعت زاویه‌ای G′ و G″ در ۱۲۸ rad/s نشان می‌دهد.

شکل ۳، نمودار آشفتگی (Perturbation Plot) مدول‌های ذخیره و اتلاف در فرکانس ۱۲۶ rad/s را نشان می‌دهد. این نمودار برای مقایسه کمی اثر هر یک از پارامترهای تبلور T3، RPM و FT بر پاسخ، در حالی که سایر عوامل در مقدار مرکزی (میانگین) خود ثابت نگه داشته شده‌اند، ترسیم شده است. نقطه مرجع صفر روی محور X معادل شرایط T3=29.5°C، RPM=190 و FT=33°C است. شیب خط مربوط به هر عامل، درجه حساسیت پاسخ به تغییرات آن عامل را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نرخ ورزدهی RPM با داشتن شیب منفی تند، قوی‌ترین عامل کاهنده هر دو مدول G′ و G″ است. این بدان معناست که در محدوده مورد مطالعه، افزایش RPM بیشترین تأثیر را در کاهش سفتی کاهش G′ و G″شورتنینگ دارد و بنابراین کلیدی‌ترین پارامتر برای کنترل بافت نهایی محسوب می‌شود. اثر دمای خروجی سردکن T3 و دمای پرکن FT در مقایسه با RPM ملایم‌تر است.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.66224/nsft.21.2.73]

جدول ۳. تخمین ها، تحلیل واریانس برای مدل پاسخ و معادلات نهایی

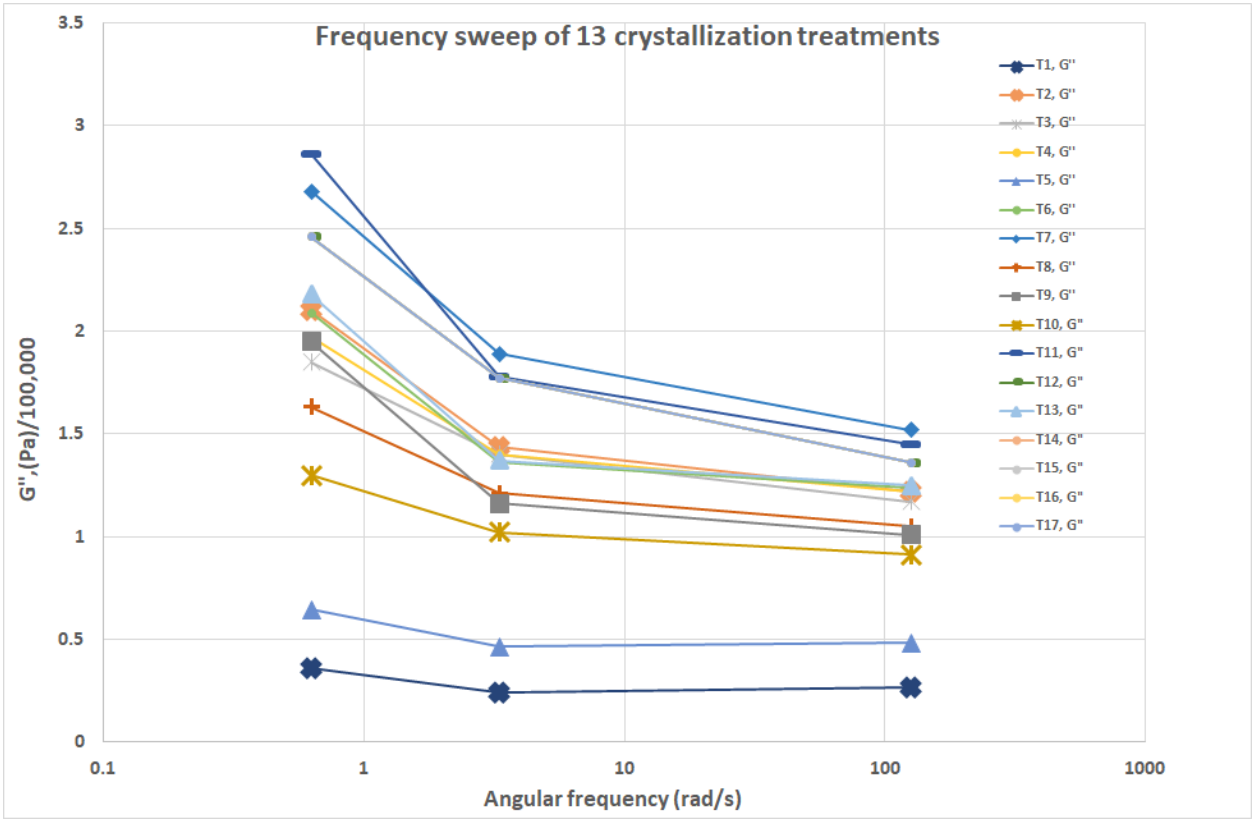
پاسخ	مدل					آمار برازش						معادلات(X_1: T3, X_2: RPM, X_3: FT)
	F-value	p-value	Sum of Squares	Mean Square	df	R^2	تعدیل R^2شده	انحراف معیار	میانگین	دقت	CV %	
G' rad/s)۰/۰۶۲۸(	۱۵۲/۰۹	۰/۰۰۰۱<	۵۴۰۱/۸۷	۶۰۰/۲۱	۹	۰/۹۹۴۹	۰/۹۸۸۴	۱/۹۹	۲۲/۸۸	۳۳/۹۴۰۱	۸/۶۸	$X_1\ X_2$ ۰٫۱۰۴۹۲X_3 + ۲۰۹٫۶۹۸۱۸X_2 − ۰٫۸۴۸۵۱۳X_1 − ۱۵۱٫۲۳۸۹۲ − ۵۸۸۶٫۵۶۹۴۵ $X_2{}^2$ + ۰٫۰۰۱۱۴۹$X_1{}^2$ + ۲٫۳۷۶۹$X_2\ X_3$ + ۰٫۰۰۰۰۰۱۳$X_1\ X_3$ − ۰٫۱۰۰۶۳۳+ $X_3{}^2$۳٫۱۱۵۰۴
۳/۳۱G' (rad/s)	۳۴/۹۲	۰/۰۰۰۱<	۲۷۸/۹۷	۳۱/۰۰	۹	۰/۹۷۸۲	۰/۹۵۰۲	۰/۹۴۲۱	۷/۰۹	۱۵/۴۶۷۳	۱۳/۲۸	$X_1\ X_2$ + ۰٫۰۰۳۴۶۹X_3 − ۴۸٫۹۵۱۵۹X_2 − ۰٫۰۰۳۹۴۸X_1 − ۳۸٫۲۱۱۹۵ − ۱۳۹۴٫۳۰۱۹۹ $X_2{}^2$ + ۰٫۰۰۰۲۹$X_1{}^2$ + ۰٫۶۲۴۲۷۸$X_2\ X_3$ + ۰٫۰۰۰۰۷۴۱$X_1\ X_3$ − ۰٫۰۲۸۳۳۳ $X_3{}^2$۰٫۷۲۹۲۰۸
rad/s)۱۲۶G' (	۳۱/۴۴	۰/۰۰۰۱<	۳۶۲/۴۳	۴۰/۲۷	۹	۰/۹۷۵۹	۰/۹۴۴۸	۱/۱۳	۸/۲۴	۱۴/۷۰۰۸	۱۳/۷۳	$X_1\ X_2$ + ۰٫۰۰۴۳۵۲X_3 − ۵۶٫۰۹۹۶۸X_2 − ۰٫۰۰۲۲۱۸X_1 + ۴۳٫۲۹۵۹۳ − ۱۵۸۹٫۵۰۱۹۴ $X_2{}^2$ + ۰٫۰۰۰۳۳۵$X_1{}^2$ + ۰٫۷۰۵۵۵۶$X_2\ X_3$ + ۰٫۰۰۰۷۴۱$X_1\ X_3$ − ۰٫۰۳۸۳۳۳ $X_3{}^2$۰٫۸۳۲۷۷۸
G' rad/s)۰/۰۶۲۸(	۲۳/۸۸	۰/۰۰۰۲	۱۰/۴۸	۱/۱۶	۹	۰/۹۶۸۵	۰/۹۲۷۹	۰/۲۲۰۹	۱/۵۷	۱۳/۳۵۴۳	۱۴/۰۹	$X_1\ X_2$ + ۰٫۰۰۱۳۳۵X_3 − ۱۰٫۵۷۲۴۱X_2 − ۰٫۰۲۴۶۲۴X_1 + ۶٫۴۰۳۴۵۷ − ۲۶۹٫۹۹۸۱۷ $X_2{}^2$ + ۰٫۰۰۰۰۵۳$X_1{}^2$ + ۰٫۰۹۲۹۴۴$X_2\ X_3$ + ۰٫۰۰۰۲۸۷$X_1\ X_3$ − ۰٫۰۳۱۱۱۱ $X_3{}^2$۰٫۱۴۶۸۷۵
۳/۳۱G''(rad/s)	۹۲/۲۳	۰/۰۰۰۱<	۴/۶۲	۰/۵۱۳۳	۹	۰/۹۷۴۱	۰/۹۴۰۸	۰/۱۳۲۵	۱/۰۸	۱۵/۶۸۱۰	۱۲/۲۷	$X_1\ X_2$ + ۰٫۰۰۱۰۹۳X_3 − ۶٫۲۷۸۷۵X_2 − ۰٫۰۱۵۱۴۴X_1 + ۵٫۶۲۵۷۴ − ۱۸۸٫۴۴۷۷۸ $X_2{}^2$ + ۰٫۰۰۰۰۳۷$X_1{}^2$ + ۰٫۰۹)$X_2\ X_3$ + $^{18-}$۱۰ × ۲٫۵۶۸۳۴$X_1\ X_3$ + (۰٫۰۰۱۱۶۶۷ $X_3{}^2$۰٫۰۸۹۴۴۴
۱۲۶G'' (rad/s)	۱۶/۵۷	۰/۰۰۰۶<	۲/۵۶	۰/۲۴۸۶	۹	۰/۹۹۵۲	۰/۸۹۷۵	۰/۱۳۱۱	۰/۹۴۶۲	۱۱/۳۳۴۲	۱۳/۸۵	$X_1\ X_2$ + ۰٫۰۰۰۰۹۷۴X_3 − ۴٫۶۷۷۰۱X_2 − ۰٫۰۱۸۷۸۸X_1 + ۳٫۷۹۰۱۵ − ۱۳۳٫۸۰۴۷۲ $X_2{}^2$ + ۰٫۰۰۰۰۰۲۸$X_1{}^2$ + ۰٫۰۰۶۲۷۷۸$X_2\ X_3$ + ۰٫۰۰۰۰۰۷۴$X_1\ X_3$ − ۰٫۰۰۰۵ $X_3{}^2$۰٫۰۰۶۸۵۸۳

*P<0.05 is significant.

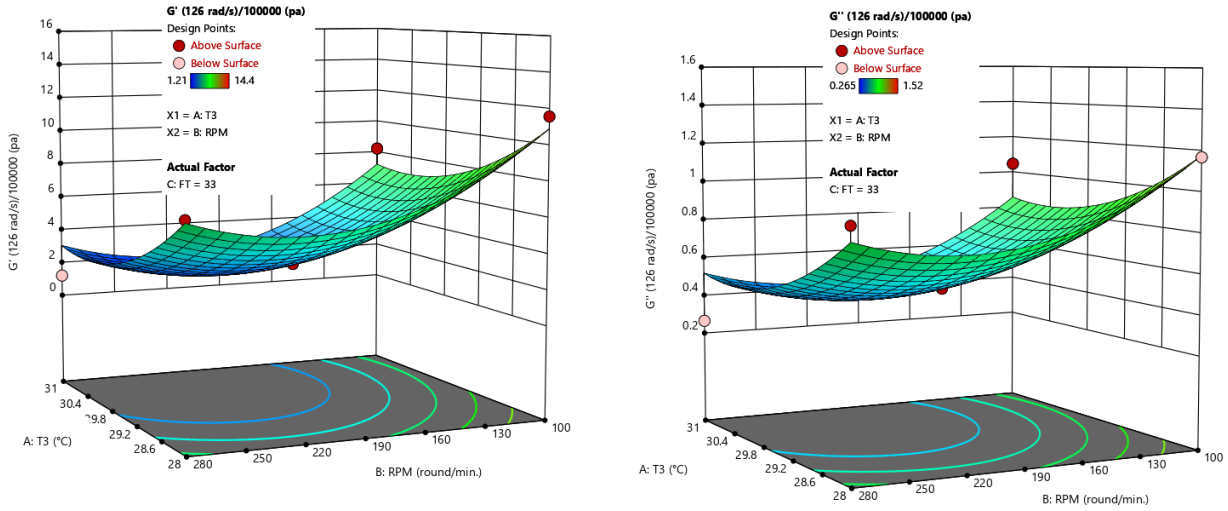
جدول ۴. بهینه سازی معیار، پیشنهاد ئ نتایج ارزیابی اعتبار پارامترهای بهینه

معیار بهینه سازی				پیشنهاد مطلوبیت = ۰/۹۴				مقدار پیش بینی شده	مقدار به دست آمده در آزمایشات	p-value (paired-t test)
				فاکتور		مقدار پاسخ				
پاسخ	هدف	حد پایین	حد بالا							
G' (0.0628 rad/s)/100000	کمینه	۰/۵۰۷	۱۱/۴			G' (0.0628 rad/s)/100000	۰/۸۴۵	۱/۱۶۲±۰/۸۴۵	۰/۷۶۵±۰/۹۲۳	۰/۶۲
G' (3.31 rad/s)/100000	کمینه	۰/۹۴۷	۱۲/۵			G' (3.31 rad/s)/100000	۱/۳۸۳	۱/۱۰۴±۱/۳۸۲	۰/۶۶۵±۱/۳۹۷	۰/۹۶
G' (126 rad/s)/100000	کمینه	۱/۲۱	۱۴/۴			G' (126 rad/s)/100000	۱/۷۴۹	۱/۳۳۰±۱/۷۴۸	۰/۸۰۴±۲/۱۳۵	۰/۲۵
G'' (0.0628 rad/s)/100000	کمینه	۰/۳۵۹	۲/۸۶	T3	۳۰/۴	G'' (0.0628 rad/s)/100000	۰/۵۱۲	۰/۳۰۹±۰/۵۱۲	۰/۴۳۵±۰/۷۷۹	۰/۶۲
G'' (3.31 rad/s)/100000	کمینه	۰/۲۴	۱/۸۹	RPM	۲۲۸	G''(3.31 rad/s)/100000	۰/۳۴۹	۰/۱۹۱±۰/۳۴۹	۰/۲۴۵± ۰/۳۳۴	۰/۸۴
G'' (126 rad/s)/100000	کمینه	۰/۲۶۵	۱/۵۲	FT	۳۳/۱	G'' (126 rad/s)/100000	۰/۴۰۶	۰/۱۷۹±۰/۴۰۵	۰/۲۴۵±۰/۳۳۵	۰/۴۲

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]
[DOI: 10.66224/nsft.21.2.73]



شکل ۲ . مدول ذخیره (G') و مدول اتلاف (G'') در فرکانس زاویه‌ای ۱۲۶ رادیان بر ثانیه، در دمای پرکن ۳۳ درجه سلسیوس



شکل ۳. نمودار آشفتگی (پرتوربیشن) مدول ذخیره (G') و مدول اتلاف (G'') در فرکانس زاویه‌ای ۱۲۶ رادیان بر ثانیه، در دمای پرکن ۳۳ درجه سلسیوس

شکل ۴ تغییرات در مدول‌های ذخیره و اتلاف را در سرعت زاویه‌ای متوسط یعنی ۳,۳۱ rad/s وقتی RPM برابر ۲۸۰ بود نشان می‌دهد. به طور مشابه، شرایط فرآیند تبلور مربوط به مطلوب‌ترین خواص عملکردی با حداقل مقادیر مدول ذخیره و اتلاف مطابقت دارد. همانطور که قبلاً بحث شد، مطلوب‌ترین خواص عملکردی شورتنینگ با حداقل مقادیر مدول ذخیره و اتلاف مطابقت دارد. جدول ۴ معیارهای بهینه‌سازی انتخاب شده و راه‌حل‌های به دست آمده را خلاصه می‌کند. این پاسخ‌ها در محدوده سطوح مورد مطالعه در نظر گرفته شده‌اند. تابع

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]
[DOI: 10.66224/nsft.21.2.73]

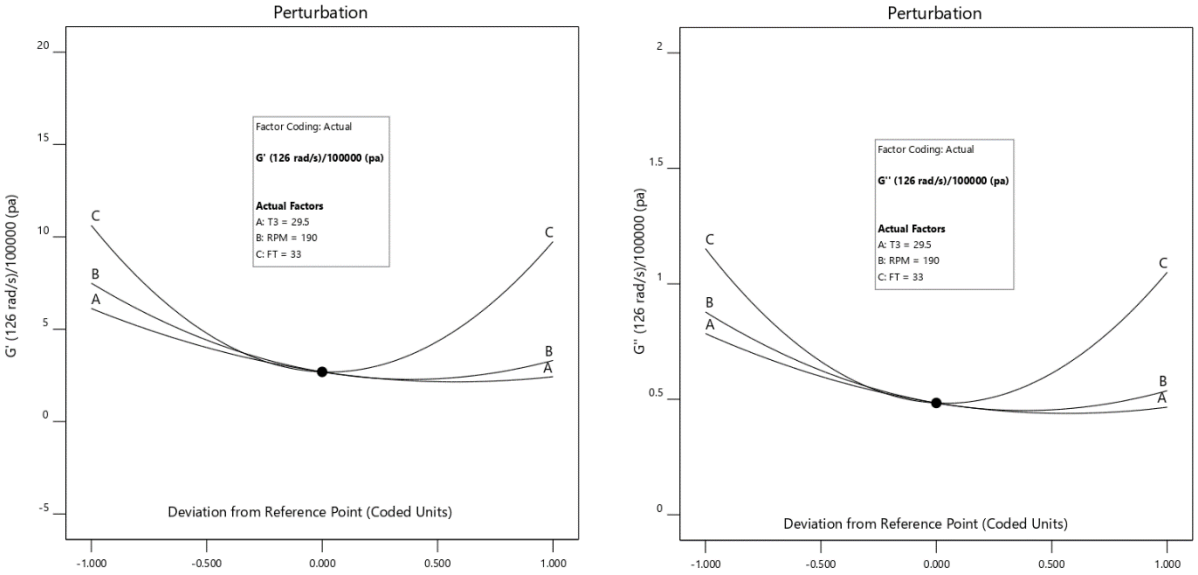
مطلوبیت Derringer نیز برای شرایط بهینه به شرح زیر محاسبه شد:

$$D = \sqrt[m]{d_1 d_2 \dots d_m}$$

معادله ۱. تابع مطلوبیت درینگر

جایی که m و d به ترتیب تعداد پاسخ‌های مورد مطالعه در فرآیند بهینه‌سازی و تابع مطلوبیت فردی هر پاسخ را بیان می‌کنند. تابع مطلوبیت درینگر (D) می‌تواند از ۰ تا ۱ متغیر باشد، که در آن مقداری بیشتر از ۰/۷ نشان می‌دهد که ترکیب معیارهای مختلف بهینه است (۱۹، ۱۸).

نتایج بهینه‌سازی با انجام سه تکرار برای هر پاسخ در شرایط بهینه اعتبارسنجی شد. از آزمون t زوجی برای مقایسه نتایج آزمایشی با نتایج پیش‌بینی شده با اعمال شرایط بهینه استفاده شد (جدول ۴). همانطور که نشان داده شده است، تفاوت‌های غیرمعنادار بین نتایج آزمایشی و پیش‌بینی شده دلالت بر اعتبار نتایج بهینه دارد.



شکل ۴. مدول ذخیره (G') و مدول اتلاف (G'') در فرکانس زاویه‌ای ۱۲۶ رادیان بر ثانیه، در دمای پرکن ۳۳ درجه سلسیوس

نتیجه‌گیری

ویژگی‌های رئولوژیک، عملکردی و حسی شورتنینگ ها به دلیل علاقه فزاینده به رابطه بین پارامترهای تبلور، رئولوژی و خواص عملکردی این محصولات در مطالعات مختلفی گزارش شده است. با این حال، اثرات پارامترهای فرآیند تبلور عمدتاً ناشناخته باقی مانده است. مطالعه حاضر عمدتاً با هدف تعیین تأثیرات چیدمان و پارامترهای تبلور بر شورتنینگ حاصل انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که اصلاح پارامترهای منتخب فرآیند تبلور می‌تواند مدول‌های ذخیره و اتلاف یک مخلوط چربی را تغییر دهد. جالب توجه است که مدول‌های ذخیره و اتلاف الگوهای مشابهی را در پاسخ به تغییرات در پارامترهای تبلور نشان دادند. اعمال معیارهای مطلوب منجر به مقادیر بهینه ۳۰/۴ درجه سانتی‌گراد، ۲۲۸ و ۳۳/۱ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای دمای خروجی مرحله سوم سردکن، شدت ورزدهی و دمای پرکن شد. اعتبارسنجی عوامل بهینه شده نقش حیاتی رویکردهای مشابه را در درک، مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار رئولوژیکی شورتنینگ‌های مختلف برجسته می‌سازد.

سپاس‌گزاری

نویسندگان با تشکر از حمایت‌های شرکت تولیدی مارگارین قدردانی می‌کنند.

References

1. Sharifi M, Ghiasi F, Zare M, Hedayati S, Abbasi A. Production of bigel based on κ-carrageenan and monoglyceride for potential application as a shortening replacer in cookie. Food Hydrocolloids. 2025;164:111160.
2. Mazaheri Y, Azadmard-Demirchi S, Torbati M. Shortening blends. Edible Oil Blends: Elsevier; 2026. p. 357-76.
3. Naeli MH, Milani JM, Farmani J, Zargaraan A. Developing and optimizing low-saturated oleogel shortening based on ethyl cellulose and hydroxypropyl

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]
[DOI: 10.66224/nsft.21.2.73]

methyl cellulose biopolymers. Food Chemistry. 2022;369:130963.

4. Saghafi Z, Naeli MH, Tabibiazar M, Zargaraan A. Zero-trans cake shortening: Formulation and characterization of physicochemical, rheological, and textural properties. Journal of the American Oil Chemists' Society. 2018;95(2):171-83.
5. Mao Y, Zheng Y, Xie R, Tan C-P, Wang Y, Zhang Z. Effects of acyl migration of sn-1, 3 diacylglycerol on the crystallization behaviors and physical property stabilities of binary fat systems. Food Chemistry. 2025;477:143566.
6. Litwinenko J, Rojas A, Gerschenson L, Marangoni A. Relationship between crystallization behavior, microstructure, and mechanical properties in a palm oil-based shortening. Journal of the American oil chemists' society. 2002;79(7):647-54.
7. Hakimzadeh V, Mahjoob R, Farmani J. Production and evaluation of physicochemical and rheological properties of sorbitan mono-stearate and sorbitan tri-stearate based Oleogels as low SFA shortening. Authorea Preprints. 2020.
8. Sabirova N, Usmonova S, Giyasova F. DEVELOPMENT OF NEW TYPES OF SHORTENINGS, COMPOSITION AND STUDY OF CHARACTERISTICS. AMERICAN JOURNAL OF EDUCATION AND LEARNING. 2024;2(4):682-7.
9. 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. Journal of Food Engineering. 2021;291:110245.
10. da Silva TLT, Martini S. A review of the use of scraped surface heat exchangers to crystallize fats and fat-based products. Journal of the American Oil Chemists' Society. 2024;101(2):151-72.
11. Haighton A. Margarine oil formulation and control. Journal of the American Oil Chemists' Society. 1969;46(10):570-.
12. Masuchi MH, Gandra KM, Marangoni AL, de Sá Perenha C, Chiu MC, Grimaldi R, et al. Fats from chemically interesterified high-oleic sunflower oil and fully hydrogenated palm oil. Journal of the American Oil Chemists' Society. 2014;91(5):859-66.
13. Alexandersen KA, Ghazani SM, Marangoni AG. Margarine processing plants and equipment. Bailey's industrial oil and fat products. 2005:1-64.
14. Humphrey K, Moquin P, Narine S. Phase behavior of a binary lipid shortening system: from molecules to rheology. Journal of the American Oil Chemists' Society. 2003;80(12):1175-82.
15. Ramos-Ramos MR, Cevallos Velastegui LP, García Londoño VA, Aguirre-Calvo TR, Borroni V, Herrera ML. Beef tallow/high oleic sunflower oil shortenings produced by chemical interesterification optimized by response surface methodology (RSM): Effect of processing conditions on physical properties. Journal of the American Oil Chemists' Society. 2025;102(3):569-86.
16. Lee J, Marsh M, Martini S. Effect of storage time on physical properties of sonocrystallized all-purpose shortening. Journal of Food Science. 2020;85(10):3391-9.
17. Bell A, Gordon M, Jirasubkunakorn W, Smith K. Effects of composition on fat rheology and crystallisation. Food Chemistry. 2007;101(2):799-805.
18. Bezerra MA, Santelli RE, Oliveira EP, Villar LS, Escaleira LA. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. Talanta. 2008;76(5):965-77.
19. Ramsay A, Fliniaux O, Fang J, Molinie R, Roscher A, Grand E, et al. Development of an NMR metabolomics-based tool for selection of flaxseed varieties. Metabolomics. 2014;10(6):1258-67.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.66224/nsft.21.2.73]

Modeling and Optimization of the Shortening Crystallization Process: Predicting Rheological and Functional Behavior Based on Cooling and Kneading Parameters

Ameli M[1], Roufegarinejad L[2], Zargaraan A*[3], Zayeri F[4]*

1.Department of Food Science and Technology, Tabriz branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

*2. *Corresponding authors: Department of Food Science and Technology, Tabriz branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran Email: l.roufegari@iaut.ac.ir*

*3.*Corresponding authors: Department of Food and Nutrition Policy and Planning Research. National Nutrition and Food Technology Research Institute. Faculty of Nutrition and Food Science. Shahid Beheshti University of Medical Sciences and Health Services, Email: aziz.zargaran@gmail.com*

4. Proteomics Research Center and Department of Biostatistics, Faculty of Allied Medical Sciences, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received 7 Jan, 2026 **Accepted 18 Mar, 2026**

Background and Objectives: This study aimed to optimize fat shortening production and evaluate the effects of cooling rate and kneading on its rheological properties.

Materials and Methods: The outlet temperature of the third cooler stage (28-31°C), kneading rate (100-280 rpm), and filling temperature (30-36°C) were selected as key crystallization parameters. The Box-Behnken design and a quadratic model were employed for the experimental design and modeling, respectively. Rheological tests were performed on 17 samples with different crystallization factors. The cooling and kneading rates were varied to investigate changes in frequency sweep and strain sweep parameters.

Results: The optimal crystallization parameters—an outlet temperature of 31°C (third stage), a kneading rate of 280 rpm, and a filling temperature of 33°C—yielded the best functional characteristics, with storage modulus (G′) and loss modulus (G″) values at their minimum levels.

Conclusion: This study provides valuable predictive insights into the effects of process conditions on shortening characteristics under various scenarios. It can guide adjustments in production processes to achieve desirable product attributes tailored to consumer needs.

Keywords: Shortening, Cooling Rate, Kneading Rate, Rheology, Crystallization, Experimental Design

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.66224/nsft.21.2.73]