



بهینه سازی ویژگی‌های حسی و بررسی خواص رئولوژیکی دسر لبنی کم کالری حاوی شیرین کننده سوکرالوز-سوربیتول با روش طرح آمیخته دی اپتیمال

لیلا حسینی پور^۱، بابک قنبرزاده^۲، وحید مفید^۳، مصطفی سلطانی^۴ و هدایت حسینی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۷

^۱ دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده داروسازی، علوم پزشکی تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

^۲ استاد علوم و صنایع غذایی گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۳ به ترتیب استادیار و استاد گروه صنایع غذایی، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی

^۴ استادیار علوم و صنایع غذایی گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده داروسازی، علوم پزشکی تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

*مسئول مکاتبه: E mail: Ghanbarzadeh@tabrizu.ac.ir

چکیده

با توجه به گسترش مصرف دسرهای لبنی و بالا بودن میزان قند این فرآورده‌ها، و از طرفی ارتباط مستقیم مصرف قند با بیماری‌هایی مانند چاقی، دیابت و امراض قلبی عروقی، تولید دسرهای لبنی با استفاده از شیرین کننده‌های کم کالری می‌تواند از نظر تغذیه‌ای بسیار مهم باشد. از طرفی با توجه به نقش مهم قندها در خصوصیات حسی، آب اندازی و بافتی دسر، جایگزینی آنها با شیرین کننده‌های کم کالری دشوار است. هدف از این پژوهش بهینه‌سازی فرمولاسیون دسر لبنی کم کالری با روش طرح آمیخته دی اپتیمال با استفاده از شیرین کننده کم کالری سوکرالوز-سوربیتول در ترکیب با شیرین کننده‌های قندی رایج یعنی ساکارز و شربت فروکتوز بود. نتایج این تحقیق نشان داد که شکر (ساکارز) را می‌توان تا حد زیادی با شیرین کننده کم کالری سوکرالوز-سوربیتول، بدون ایجاد عیب در ویژگی‌های مختلف حسی بافتی جایگزین نمود و فرمولاسیون بهینه حاوی شیرین کننده متشکل از ۹/۲ درصد ساکارز، ۳/۹ درصد شربت فروکتوز و ۸۱/۵ درصد شیرین کننده سوکرالوز-سوربیتول به دست آمد. آزمون‌های رئومتری نوسانی و پایا بر روی چهار نمونه شامل دسر حاوی ۱۰۰٪ ساکارز، دسر حاوی ۱۰۰٪ فروکتوز و دسر حاوی ۱۰۰٪ شیرین کننده سوکرالوز-سوربیتول و دسر بهینه کم کالری انجام شد. نتایج نشان داد بالاترین ویسکوزیته ظاهری و بالاترین درجه سودوپلاستیسیته مربوط به نمونه بهینه بود. داده‌های تنش برشی-سرعت برشی در مدل‌های هرشل بالکلی، کراس و کارائی برآزش شدند و پارامترهای مدل‌ها به دست آمد. در آزمون رئومتری نوسانی، در تمامی گستره فرکانس، مدول ذخیره بیشتر از مدول افت و وابستگی به فرکانس جزئی بود که نشان‌دهنده رفتار ژل قوی می‌باشد. همچنین، نمونه بهینه مدول‌های ویسکوالاستیک بالاتری نسبت به نمونه‌های دیگر داشت.

واژگان کلیدی: دسر لبنی کم کالری، بهینه‌سازی، رئولوژی، خواص حسی، طرح آمیخته دی اپتیمال

مقدمه

دسرهای لبنی به دلیل مقبولیت حسی، مصرف بالایی در بین گروه‌های سنی مختلف دارند. در فرمولاسیون دسرهای لبنی موجود در بازار، ۱۰ تا ۱۲ درصد شکر مورد استفاده قرار می‌گیرد. رایج‌ترین قندهای مورد استفاده برای تولید محصولات شیرین ساکارز (شکر) و شربت فروکتوز هستند. قند ساکارز (شکر) دارای شاخص گلیسمی بالا بوده مصرف زیاد آن با بیماری‌ها از جمله بیماری قلبی، عروقی و دیابت در ارتباط است و به طور کلی مصرف کمتر آن برای تولید محصولات غذایی سالم‌تر بسیار توصیه می‌شود. از آنجایی که قندها نقش مهمی نه تنها در طعم بلکه در بافت، رنگ و خصوصیات شیمیایی محصولات غذایی دارد جایگزینی کامل آنها در مواد غذایی موجب بروز مشکلاتی در ویژگی‌های حسی و رئولوژیکی می‌شود (مک کین و همکاران ۲۰۱۸). بنابراین وقتی ترکیبات قندی در محصولی حذف یا کاهش پیدا می‌کند باید توسط ترکیبات دیگری ویژگی‌های مطلوب در آن ایجاد گردد. استفاده از شیرین‌کننده‌های کم‌کالری و شدت بالا^۱ یکی از مهمترین روش‌های کاهش یا حذف شیرین‌کننده‌های قندی در محصولات غذایی است ولی این شیرین‌کننده‌ها نمی‌توانند نقش‌های مهم قندها در ایجاد بافت، رئولوژی و رنگ را ایفا کنند (موناکو و همکاران ۲۰۱۸). در چنین محصولاتی می‌توان از عوامل حجم‌دهنده که به عنوان یک پرکننده عمل کرده و خصوصیات فیزیکی قند را باز تولید می‌کنند ولی شیرینی و کالری‌زایی آن را ندارند به همراه شیرین‌کننده کم‌کالری استفاده نمود (جایاراج و همکاران ۲۰۱۸). در تولید خامه قنادی شکلاتی رژیمی با قند جایگزین استویا و سوکرالوز به عنوان شیرین‌کننده جایگزین قند به همراه اینولین به عنوان بافت‌دهنده استفاده شد که سوکرالوز در ارزیابی حسی بالاترین امتیاز را کسب کرد (ابراهیمی و همکاران ۱۳۹۷). در انتخاب شیرین‌کننده‌های جایگزین قند، علاوه بر تامین خصوصیات حسی و بافتی،

نداشتن پس طعمی و یا بد طعمی، غیر سمی بودن، پایدار بودن از نظر شیمیایی و قیمت آنها نیز حائز اهمیت است. شیرین‌کننده‌های موجود در بازار ممکن است به تنهایی تمامی این خصوصیات را نداشته باشند لذا با استفاده از ترکیبی از شیرین‌کننده‌ها می‌توان این محدودیت‌ها را برطرف کرد. یکی از مهم‌ترین شیرین‌کننده‌هایی که در محصولات لبنی کم‌کالری مانند ماست، شیر طعم‌دار و بستنی مورد استفاده قرار می‌گیرد، سوکرالوز است که طعم بسیار نزدیکی به ساکارز داشته و فاقد پس طعمی است (شانکار و همکاران ۲۰۱۳). سوکرالوز تنها شیرین‌کننده بدون کالری است که از شکر مشتق می‌شود و ۶۰۰ بار از شکر شیرین‌تر است. جایگزینی ۳ مولکول کلر سبب می‌گردد که سوکرالوز همانند شکر قابل شکستن و متابولیزه شدن نباشد. بنابراین بدون تغییر و بدون جذب از بدن دفع شده و ماده‌ای خنثی و ایمن در نظر گرفته می‌شود (گروتز و همکاران ۲۰۰۹). از آنجا که سوکرالوز دارای وزن مولکولی پایین است و در مقادیر بسیار کم در فرمولاسیون استفاده می‌شود و نمی‌تواند خصوصیات بافتی و حسی ساکارز را به تنهایی تامین کند می‌توان بصورت بالقوه از سوربیتول در کنار سوکرالوز به صورت ترکیبی استفاده کرد. سوربیتول یک قند الکلی ۶ کربنه است که در بدن انسان به آهستگی متابولیزه می‌شود. از احیای گلوکز با جایگزینی گروه هیدروکسیل به جای گروه آلدهید حاصل می‌شود. قدرت شیرین‌کنندگی سوربیتول ۰/۶ ساکارز است و در برخی میوه‌ها مانند آلوسیا، سیب، گلابی و هلو وجود دارد. این ماده به عنوان یک جایگزین برای شکر در غذاهای کم‌کالری و بدون قند، محصولات بهداشتی نظیر خمیردندان و آدامس استفاده می‌شود (شیت و همکاران ۲۰۱۴).

بهینه‌سازی فرمولاسیون را می‌توان با تکنیک‌های آماری از جمله طرح آمیخته، که برای به حداقل رساندن تعداد آزمایشات استفاده می‌شود، بدست آورد. طرح آمیخته یک روش موثر برای مطالعه حالتی است که متغیرهای

^۱ . High Intensity

فروکتوز در دسر لبنی و بهینه سازی ویژگی های حسی و آب اندازی فرآورده، با استفاده از روش طرح آمیخته بود. نهایتاً ویژگی‌های رئولوژیکی دسرهای مختلف بررسی شد و در انواع کم کالری و حاوی قند مقایسه شد و برخی مدل‌های رئولوژی با دسر بهینه‌سازی شده برآزش شد.

مواد و روش‌ها

ترکیبات ثابت فرمولاسیون که شامل شیر بدون چربی، شیر خشک بدون چربی، نشاسته، خامه ۴۰٪ چربی، کاپا کاراگینان، شربت فروکتوز و شکر است، همگی از شرکت فرآورده‌های لبنی دومینو تامین شد. پودر سوربیتول از شرکت (ZHEJIANG) و سوکرالوز از شرکت (JK Sucralose Inc) کشور چین تهیه شد.

آماده‌سازی نمونه‌ها: به منظور تهیه دسر، ابتدا تمامی اجزای پودری ثابت از جمله شیر خشک بدون چربی (۲٪)، نشاسته (۳٪) و کاپاکاراگینان (۰/۵٪) برای جلوگیری از کلوخه شدن و حل شدن بهتر با هم ترکیب شدند. سپس با استفاده از دستگاه ترمومیکس اجزای پودری در شیر بدون چربی (۷۱/۵٪) و خامه ۴۰٪ چربی (۱۰٪)، در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ دقیقه حل شدند و پس از اضافه کردن شیرین‌کننده‌ها (معادل قدرت شیرین‌کنندگی ۱۳٪ شکر) مطابق جدول ۱ به مدت ۳۰ دقیقه با دور ۳۵۰ rpm در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد حل شدند و در نهایت در دمای ۷۳ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ ثانیه پاستوریزاسیون انجام شد و بلافاصله در ظرف‌های ۱۰۰ گرمی بسته‌بندی و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ روز نگهداری شدند.

روش تهیه محلول شیرین‌کننده سوکرالوز-سوربیتول: قبل از تولید دسر، با انجام پیش‌آزمون، درصد‌های مختلفی از سوکرالوز (از ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۶) در محلول ۲۰٪ سوربیتول (۲۰ گرم سوربیتول را وزن نموده و با آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی لیتر رسانده و حل شد) تهیه گردید و نمونه‌ای که معادل شیرین‌کننده‌گی محلول ۲۰٪

متعددی مانند اجزای فرمولاسیون بر خواص کیفی محصول موثر هستند. با توجه به این که در این پژوهش از چند شیرین‌کننده به طور همزمان استفاده می‌شود، به منظور بدست آوردن بهترین نسبت شیرین‌کننده‌ها و بهینه‌سازی فرمولاسیون و همچنین بررسی اثرات متقابل شیرین‌کننده‌ها بر هم و بر خصوصیات حسی و رئولوژیکی دسر نهایی با کمترین هزینه و تعداد آزمایشات از روش طرح آمیخته استفاده شد (شاین و همکاران ۲۰۱۵). دی اپتیمال یکی از روش‌های طرح آمیخته است که واریانس مربوط به ضرایب مدل‌های پیش بینی شده را به حداقل می‌رساند و با طراحی ساده، تعداد آزمایشات کمتر، اطلاعات کافی، دقت پیش بینی بالا و بهینه‌سازی همزمان چند هدف را مشخص می‌نماید (مانارسوامی و همکاران ۲۰۱۰). فورلان و همکاران (۲۰۱۷)، اثر استفاده همزمان استویا و سوکرالوز به عنوان جایگزین قند بر خواص فیزیکوشیمیایی دسر لبنی را بررسی کردند و از روش طرح آمیخته برای بررسی اثر استفاده از ترکیب سوکرالوز و استویا به صورت مجزا و همزمان بر خواص دسر استفاده کردند. نتایج نشان داد که قند را می‌توان با ترکیب استویا و سوکرالوز جایگزین کرد و چربی را نیز می‌توان تا حدی با اینولین جایگزین نمود. نتایج رفتار جریان و پارامترهای ویسکوالاستیک در بین نمونه‌ها متفاوت بود و بالاترین ویسکوزیته و ضریب قوام برای نمونه‌های حاوی ۱۰۰٪ استویا و ۵۰٪ سوکرالوز بود و بیشترین مقبولیت حسی مربوط به نمونه حاوی ۵۰٪ استویا و ۵۰٪ سوکرالوز بود که با نمونه کنترل حاوی ۱۰۰٪ قند اختلاف معناداری در سطح ($p < 0/05$) نداشت. کاهش میزان سینرزیس و افزایش قوام در اثر استفاده از جایگزین چربی نیز بخشی از نتایج بود (فورلان و همکاران ۲۰۱۷). هدف از این پژوهش، بررسی مقایسه ای استفاده از شیرین‌کننده کم کالری ترکیبی سوکرالوز-سوربیتول به عنوان یک جایگزین برای ساکارز و شربت

ساکارز (۲۰ گرم ساکارز را وزن نموده و با آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی لیتر رسانده و حل شد) را داشت به روش ارزیابی حسی تعیین گردید و در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت.

طراحی آزمایش

برای رسیدن به بهترین درصد شیرین‌کننده در فرمولاسیون و بررسی اثر استفاده از شیرین‌کننده‌های جایگزین به صورت مجزا و ترکیبی بر روی خصوصیات حسی دسر، نرم افزار Design expert (7.1.5) استفاده شد. در این مطالعه روش طرح آمیخته D اپتیمال با ۳ متغیر و ۲ سطح برای بهینه‌سازی و رسیدن به مدل چند

جمله‌ای مورد استفاده قرار گرفت. متغیرهای موجود عبارت است از ساکارز (A)، فروکتوز (B)، سوکرالوز-سوربیتول (C). نسبت متغیرها در مخلوط بر اساس درصد محاسبه شده است بطوریکه مجموع هر سه ۱۰۰٪ بود. پاسخ‌ها (متغیرهای وابسته) شامل آب‌اندازی (Y₁)، بافت (Y₂)، طعم (Y₃)، عطر (Y₄)، ظاهر (Y₅)، شیرینی (Y₆) و پذیرش کلی (Y₇) بود. ۱۶ فرمولاسیون (ران) پیشنهاد داده شده از نرم افزار Design expert که شامل نمونه‌های شاهد (حاوی ۱۰۰٪ از یک نوع) نیز هست در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- درصد ترکیبات تشکیل دهنده شیرین‌کننده (متغیرهای مستقل) و پاسخ‌های آزمون‌های آب‌اندازی و ارزیابی حسی

(بافت، طعم، عطر، حالت ظاهری، شیرینی و پذیرش کلی) در روش طرح آمیخته دی اپتیمال

Table 1- Percentage of sweetener components and responses of syneresis and sensory evaluation (texture, taste, aroma, appearance, sweetness & overall) in D-optimal mixture design

	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇
Run	sucrose	Fructose	sweetener	Syneresis	Texture	Taste	aroma	appearance	Sweetness	Overall
1	41.7	41.629	16.671	0.081	3.91	3.69	3.39	3.8	3.41	3.6
2	50	0	50	0.21	2.67	2.74	3.2	2.53	3.75	3.09
3	100	0	0	0.071	2.21	2.23	1.6	2.4	1.91	1.99
4	66.7	16.65	16.65	0.087	3.33	3.1	2.3	3.4	3.21	2.99
5	0	50	50	0.23	4.6	3.9	2.6	4.2	2.33	3.36
6	50	0	50	0.21	2.67	2.74	3.54	2.5	4.07	3.26
7	0	100	0	0.14	2.17	2.15	1.8	2.3	2	2.03
8	16.7	66.62	16.68	0.12	3.48	3.47	2.67	3.6	2.8	3.11
9	50	50	0	0.13	3.44	3.8	3.8	3.52	3.8	3.71
10	16.7	16.68	66.62	0.22	3.47	3.86	3.39	3.9	3.72	3.61
11	0	50	50	0.23	3.14	2.8	2.25	3.7	2.33	2.63
12	100	0	0	0.071	2.21	2.23	1.56	2.43	1.91	1.98
13	0	0	100	0.36	4.5	4.5	4.42	4	4.76	4.55
14	0	0	100	0.36	4.5	4.5	4.42	4.6	4.76	4.55
15	33.3	33.35	33.35	0.09	3.99	3.66	3.14	3.9	3.35	3.54
16	0	100	0	0.16	2.17	2.15	2.07	2.4	2.08	2.12

آزمون آب‌اندازی

آب اندازی (سینرسیس) نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ مدل D-6360 ساخت آلمان اندازه‌گیری شد. برای این منظور، ۲۰ ml از نمونه‌های تازه تهیه شده را

در تیوپ‌های ۵۰ میلی‌لیتری ریخته و به مدت ۴ روز در یخچال با دمای ۴°C نگهداری شدند و سپس با دور rpm ۳۵۰۰ به مدت ۳۰ دقیقه سانتریفیوژ شدند. سپس میزان

➤ در این معادله η_a ، ویسکوزیته ظاهری (Pa.s)؛ η_∞ ویسکوزیته بی نهایت (Pa.s)؛ η_0 ویسکوزیته صفر (Pa.s)؛ α_c ، ثابت زمانی کراس، γ_c ، سرعت برشی (s^{-1})؛ m ، درجه روان شوندگی با برش می‌باشد.

$$\eta_a = \eta_\infty + \frac{(\eta_0 - \eta_\infty)}{[1 + (\alpha_c \gamma_c)^2]^N} \quad (4)$$

➤ در این معادله η_a ، ویسکوزیته ظاهری (Pa.s)؛ η_∞ ویسکوزیته بی نهایت (Pa.s)؛ η_0 ویسکوزیته صفر (Pa.s)؛ λ_c ، ثابت زمانی کارائی؛ γ_c ، سرعت برشی بحرانی (s^{-1})؛ γ ، سرعت برشی (s^{-1})؛ N ، درجه روان شوندگی با برش می‌باشد.

بررسی خواص رئولوژیکی وابسته به زمان (خواص تیکسوتروپیک)

این آزمون به منظور بررسی رفتار تیکسوتروپیک دسرها انجام گرفت. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها آزمون به صورت: اندازه‌گیری در ۱۶ نقطه در مرحله رفت در دامنه سرعت برشی $100-0.1 s^{-1}$ ، اندازه‌گیری در ۲ نقطه در مرحله استراحت با سرعت برشی $100 s^{-1}$ و اندازه‌گیری در ۱۶ نقطه در مرحله برگشت با دامنه سرعت برشی $100-0.1 s^{-1}$ ، انجام گرفت. مساحت بین منحنی رفت و برگشت که هیستریسیس یا پسماند نامیده می‌شود، با استفاده از نرم افزار Rheoplus/32 (version V3.40) محاسبه گردید (وانگ و همکاران ۲۰۱۶).

آزمون‌های جریانی نوسانی

آزمون روبش کرنش قبل از اندازه‌گیری پارامترهای ویسکوالاستیک، محدوده ویسکوالاستیک خطی با آزمون روبش کرنش تعیین شد. آزمون روبش کرنش در محدوده ۵۰٪-۰/۱، در فرکانس ۱ هرتز و دمای $25^\circ C$ برای تمامی نمونه‌ها انجام شد.

۲-۲-۵-۲-۲ آزمون روبش فرکانس

آزمون روبش فرکانس در محدوده فرکانس ۰/۱ تا ۵۰ هرتز و کرنش ثابت ۱٪ انجام شد. پارامترهای نوسانی از جمله مدول ذخیره (G')، مدول افت (G'')، تانژانت افت ($\tan \delta$) و ویسکوزیته کمپلکس (η^*) محاسبه گردید. تمامی آزمایشات در دمای $25^\circ C$ انجام شد.

آب‌اندازی نمونه‌ها از رابطه زیر محاسبه شد (اپرود و همکاران ۲۰۱۱).

$$\% \text{ سینرسیس} = \frac{\text{حجم آب آزاد شده}}{\text{حجم اولیه نمونه قبل از سانتریفوژ}} \times 100 \quad (1)$$

ارزیابی حسی

ارزیابی حسی نمونه‌ها توسط ۴۰ نفر مصرف کننده ۱۹ تا ۵۲ سال شامل ۱۸ مرد و ۲۲ زن انجام شد. نمونه‌ها قبل از انجام تست به مدت ۱ ساعت خارج از یخچال برای رسیدن به دمای محیط نگهداری شدند. نمونه‌ها به صورت تصادفی که با اعداد سه رقمی کدگذاری شده‌اند به همراه یک لیوان آب برای شستشوی دهان به ارزیاب‌ها داده شدند. مقیاس هدونیک ۵ طبقه ای از ۱ (بسیار ناخوشایند) تا ۵ (بسیار خوشایند)، برای اندازه‌گیری پذیرش ترجیح استفاده شد. همه نمونه‌ها از نظر ویژگی‌های حسی از جمله عطر، طعم، بافت، حالت ظاهری، شیرینی و پذیرش کلی مورد ارزیابی قرار گرفتند (جاوود و همکاران ۲۰۲۰).

بررسی خصوصیات رئولوژی

آزمون‌های جریانی پایا

خصوصیات رئولوژیکی نمونه‌های دسر با دستگاه رئومتر MCR-301 (Anton Paar GmbH, Graz, Austria) و پروب نوع مخروط و صفحه با قطر ۵۰ میلی‌متر و زاویه ۱ درجه و فاصله شکاف ۰/۰۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. مقادیر تنش برشی و ویسکوزیته ظاهری در سرعت‌های برشی ۰/۱ تا ۱۰۰ بر ثانیه اندازه‌گیری شد. سپس داده‌های تنش برشی-سرعت برشی توسط مدل‌های هرشل بالکی (معادله ۲-۱)، کراس (معادله ۲-۲) و کارائی (معادله ۲-۳) برازش شدند.

$$\sigma = k_H (\gamma')^{n_H} + \sigma_{0H} \quad (2)$$

➤ در این معادله σ ، تنش برشی (Pa)؛ γ' ، سرعت برشی (s^{-1})؛ k_H ضریب قوام هرشل- بالکی ($Pa \cdot s^n$)؛ n شاخص جریان (بدون بعد)؛ σ_{0H} ، تنش تسلیم (Pa) می‌باشد.

$$\eta_a = \eta_\infty + \frac{(\eta_0 - \eta_\infty)}{1 + (\alpha_c \gamma_c)^m} \quad (3)$$

آنالیز آماری

داده‌های رئولوژیکی توسط Rheoplus نرم افزار ویژه رئومتر Anton Paar Physica MCR 300 تجزیه و تحلیل گردید. برای تعیین پارامترهای مدل، کارایی مدل و مقایسه بین مدل‌های مختلف، ضریب تبیین R^2 و مربع خطای استاندارد که توسط RMSE (میانگین ریشه مربع خطا) نشان داده می‌شود، از نرم افزار Design Expert روش طرح آمیخته D اپتیمال استفاده شد.

بحث و نتیجه گیری

تجزیه و تحلیل طراحی آزمایش و اعتبار سنجی مدل مراحل آنالیز طرح های آمیخته و سطح پاسخ شامل چهار مرحله (الف، ب، ج و د) بصورت زیر انجام گرفت:

الف) تحلیل مدل رگرسیونی

شامل موارد زیر بود:

۱. تعیین کفایت مدل رگرسیونی بر اساس:

- معنی دار بودن مدل و معنی دار نبودن پارامتر عدم برازش

- مقادیر ضریب تبیین

۲. تعیین عوامل معنی دار و غیر معنی دار (عوامل

خطی، درجه دو و اثر متقابل)

۳. ارائه مدل رگرسیون ساده شده بر اساس ضرایب

رگرسیون عوامل معنی دار

ب) تحلیل منحنی ها

ج) تعیین فرمول بهینه از طریق دادن اهمیت نسبی و

تعیین محدوده برای پاسخ

د) تعیین اعتبار از طریق آزمایش تجربی فرمول بهینه و

مقایسه پاسخ تجربی با پاسخ پیش بینی شده توسط

رگرسیون

طرح آزمایشی استفاده شده در این مطالعه شامل سه

فاکتور با دو سطح به روش طرح آمیخته دی اپتیمال بود

که برای بررسی ارتباط و اثر شیرین کننده‌های ساکارز

(A)، فروکتوز (B)، سوکرالوز-سوربیتول (C) به عنوان

متغیرهای مستقل بر پاسخ‌های به دست آمده، شامل آب اندازی (Y_1)، بافت (Y_2)، طعم (Y_3)، عطر (Y_4)، ظاهر (Y_5)، شیرینی (Y_6) و پذیرش کلی (Y_7) به عنوان متغیرهای وابسته مورد استفاده قرار گرفت. با پیش آزمون، شربت حاوی ۰/۰۵ درصد سوکرالوز و ۲۰ درصد سوربیتول معادل شیرین کنندگی شربت حاوی ۲۰ گرم ساکارز تعیین شد و به عنوان شیرین کننده سوکرالوز-سوربیتول در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. تعداد ۱۶ آزمایش پیشنهاد شده توسط نرم افزار به صورت تصادفی انجام شد. لیست متغیرهای مستقل و وابسته و آزمایشات انجام شده به همراه نتایج بدست آمده در جدول ۱ آورده شده است. پس از انجام آزمون‌ها و تجزیه تحلیل نتایج ارزیابی حسی و آب اندازی مدل رگرسیونی مناسب، برای پاسخ‌ها انتخاب و برازش شد (جاوود و همکاران ۲۰۲۰).

شرایط معتبر بودن مدل با تجزیه تحلیل واریانس (Anova) برای تأیید اثر بخشی مدل رگرسیونی و تأثیر عوامل مختلف بر روی مدل بررسی شد. همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است مدل Special cubic برای نتایج آب اندازی و بافت و مدل Quadratic برای سایر پاسخ‌ها از نظر آماری معنی دار است ($p < 0.0001$). فقدان برازش^۲ غیر معنی دار بود ($p > 0.05$) و نشان‌دهنده مطابقت مدل‌ها با داده‌ها است. بالا بودن ضریب تبیین (R^2) نشان دهنده این است که ۰/۹۹، ۰/۸۶، ۰/۹۳، ۰/۹۵، ۰/۹۳، ۰/۹۵ و ۰/۹۶ از نتایج را می‌توان با مدل برای به ترتیب آب‌اندازی، بافت، طعم، عطر، ظاهر، شیرینی و پذیرش کلی توضیح داد. با در نظر گرفتن داده‌های جدول ۲ مدل ریاضی پیش‌بینی شده نسبت مخلوط شیرین‌کننده‌ها به صورت معادلات زیر بدست آمده است. تمامی مدل‌ها معادلات رگرسیونی چند جمله‌ای و درجه ۲ هستند. بر اساس معادلات بدست آمده و با توجه به بالا بودن ضریب اثر متقابل A و B می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده همزمان از این دو شیرین کننده ساکارز

² Lack of fit

و فروکتوز تاثیر بسزایی بر تمامی پاسخ‌ها بجز آب‌اندازی دارد.

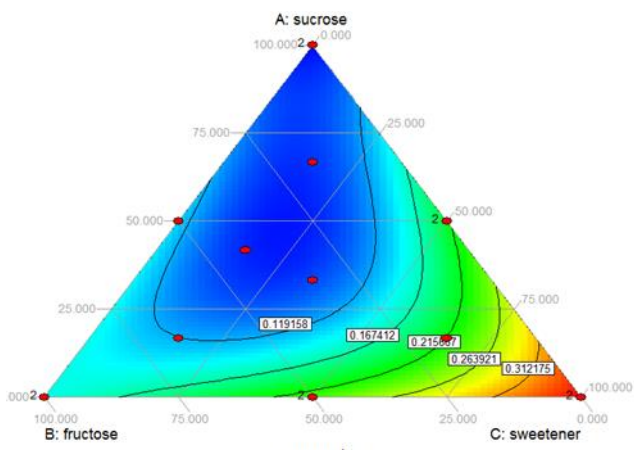
$$\begin{aligned} \text{syneresis} &= +0.071 A + 0.15 B + 0.36 C + 0.077 A B - 0.021 A C - 0.099 B C - 2.63 A B \\ \text{texture} &= 2.23 A + 2.15 B + 4.41 C + 6.43 A B - 2.34 A C + 2.47 B C \\ \text{taste} &= 2.20 A + 2.15 B + 4.50 C + 7.04 A B - 2.20 A C + 0.46 B C \\ \text{aroma} &= 1.52 A + 1.96 B + 4.44 C + 7.23 A B + 0.95 A C - 3.37 B C \\ \text{appearance} &= 2.42 A + 2.32 B + 4.27 C + 5.80 A B - 2.78 A C + 3.01 B C \\ \text{sweetness} &= 1.91 A + 2.05 B + 4.77 C + 6.85 A B + 2.10 A C - 4.46 B C \\ \text{overall} &= 1.97 A + 2.08 B + 4.54 C + 6.89 A B - 0.37 A C - 1.23 B C \end{aligned}$$

آنالیز واریانس

برای بررسی کارایی مدل‌های رگرسیونی سه پارامتر معنی دار مدل، غیر معنی دار بودن عدم برازش و مقادیر ضریب تبیین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

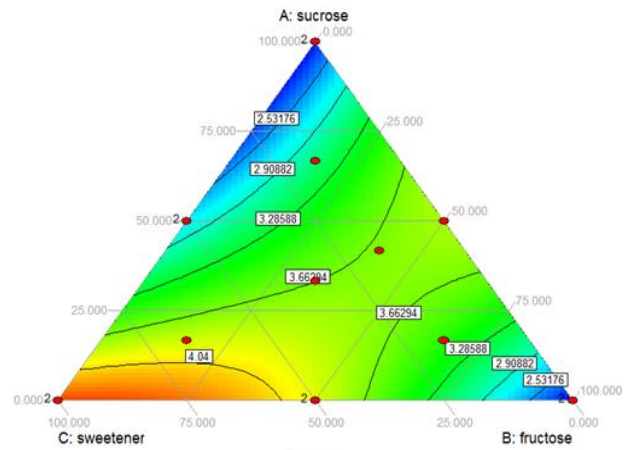
یکی از شروط کارایی و معتبر بودن مدل‌های رگرسیونی این است که مقادیر نسبت F معنی دار ($P < 0.05$) باشد. همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است برای تمامی پاسخ‌ها $P < 0.0005$ می‌باشد که نشان دهنده اعتبار بسیار بالای مدل‌های بدست آمده می‌باشد. یکی دیگر از شروط معتبر بودن مدل‌ها غیر معنی دار بودن فقدان برازش آنهاست ($P > 0.05$) و همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است برای تمامی پاسخ‌ها فقدان برازش غیر معنی دار است. بنابراین می‌توان اطمینان داشت که مدل‌های رگرسیونی برای هر ۷ پاسخ کارآمد بوده و می‌توان برای تجزیه و تحلیل نتایج آب‌اندازی (Y_1)، بافت (Y_2)، طعم (Y_3)، عطر (Y_4)، ظاهر (Y_5)، شیرینی (Y_6) و پذیرش کلی (Y_7) مورد استفاده قرار گیرند. ضریب تبیین (R^2)، ۰/۹۹ نشان دهنده این است که ۹۹ درصد نتایج را می‌توان با مدل تفسیر کرد و همانطور که مشاهده می‌شود برای تمامی پاسخ‌ها، ضریب تبیین بالا و نزدیک به عدد ۱ می‌باشد. همانطور که در مدل معادلات رگرسیونی مشاهده شد نتایج p -value بدست آمده برای AB در جدول آنالیز واریانس < 0.0001 می‌باشد که نشان‌دهنده این است که استفاده همزمان از ساکارز و شربت فروکتوز بیشترین تاثیر را بر روی بافت، طعم، عطر، حالت ظاهری و پذیرش کلی

دارد. $ABC < 0.001$ نشان‌دهنده اثرات متقابل معنی دار هر سه شیرین‌کننده گلوکز، فروکتوز و سوکرالوز-سوربیتول بر خصوصیات آب‌اندازی می‌باشد. و از آنجا که برای هر سه اثر متقابل AB، AC، BC برای پاسخ شیرین‌کنندگی، $P < 0.001$ بدست آمده است نشان‌دهنده انتخاب مناسب شیرین کننده کم کالری جایگزین است. تاثیر متغیرهای مستقل بر نتایج را می‌توان با نمودار کانتور مثلثی سه بعدی ۳-۱ تفسیر کرد. تقریباً در تمامی نمودارها با افزایش غلظت شیرین کننده C (سوکرالوز-سوربیتول) ویژگی‌های حسی از جمله بافت، طعم، عطر، شیرینی، خصوصیات ظاهری، و پذیرش کلی بهبود پیدا کرده است و فقط در رابطه با پاسخ آب‌اندازی نتایج عکس بوده است لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ترکیب شیرین کننده سوکرالوز-سوربیتول به تنهایی می‌تواند به عنوان جایگزین مناسب قند برای تولید دسر لبنی کم کالری باشد و برای جبران خصوصیات آب‌اندازی در نتایج بدست آمده از آنالیز واریانس، ترکیبی از هر سه شیرین‌کننده را مورد استفاده قرار داد.



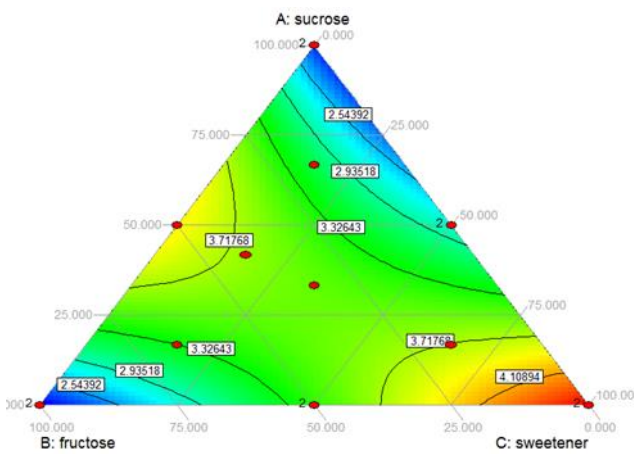
syneresis

Y_1



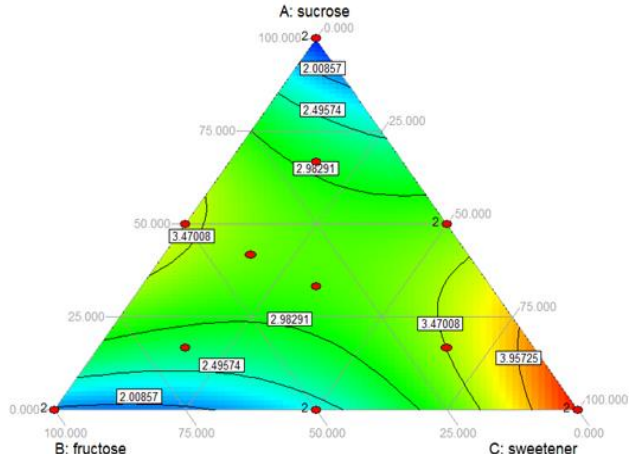
texture

Y_2



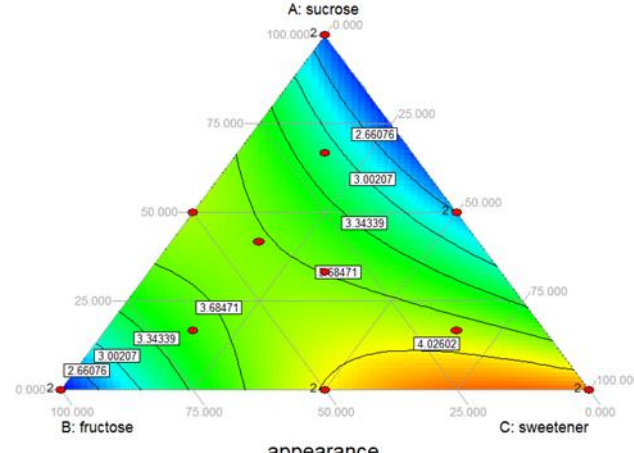
taste

Y_3



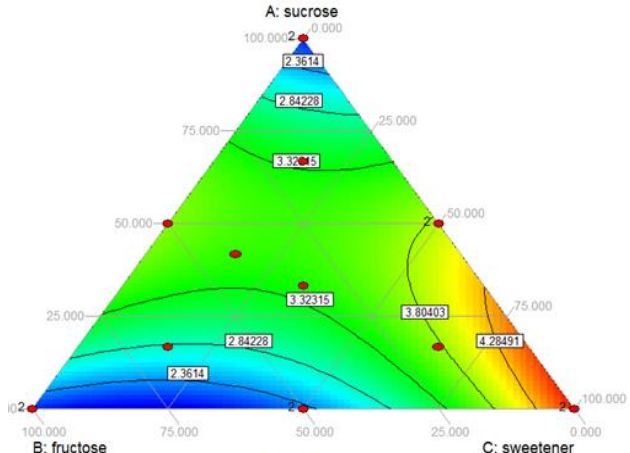
aroma

Y_4



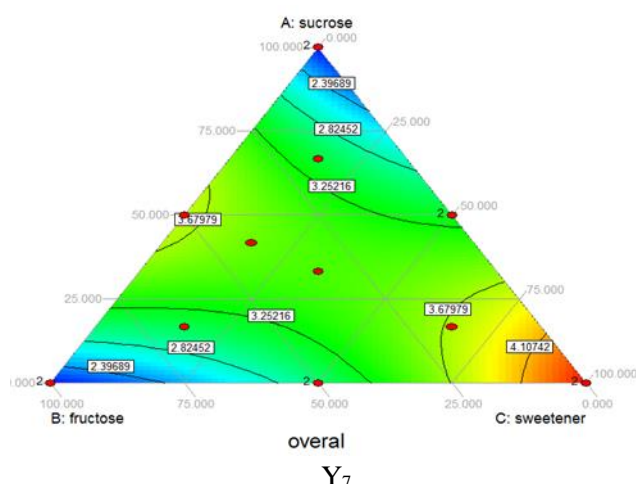
appearance

Y_5



sweetness

Y_6



شکل ۱- نمودار کانتور سه بعدی اثر غلظت شیرین کننده های ساکارز (A)، فروکتوز (B)، سوکرالوز-سوربیتول (C) بر آب اندازی (Y₁)، بافت (Y₂)، طعم (Y₃)، عطر (Y₄)، ظاهر (Y₅)، شیرینی (Y₆) و پذیرش کلی (Y₇)

Figure 1 - Three-dimensional contour diagram of the effect of sucrose (A), fructose (B), sucralose-sorbitol (C) sweeteners on hydration (Y₁), texture (Y₂), taste (Y₃), aroma (Y₄), appearance (Y₅), sweets (Y₆) and general acceptance (Y₇)

بهینه سازی

با هدف حداقل درصد ساکارز، حداقل میزان آب اندازی، بهترین بافت، بهترین طعم، بهترین عطر، بهترین حالت ظاهری، بیشترین شیرینی و بالاترین پذیرش کلی بهینه‌سازی فرمولاسیون انجام شد. فرمولاسیون بهینه سازی شده شامل ۹/۲ درصد A، ۹/۳ درصد B و ۸۱/۵ درصد C بدست آمد. به منظور بررسی اعتبار مدل، آزمایشات تکمیلی با سه تکرار شرایط بهینه پیش بینی شده انجام شد. نتایج بدست آمده از آزمایشات تجربی با پیش بینی شده اختلاف آماری معنی داری با هم نداشتند ($P < 0.05$)، لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد مدل پیش بینی شده از کفایت و تکرار پذیری مناسبی برخوردار بوده و فرمولاسیون بهینه سازی شده بدست آمده را می‌توان به عنوان فرمول شیرین کننده کم کالری جایگزین قند معرفی نمود.

اثرات اجزای فرمولاسیون و بهینه سازی آنها

همانطور که در نمودار کانتور سه بعدی Y₁ شکل ۱ مشاهده می‌شود، در غلظت ثابت سایر شیرین کننده ها، با افزایش غلظت C از ۰ تا ۰/۲۵ آب اندازی کاهش و با افزایش غلظت آن از ۰/۲۵ تا ۱ آب اندازی به صورت

چشمگیری افزایش می‌یابد. در خصوص شیرین کننده B با افزایش غلظت از ۰ تا ۳۳٪ آب اندازی کاهش و سپس ثابت می‌ماند. افزایش مقادیر آب اندازی ممکن است به دلیل تشکیل مجدد یا رتروگراداسیون مولکول‌های نشاسته باشد که منجر به آزاد شدن آب در طول مدت نگهداری سرد می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود جایگزینی جزئی با شیرین کننده C باعث کاهش و جایگزینی کامل آن باعث افزایش آب اندازی که ممکن است به دلیل تغییر در ساختار و پایداری ژل باشد. شیرین کننده A نیز با افزایش غلظت از ۰ تا ۳۳٪ رفتاری مشابه B داشته و در ادامه با افزایش غلظت تا ۱ تا حدودی افزایش یافته است (فورلان و همکاران ۲۰۱۷). مطابق با شکل ۱ نمودار Y₂ با افزایش غلظت C از سطح پایین به بالا خصوصیات بافتی بدست آمده ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد، با افزایش غلظت A میانگین امتیازهای داده شده برای بافت کاهش یافته و با افزایش غلظت B نمودار ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. با توجه به امتیازدهی پانلیست‌ها بر اساس پذیرش بافت، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از شیرین کننده ترکیبی سوکرالوز-سوربیتول در مقادیر بالا به همراه

n_H در تمامی نمونه‌ها کمتر از ۱ بود و در نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب ۰/۴۲۴، ۰/۲۷۶، ۰/۵۱ و ۰/۱۲۳ بود که نشان‌دهنده رفتار سودوپلاستیک در آنها بود. کمترین مقدار n_H برای دسر بهینه‌سازی شده بدست آمد که نشان‌دهنده بالاتر بودن درجه سودوپلاستیسیته نمونه بهینه‌سازی شده است. در تحقیقی مشابه که ابوجدیل و همکاران (۲۰۰۴)، اثر شیرین‌کننده‌ها را روی سیستم‌های بر پایه نشاسته، شیر و قند مورد بررسی قرار دادند. خمیرهای نشاسته‌ای حاوی انواع قند، رفتار پلاستیک غیربینگهام (سودوپلاستیک با تنش تسلیم) را نشان دادند که توسط مدل هرشل بالکی قابل توصیف بود. در نمونه‌های رژیمی افزودن مقدار مساوی از سوربیتول- فروکتوز، باعث کاهش شدیدی در مقدار شاخص جریان گردید. به طور خلاصه می‌توان گفت که جایگزینی ساکارز با قندهای فروکتوز و سوربیتول، باعث کاهش n_H در تمامی نمونه‌ها و افزایش K_H گردید. که با نتایج بدست آمده در این تحقیق مطابقت دارد. یکی دیگر از مدل‌هایی که رفتار سیالات سودوپلاستیک در سطح گسترده مورد بررسی قرار می‌دهد، مدل کراس است که ویسکوزیته صفر و بینهایت را نیز در داخل خود دارد. ویسکوزیته صفر یک شاخص میکروسکوپی از ساختار طبیعی بیوپلیمر است (هوانگ و همکاران ۲۰۱۶) و هرچقدر بالاتر باشد، بیانگر حضور مقدار زیادی پیوندهای ملکولی در بیوپلیمر است که بستگی به وزن ملکولی و برهمکنش‌های بین ملکولی دارد. ویسکوزیته صفر بدست آمده برای دسر بهینه‌سازی شده در مقایسه با سایر نمونه‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرده است. هرچقدر ویسکوزیته صفر بالاتر باشد، بیانگر حضور مقدار زیادی پیوندهای ملکولی در بیوپلیمر است که بستگی به وزن ملکولی و برهمکنش‌های بین ملکولی دارد (تورس و همکاران ۲۰۱۴). احتمالاً به دلیل تنوع بیشتر شیرین‌کننده‌های موجود در دسر بهینه‌سازی شده، برهم‌کنش و اثرات متقابل آنها با اجزای دسر منجر به افزایش قوام و رفتار

بالا بودن ویسکوزیته دسر شماره ۲ احتمالاً به دلیل بالا بردن سریع ویسکوزیته نشاسته، توسط فروکتوز است چراکه فروکتوز میزان گرمای مورد نیاز برای ژلاتینه شدن را کاهش می‌دهد و در نهایت دسر بدست آمده ویسکوزیته بالاتری را نشان می‌دهد (ابوجدیل و همکاران ۲۰۰۴).

به منظور بررسی بیشتر اثر شیرین‌کننده‌ها بر رفتار رئولوژیکی دسر، داده‌های حاصل از این آزمون توسط مدل‌های هرشل-بالکی، کراس و کارائی برآزش شدند. خلاصه پارامترهای مربوط به مدل‌های برآزش شده در جدول ۳ آورده شده است. در مدل قانون توان، مقدار ضریب تبیین (R^2) در همه نمونه‌ها پایین بود و مقدار RMSE بالا بود که نشان‌دهنده برآزش پایین این مدل جهت توصیف رفتار رئولوژیکی نمونه‌ها بود. از این رو داده‌های مربوط به این مدل گزارش نشد. مدل هرشل-بالکی علاوه بر مطالعه سیالات سودوپلاستیک، رفتار سیالات پلاستیک را هم ارزیابی می‌کند، ضریب قوام (K_H)، معیاری از ویسکوز بودن محلول است و در مقایسه با مدل قانون توان، شاخص تنش تسلیم (σ_{0H}) به آن اضافه شده است. در این مدل مقدار R^2 در تمامی نمونه‌ها بالای ۰/۹۸ و مقدار RMSE در محدوده ۱/۸-۰/۷۷ بدست آمد که نشان‌دهنده برآزش مناسب داده‌ها با این مدل است. مقدار ضریب قوام (K_H)، برای نمونه شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب $11/22$ ، $45/24$ ، $8/34$ و $57/7$ بدست آمده است. بیشترین ضریب قوام مربوط به دسر بهینه‌سازی شده است. بالا بودن ضریب قوام دسر بهینه‌سازی شده یا به دلیل مقادیر بالای سوربیتول در آن و یا احتمالاً به دلیل حضور شیرین‌کننده‌های مختلف در کنار هم و اثر متقابل آنها با هم و ترکیبات تشکیل دهنده دسر مانند نشاسته و پروتئین‌های شیر است که باعث ایجاد شبکه پیچیده‌تر ژلی شده است (تورس و همکاران ۲۰۱۳). شاخص جریان در مدل هرشل بالکی در سیالاتی که رفتار سودوپلاستیک نشان می‌دهند به صورت $1 < n < 0$ است. در این تحقیق مقدار

(تورس و همکاران ۲۰۱۳). طبق نتایج بدست آمده، مدل کراس به دلیل ضریب تبیین بالا (۰/۹۹) و RMSE پایین، می‌تواند مدل بسیار مناسبی جهت توصیف رفتار رئولوژیکی در این تحقیق باشد. در همه نمونه‌ها مقدار $m < 1$ بود که نشان‌دهنده رفتار سودوپلاستیک در همه نمونه‌ها است (ارزکو و همکاران ۲۰۱۹). طبق نتایج بدست آمده، می‌توان حدس زد که مدل کراس به دلیل ضریب تبیین بالا (۰/۹۹) و RMSE پایین، می‌تواند مدل بسیار مناسبی جهت توصیف رفتار رئولوژیکی در این تحقیق باشد.

سودوپلاستیک گردیده است. پارامتر a_c که ثابت زمان کراس نامیده می‌شود، در واقع مربوط به زمان آرمیدگی ساختار بیوپلیمرهای موجود در دسر است. پارامتر m که نشان‌دهنده درجه روان‌شوندگی با برش است، در سیالات نیوتنی نزدیک به عدد صفر و در سیالات شدیداً سودوپلاستیک نزدیک به ۱ است. مقدار m بدست آمده برای نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب ۰/۸۱، ۰/۹۱، ۰/۶۳۹ و ۰/۹۴۲ بدست آمد. بالاترین مقدار m مربوط به نمونه شماره ۴ است که نشان‌دهنده درجه سودوپلاستیسیته بالاتر نمونه بهینه سازی شده است

جدول ۳- نتایج حاصل از برازش داده‌های تنش برشی-سرعت برشی در مدل‌های مختلف

Table 3- Results of fitting shear stress-shear rate data in different models

model	sample 1	sample 2	sample 3	sample 4
Hershel-Bulkley				
σ_0	56.23	126.154	38.417	228.1
K_H (Pa.s ⁿ)	11.22	45.24	8.34	57.7
n_H	0.424	0.276	0.51	0.123
R^2	0.999	0.999	0.988	0.988
RMSE	1.8	0.77	0.88	1.34
Cross				
η_0 (Pa.s)	37.55	88.65	26.85	155.12
(s) a_c	0.29	0.334	0.14	0.843
m	0.81	0.91	0.639	0.942
R^2	0.999	0.999	0.999	0.991
RMSE	0.02	0.01	0.04	0.531
Carraeu				
η_0 (Pa.s)	21.07	32.49	18.66	40.29
λ_c	0.231	0.372	0.217	0.58
(s)				
N	0.417	0.511	0.336	0.484
R^2	0.999	0.999	0.999	0.988
RMSE	0.02	0.006	0.02	0.62

۴/۲۹ بدست آمد که در نمونه بهینه‌سازی شده افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است با نتایج بدست آمده در مدل کراس تطابق داشت. رفتار سودوپلاستیک در نمونه بهینه سازی شده، بیشتر شد و این موضوع بیانگر آن است که سرعت تشکیل پیوندها و اتصالات جدید کاهش پیدا

یکی دیگر از مدل‌هایی که با استفاده از آن رفتار رئولوژیکی مورد ارزیابی قرار گرفت، مدل کارائی است که مدلی مشابه با مدل کراس است. همانطورکه انتظار می‌رفت، در این مدل هم ویسکوزیته صفر (η_0)، نمونه‌های دسر شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب، ۲۱/۰۷، ۳۲/۴۹، ۱۸/۶۶،

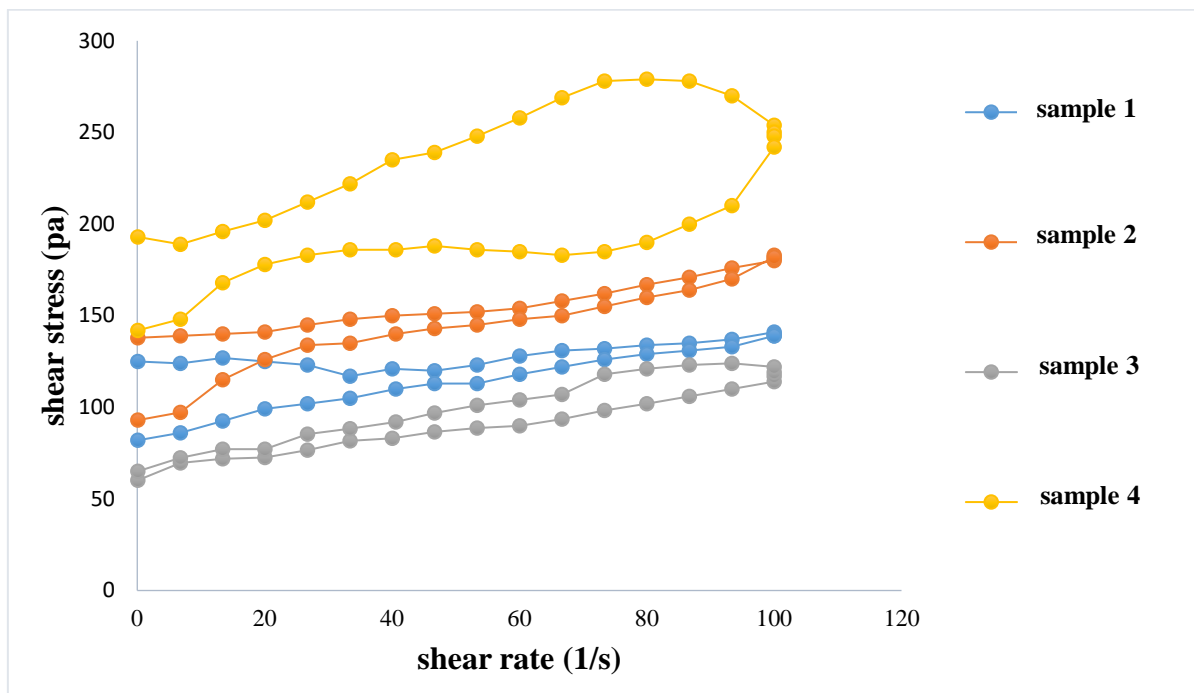
می‌کند و مقدار λ_c افزایش می‌یابد. ثابت زمانی کارائی (λ_c) که زمان آرمیدگی تعریف می‌شود، نشان‌دهنده سرعت کاهش ویسکوزیته تحت برش است. هرچه قدر این پارامتر کمتر باشد، زمان آرمیدگی و سرعت شکست ساختاری بیشتر است در این مدل هم، ضریب تبیین بالا (۰/۹۹) و مقدار RMSE پایین بود. از این رو مدل کارائی هم می‌تواند رفتار جریانی دسر را به خوبی توصیف کند. تا کنون در تحقیق‌های بسیاری برای برآزش داده‌های دسر لبنی از مدل کارائی استفاده شده است که همانند پژوهش حاضر، مقادیر R^2 بسیار خوبی در برآزش با این مدل را داشتند. مدل کارائی مدل مناسبی جهت برآزش داده‌های ویسکوزیته-سرعت برشی توصیف کننده رفتار ویسکوالاستیک مواد غذایی نیمه جامد، چون دسرهای لبنی می‌باشد (کرسینیه و همکاران ۲۰۰۸).

بررسی خواص تیکسوتروپیک

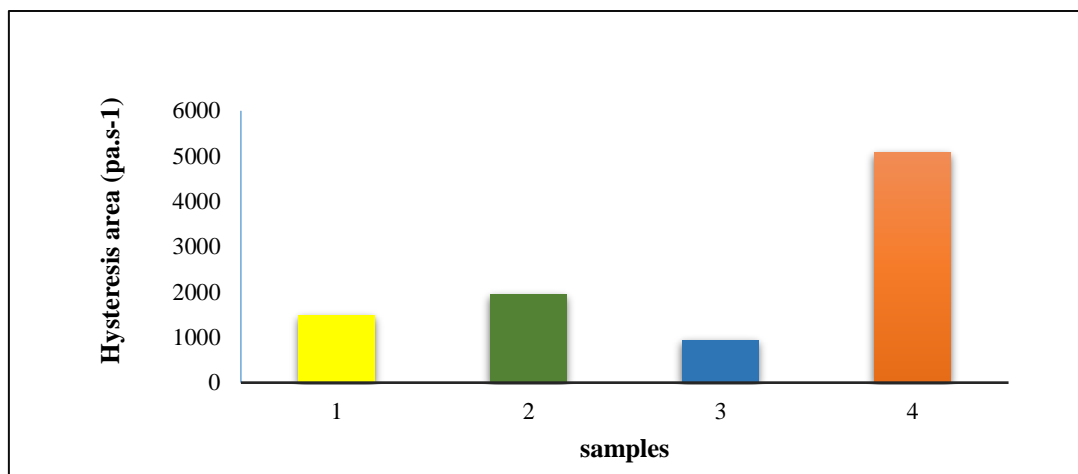
در رفتار تیکسوتروپیک، رفتار سیال، علاوه بر سرعت برشی، به مدت زمان اعمال تنش برشی نیز وابسته است در این سیالات، علاوه بر اینکه همانند سیالات سودوپلاستیک با افزایش سرعت برشی، ویسکوزیته کاهش پیدا می‌کند، با گذشت زمان در یک سرعت برشی ثابت نیز ویسکوزیته کم می‌شود تا به یک مقدار ثابت که ویسکوزیته تعادلی گفته می‌شود برسد، یا به عبارت دیگر با گذشت زمان، در تنش برشی ثابت، سرعت برشی افزایش می‌یابد. یکی از روش‌هایی که به طور مکرر برای توصیف رفتار تیکسوتروپیک مورد استفاده قرار می‌گیرد، تعیین مساحت منحنی رفت و برگشت در نمودار تنش برشی-سرعت برشی است که پس ماند یا هیسترسیس نامیده می‌شود و بیانگر رفتار وابسته به زمان است (وو و همکاران ۲۰۱۳). درجه تیکسوتروپیک معمولاً با محاسبه مساحت حلقه هیسترسیس تعیین

می‌شود و هرچه قدر بزرگتر باشد، نشان‌دهنده خاصیت تیکسوتروپیک قویتر و وابستگی بیشتر به زمان است (وانگ و همکاران ۲۰۱۶). همچنین توانایی ساختار یک ژل را جهت برگشت به حالت اولیه پس از اعمال تنش برشی نشان می‌دهد (لی و همکاران، ۲۰۲۰). طبق نتایج بدست آمده در شکل ۳، در تمامی نمونه‌ها نمودار رفت و برگشت بر هم منطبق نبوده و حلقه پسماند دیده می‌شود (کاظمی نژاد و همکاران ۲۰۱۸). جهت اندازه‌گیری مساحت لوپ هیسترسیس از نرم افزار Rheoplus ویژه دستگاه رئومتر مدل Physica MCR ۳۰۰ استفاده شد. مساحت لوپ هیسترسیس، بعنوان یک شاخص برای مقایسه کیفی بکار برده می‌شود، زیرا میزان انرژی مورد نیاز برای تخریب جزئی ساختار ماده غذایی، متناسب با مساحت لوپ هیسترسیس است. شکل ۴، نمودار میله‌ای مربوط به مساحت لوپ هیسترسیس نمونه‌ها را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین مساحت لوپ هیسترسیس مربوط به نمونه شماره ۴ (نمونه بهینه‌سازی شده) و کمترین مربوط به نمونه شماره ۳ می‌باشد. بنابراین وجود قندهای شیرین کننده مختلف منجر به تولید دسر با ویسکوزیته بالاتر ولی تیکسوتروپیک تر (حساس تر به تنش برشی) شده است. این رفتارها می‌تواند به تغییرات در ریز ساختار در نتیجه اجزای شیرین کننده مربوط باشد (جاوود و همکاران ۲۰۲۰).

رفتار تیکسوتروپیک معمولاً به دلیل از بین رفتن برهم‌کنش‌های بین ذرات و تفکیک ذرات بزرگتر و نامنظم به ذرات کوچکتر و منظم تر و سپس آرایش یافتن ذرات در جهت جریان با گذشت زمان است. رفتار تیکسوتروپیک در اغلب دسرهای لبنی گزارش شده است (رویز و همکاران ۲۰۰۶).



شکل ۳- حلقه هیسترسیس در منحنی جریان پایا بصورت رفت و برگشتی در نمونه های دسر (۲۵ °C)
 Figure 3 - Hysteresis loop in a continuous flow curve reciprocating in dessert samples (25 ° C)



شکل ۴- نمودار میله‌ای نشان دهنده مساحت لوپ هیسترسیس نمونه‌ها در دمای ۲۵ °C (نمونه شماره ۱: دسر حاوی ۱۰۰٪ ساکارز، نمونه شماره ۲: دسر حاوی ۱۰۰٪ فروکتوز، نمونه شماره ۳: دسر حاوی ۱۰۰ درصد شیرین کننده (سوکرالوز-سوربیتول) و نمونه شماره ۴: دسر تهیه شده با فرمول بهینه سازی شده که شامل ۹/۱۶٪ ساکارز و ۹/۳۲٪ فروکتوز و ۸۱/۵۱٪ شیرین کننده)

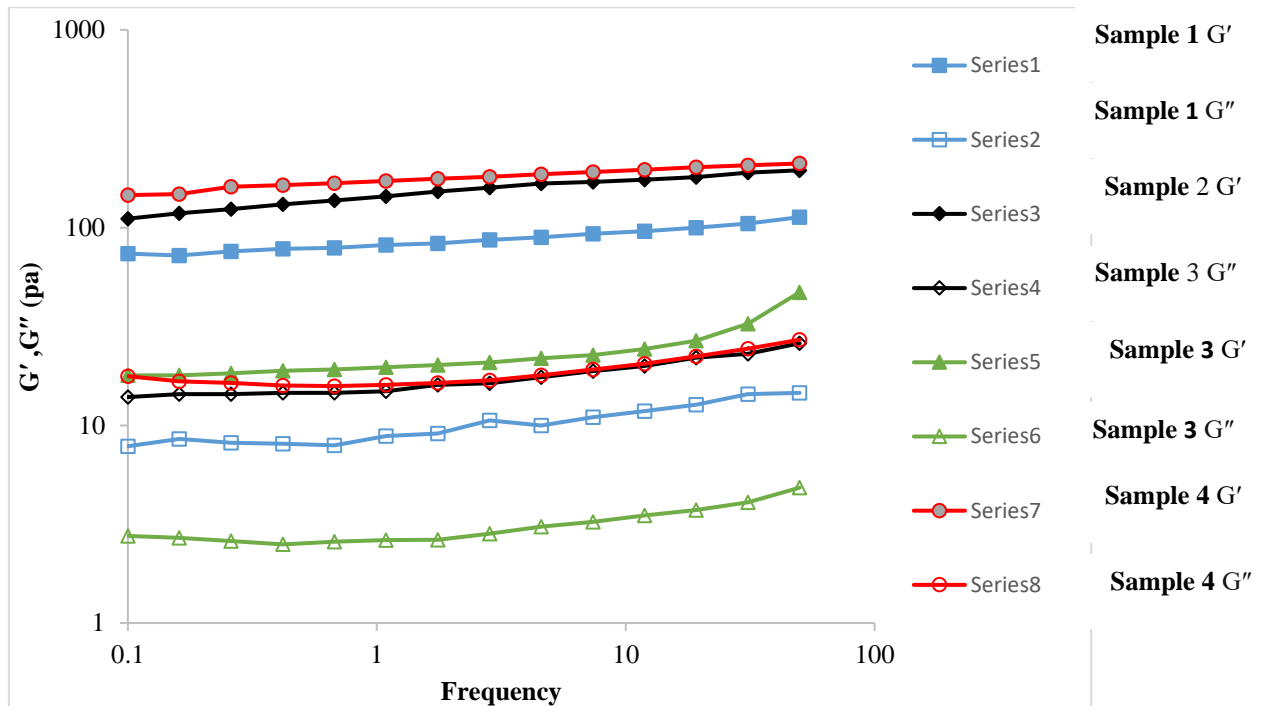
Figure 4- Bar chart showing the loop hysteresis area of the samples (25 ° C). Sample No. 1: Dessert containing 100% sucrose, Sample No. 2: Dessert containing 100% fructose, Sample No. 3: Dessert containing 100% sweetener (sucralose-sorbitol) and Sample No. 4: Dessert prepared with an optimized formula that Includes 9.16% sucrose, 9.32% fructose and 81.51% sweetener)

در دامنه کرنش ۵۰-۱٪ و در فرکانس زاویه‌ای ثابت ۱ هرترز در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد برای هر چهار نمونه انجام گرفت. در نهایت ناحیه ویسکوالاستیک خطی

ویژگی های رئولوژیکی جریان برشی نوسانی قبل از انجام آزمون روبش فرکانس، آزمون روبش کرنش برای تعیین ناحیه ویسکوالاستیک خطی (LVE)

تابعی از فرکانس، در کرنش ثابت ۱٪ و دامنه فرکانس ۰/۵۰-۱ هرتز برای هر چهار نمونه انجام گرفت و نتایج آن در شکل ۵ و جدول ۳ گزارش شده است.

جهت آزمون روبش فرکانس، در کرنش ۱٪ انتخاب گردید. در ادامه آزمون روبش فرکانس و تغییرات مدول‌های ویسکوالاستیک (G' ، G'' و η^*) به عنوان



شکل ۵- تغییرات مدول‌های الاستیک (G') و ذخیره (G'') نمونه در آزمون روبش فرکانس (کرنش ۱٪ و دمای 25°C)
Figure 5- Changes in the elastic modulus (G') and storage modulus (G'') of the sample in the frequency scanning test (strain 1% and temperature 25°C)

شیرین‌کننده‌های سنتزی مانند آسپارتام بر خلاف ساکارز هیچ گونه تغییری روی خواص ویسکوالاستیک سیستم‌های ژلی مختلف ندارد، ولی از آنجا که در این تحقیق از ترکیب سوکرالوز و سوربیتول استفاده شد و بهینه‌سازی فرمولاسیون انجام شده است خصوصیات ویسکوالاستیک محصول نهایی بهبود یافت. ویسکوزیته کمپلکس (η^*): نسبت مدول کمپلکس (G^*) به فرکانس بوده و معیاری از سفتی کلی جسم است.

$$\eta^* = \frac{G^*}{\omega} \quad \text{و} \quad G^* = \frac{\sigma_0}{\gamma_0}$$

تانژانت افت ($\text{tg}\delta$): نسبت جزء ویسکوز (G'') به جزء الاستیک (G') را نشان می‌دهد. هرچقدر رفتار شبه مایع بودن جسم بیشتر باشد این فاکتور بالاتر است. تانژانت

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در تمامی فرکانس‌ها، نمودار G' بالاتر G'' است که نشانگر خاصیت شبه جامدی دسر مربوطه است. با افزایش فرکانس، مدول‌ها افزایش یافتند، اگرچه وابستگی به فرکانس پائین است. مقادیر مدول‌های فوق تغییرات قابل توجهی را با افزایش فرکانس نشان ندادند که نشان دهنده این است که نمونه‌ها دارای رفتار ژل‌های نسبتاً قوی می‌باشند. با مقایسه مقادیر G' و G'' نمونه‌ها در جدول ۳ می‌توان نتیجه گرفت که نمونه بهینه (۴) مدول‌های ذخیره و افت بالاتری دارد لذا استفاده از ترکیب مناسبی از شیرین‌کننده‌های مختلف می‌تواند اثرات مثبتی در خصوصیات ویسکوالاستیک دسر‌ها داشته باشد. طبق تحقیق بایاری و همکاران، (۲۰۰۴)

$$tg \delta = \frac{G''}{G'}$$

معادله

افت ژل‌های واقعی کمتر از ۰/۱ و در ژل‌های بیوپلیمری بین ۰/۱-۱ است.

جدول ۳- پارامترهای رئولوژی بدست آمده از آزمون روبش فرکانس (فرکانس ۰/۱ هرتز، کرنش ۱٪ و دمای ۲۵ °C)

Table 3- Rheological parameters obtained from frequency scanning test (frequency= 0.1 Hz, strain= 1%, 25 ° C)

Sample	G' (Pa)	G'' (Pa)	Tanδ	η* (Pa.s)
1	73.8	7.84	0.106	7.42
2	111	13.9	0.125	11.18
3	17.9	2.76	0.154	1.81
4	146	17.7	0.121	2.29

ساکارز، ۹/۳ درصد فروکتوز و ۸۱/۵ درصد سوکرالوز-سوربیتول بدست آمد. به منظور بررسی خصوصیات رئولوژیکی آزمون‌های رئومتری پایا و نوسانی روی دسر بهینه‌سازی شده، دسر حاوی ۱۰۰٪ ساکارز، دسر حاوی شیرین کننده ۱۰۰٪ فروکتوز و دسر حاوی ۱۰۰٪ شیرین کننده سوکرالوز-سوربیتول انجام شد. بالاترین ویسکوزیته، بالاترین درجه سودوپلاستیسیته مربوط به نمونه بهینه‌سازی شده بود. در بین مدل‌های برازش شده، مدل کراس به دلیل بالاترین ضریب تبیین (۰/۹۹) و پایین‌ترین RMSE، مناسب‌ترین مدل برای توصیف رفتار رئولوژیکی دسر در این تحقیق است. نتایج آزمون‌های جریان برشی نوسانی بیانگر ساختار ژل قوی دسرهای تولید شده است.

تقدیر و تشکر

از شرکت فرآورده‌های لبنی دومینو برای اجازه دسترسی کامل به امکانات، تجهیزات آزمایشگاهی و تامین مواد مصرفی تشکر می‌نمائیم.

همانطور که در جدول ۳ آورده شده است تانژانت افت نمونه بهینه‌سازی شده پایین‌تر از سایر نمونه‌ها است، هر چقدر ماده رفتار شبه مایع بیشتری نسبت به رفتار شبه جامد داشته باشد، $tg \delta$ بالاتری خواهد داشت. در مواد ویسکوالاستیکی که مقادیر انرژی به هدر رفته (G'') بالا و انرژی بازیابی شده (G') پایین باشد، مقدار تانژانت افت آنها بیشتر از یک خواهد بود، یعنی ماده شبه مایع است، اما زمانی که مقدار G' آنها بیشتر از G'' باشند مقدار تانژانت افت آنها کمتر از یک خواهد بود، یعنی ماده خاصیت شبه جامدی دارد. با مقایسه نمونه بهینه‌سازی شده با سایر نمونه‌ها، شاهد افزایش در مقادیر G' ، G'' ، η^* بودیم، که این نشان‌دهنده تأثیر مثبت ترکیب بهینه‌سازی شده شیرین‌کننده‌ها بر روی پارامترهای فوق بود.

جمع بندی و نتیجه گیری

نرم افزار design expert و روش D optimal mixture برای طراحی فرمولاسیون دسرهای لبنی با شیرین کننده‌های جایگزین در این تحقیق بسیار کارآمد بود. مدل Special cubic برای آب اندازی و بافت و مدل Quadratic برای سایر پاسخ‌های بافت، طعم، عطر، ظاهر، شیرینی و پذیرش کلی از نظر آماری معنی‌دار گزارش شد. ترکیب شیرین کننده جایگزین قند در فرمولاسیون بهینه سازی شده شامل ۹/۲ درصد

منابع مورد استفاده

- ابراهیمی س، پوراحمد ر و خورشیدپور ب، ۱۳۹۷. تولید خامه شکلاتی رژیمی حاوی استویا، سوکرالوز و اینولین و بررسی ویژگی‌های فیزیکی شیمایی و حسی آن، نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی، ۲۷(۳)، ۱۵-۲۵.
- Abu-Jdayil B, Mohameed H A, and Eassa A, 2004. Rheology of wheat starch-milk-sugar systems: Effect of starch concentration, sugar type and concentration, and milk fat content. *Journal of Food Engineering* 64: 207–212.
- Aprodu I, Gurau G, Ionescu A and Banu I, 2011. The effect of transglutaminase on the rheological properties of yogurt, *Scientific Study and Research: Chemistry and Chemical Engineering, Biotechnology. Food Industry* 12:185–196.
- Bayarri S, Durán L and Costell E, 2004. Influence of sweeteners on the viscoelasticity of hydrocolloids gelled systems. *Food Hydrocolloids*, 18:611–619.
- Djaoud K, Boulekbache-Makhlouf L, Yahia M, Mansouri H, Mansouri N, Madani K and Romero A, 2020. Dairy dessert processing: Effect of sugar substitution by date syrup and powder on its quality characteristics. *Journal of Food Processing and Preservation* 19: 1–13.
- Grotz V L and Munro I C, 2009. An overview of the safety of sucralose, *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 55: 1–5.
- Huang J, Zeng S, Xiong S and Huang Q, 2016. Steady, dynamic, and creep-recovery rheological properties of myofibrillar protein from grass carp muscle. *Food Hydrocolloids* 61: 48–56.
- Keršienė M, Adams A, Dubra A and Leskauskaitė D, 2008. Interactions between flavour release and rheological properties in model custard desserts: Effect of starch concentration and milk fat'. *Food Chemistry*, 108: 1183–1191.
- Li Y, Wang X, Lv X and Yan M, 2020. Extractions and rheological properties of polysaccharide from okra pulp under mild conditions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 148: 510–517.
- Mannarswamy A, Munson-McGee S H and Andersen P K, 2010. D-optimal designs for the Cross viscosity model applied to guar gum mixtures. *Journal of Food Engineering*, 97: 403–409.
- McCain H R, Kaliappan S and Drake M A, 2018. Invited review: Sugar reduction in dairy products. *Journal of Dairy Science* 101: 8619–8640.
- Di Monaco R, Miele N, Cabisidan E and Cavella S, 2018. Strategies to reduce sugars in food. *Current Opinion in Food Science* 19: 92–97.
- Kazemi Nezhad N A, Ghanbarzadeh B and Dehghannya J. 2018. Flow and viscoelastic behavior of Iranian starch-based low calorie dessert (Palda). *Journal of Food Measurement and Characterization* 12: 301–310.
- Pérez-Orozco JP, Sánchez-Herrera L M and Ortiz-Basurto RI, 2018. Effect of concentration, temperature, pH, co-solutes on the rheological properties of Hyptis suaveolens L. mucilage dispersions. *Food Hydrocolloids* 87: 297–306.
- Rodriguez Furlán L T and Campderrós M E 2017. The combined effects of Stevia and sucralose as sugar substitute and inulin as fat mimetic on the physicochemical properties of sugar-free reduced-fat dairy dessert', *International Journal of Gastronomy and Food Science* 10:16–23.
- Shankar P, Ahuja S and Sriram, K, 2013. Non-nutritive sweeteners: Review and update. *Nutrition* 29: 1293–1299.
- Sheet B S, Artik N, Ayed M and Abdulaziz O, 2014. Some alternative sweeteners (xylitol, sorbitol, sucralose and stevia): Review. *Karaelmas Science and Engineering Journal* 4:63–70.
- Torres M D, Hallmark B, and Wilson D I, 2014. Effect of concentration on shear and extensional rheology of guar gum solutions. *Food Hydrocolloids* 40:85–95.
- Torres M D, Raymundo, A and Sousa, I, 2013. Effect of sucrose, stevia and xylitol on rheological properties of gels from blends of chestnut and rice flours', *Carbohydrate Polymers*. 98: 249–256.
- Vélez-Ruiz J, Hernando I, González-Tomás L, Pérez-Munuera and Costell E, 2006. Rheology and microstructure of custard model systems with cross-linked waxy maize starch. *Flavour and Fragrance Journal* 21: 30–36.

- Wang T, Zhang M and Gao Z, 2016. Rheological, Textural and Flavour Properties of Yellow Mustard Sauce as Affected by Modified Starch, Xanthan and Guar Gum. *Food and Bioprocess Technology* 9: 849–858.
- Wang Y X, Yin J, Huang X and Nie S P ,2020. Structural characteristics and rheological properties of high viscous glucan from fruit body of *Dictyophora rubrovolvata*. *Food Hydrocolloids* 101:105-514.
- Wu Y, Guo R, Cao N, Sun X and Guo Q, 2018. A systematical rheological study of polysaccharide from *Sophora alopecuroides* L. seeds. *Carbohydrate Polymers* 180: 63–71.



Journal of Food Research, 2023,33(1):143-164

<https://foodresearch.tabrizu.ac.ir>

OPEN ACCESS



© 2009 Copyright by Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)

DOI: 10.22034/FR.2023.53377.1849

Optimizing the sensory properties and investigating the rheological properties of low-calorie dairy dessert containing sucralose-sorbitol sweetener with the D-optimal mixed design method

S L Hosseinipour¹, B ghanbarzadeh^{2*}, V mofid³, M soltani⁴ and H hosseini³

Received: 2022/09/08 Accepted: 2022/12/18

¹PhD Student, Department of Food Sciences and Technology, Faculty of Pharmacy, Tehran Medical Sciences, Islamic Azad University, Tehran, Iran²Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran³Assistant Professor and Professor respectively, Department of Food Science and Technology, National Nutrition and Food Technology Research Institute, Faculty of Nutrition Science and Food Technology, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran⁴Assistant Professor, Department of Food Sciences and Technology, Faculty of Pharmacy, Tehran Medical Sciences, Islamic Azad University, Tehran, Iran

*Corresponding author: E mail: Babakg1359@yahoo.com; Ghanbarzadeh@tabrizu.ac.ir

Introduction: Dairy desserts are very popular among different age groups. There is about 10-12% sugar in the formulation of desserts and since sugar plays an important role in the taste, texture, color and other characteristics of food, removing or completely replacing them causes problems in the physicochemical properties of the final product. In such products, a combination of low-calorie sweeteners can be used along with bulking agents to provide sensory and textural properties. One of the most widely used sweeteners in low-calorie products is sucralose, which is derived from sugar, tastes very close to sucrose, is 6 times sweeter than sucrose, and has no aftertaste. Due to the low molecular weight of sucralose, it is possible to use sorbitol, which is a 6-carbon sugar alcohol and is slowly metabolized in the body, to improve the textural and sensory characteristics of the dessert. One of the statistical methods to minimize the number of trials is the D-optimal mixed design method, which was used to optimize the sensory characteristics and syneresis of the final dessert. The aim of this research was to investigate the use of a combination of sweeteners as a substitute for sucrose to achieve a low-calorie dairy dessert with optimized sensory and textural properties with the mixed design method. Finally, the rheological characteristics of the optimized dessert were compared to control dessert samples containing common sweeteners such as fructose, and some rheological models were fitted to predict the behavior of the optimized dessert.

Material and methods: To prepare the dessert, first, all powder components including skim milk powder (2%), starch (3%) and kappa-carrageenan (0.5%) were combined together to prevent clumping and better dissolving. By using a thermomixer device, the powder components were dissolved in fat-free milk (71.5%) and 40% fat cream (10%) at a temperature of 10°C for 5 minutes. Then, sweeteners (sweetening strength equivalent to 13 % of sugar) were dissolved according to

Table 1-2 for 30 minutes at 350 rpm at a temperature of 45°C. Finally, the mixtures were pasteurized at a temperature of 73°C for 30 seconds and immediately packed in 100 gram containers and were kept for 2 days at a temperature of 4 °C. In order to prepare the sucralose-sorbitol sweetener solution, before the dessert production, different percentages of sucralose (from 0.005 to 0.06) were prepared in 20% sorbitol solution and the sample that had the sweetness equivalent of 20% sucrose solution was determined by sensory evaluation method and was used in this research. Then, according to Table 1 the formulations obtained from the experimental design were prepared then syneresis and sensory evaluation including texture, taste, aroma, appearance, sweetness and overall acceptance were performed. The rheological properties of the dessert samples were measured with a MCR-301 rheometer (Anton Paar GmbH, Graz, Austria) and a cone and plate probe with a diameter of 50 mm, an angle of 1 degree, and a gap distance of 0.05 mm.

Results and discussion: The experimental design used in this study included three factors with two levels to investigate the relationship and effect of sucrose, fructose, sucralose-sorbitol sweeteners as independent variables on the obtained responses, including syneresis and sensory evaluation as dependent variables was used (Table 1). The best-fitted regression model, which was statistically significant ($P < 0.0001$), was the Special cubic model for syneresis and the Quadratic model for other responses. Formulation optimization was done with the aim of the minimum percentage of sucrose, the minimum amount of syneresis, the best texture, taste, aroma, appearance, the most sweetness and the highest overall acceptance. The optimized formulation containing 9.2% sucrose, 9.3% fructose and 81.5% sucralose-sorbitol was obtained. According to the three-dimensional contour diagrams (Figure 1), the use of the combined sweetener sucralose-sorbitol in high amounts along with fructose syrup improves the textural properties. The graph related to other responses, increasing the concentration of C from low to high level leads to improvement of sensory evaluation results of taste, aroma, appearance, sweetness and overall acceptance. Therefore, it can be concluded that sucralose-sorbitol sweetener is a suitable substitute for sugar to be used in dairy desserts. Oscillatory and steady rheometric tests on 4 samples including dessert with 100% sucrose (sample 1), dessert containing 100% fructose (sample 2) and dessert containing 100% sucralose-sorbitol sweetener (sample 3) and optimized dessert (sample 4) was done. With the increase of shear rate, the apparent viscosity decreased in all samples, which indicates the non-Newtonian (pseudoplastic) behavior. The highest viscosity corresponds to the optimized sample. The effect of sweeteners on the rheological behavior of dessert was fitted well with Hershel–Bulkley, Cross, Carraeu models. Among them, the Cross model due to its high R^2 (0.99) and low RMSE, can be a very suitable model for describing the rheological behavior in this research. The results of the investigation of thixotropic properties showed that the largest hysteresis loop area is related to sample number 4 and the lowest is related to sample number 3. Therefore, the presence of different sweetener has led to the production of desserts with higher viscosity but more thixotropic. For oscillatory rheological properties, the linear viscoelastic region limit was determined as 1% strain by strain sweep analysis at 1 Hz frequency. We saw an increase in the η^* , G'' , G' values for the optimized sample, which indicated the positive effect of the optimized combination of sweeteners on the above parameters.

Conclusion: The design expert software and the D-optimal mixture design method were very efficient for designing the formulation of dairy desserts with alternative sweeteners in this research. Special cubic model for syneresis and Quadratic model for other responses of texture, taste, aroma, appearance, sweetness and overall acceptance were reported to be statistically significant. The composition of sugar substitute sweetener was obtained in the optimized formulation including 9.2% sucrose, 9.3% fructose and 81.5% sucralose-sorbitol. In order to check the rheological properties of the rheometric tests on the optimized dessert, the dessert containing 100% sucrose, the dessert containing 100% fructose sweetener and the dessert containing 100% sucralose-sorbitol sweetener were performed. The highest viscosity, the highest degree of pseudoplasticity was related to the optimized sample. Among the fitted models, Cross model is the most suitable model to describe the

rheological behavior of dessert in this research due to the highest explanation coefficient (0.99) and the lowest RMSE. The results of oscillatory shear flow tests show the strong gel structure of the produced desserts.

Keywords: Low calorie dessert, Optimization, Rheology, Sensory properties, D-optimal mixed design