تحقیقات مهندسی صنایع غذایی/جلد۲۲ / شماره /۷۴ / بهار و تابستان / ۱۴۰۲ / ص۱۴۷-۱۶۲

سایت مجله: https://fooder.areeo.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی

بررسی تأثیر جایگزینی شکر با ایزومالت، اینولین و سوربیتول بر ویژگی‌های فیزیکی و حسی شکلات تلخ

سید وحید لقمانی [۱]، محمد حجت‌الاسلامی [۲*]، هومان مولوی [۳]، محمد فاضل [۴]

۱و ۲* - گروه علوم و صنایع غذایی، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران.

۳- مرکز تحقیقات گیاهان دارویی ادویه ای و عطری، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران.

۴- گروه علوم و صنایع غذایی، واحد خوراسگان دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

تاریخ ارسال : ۱۴۰۱/۰۳/۲۲ **تاریخ پذیرش :** ۱۴۰۱/۰۶/۰۶

چکیده

شکلات تلخ سوسپانسیونی از ساکارز، پودر کاکائو و ذرات غیرچرب است که در فاز پیوسته‌ای از کره کاکائو پراکنده شده‌اند. در سال‌های اخیر گرایش مصرف‌کنندگان به مصرف محصولات کم‌کالری با مقدار قند کمتر به دلیل ارتقای سلامتی مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، اثر شیرین‌کننده‌های حجمی مختلف مانند ایزومالت، اینولین و سوربیتول در فرمولاسیون شکلات تلخ به عنوان جایگزین شکر بر ویژگی‌های رئولوژیکی، رفتارهای ذوب‌شوندگی و ویژگی‌های حسی شکلات تلخ مقایسه و ارزیابی شد. نمونه‌ها تحت تجزیه و تحلیل‌های رئولوژیکی پایا و نوسانی، پارامترهای ذوب‌شوندگی مانند دمای ابتدایی ذوب، دمای پیک، آنتالپی و دمای انتهایی ذوب و همچنین تجزیه و تحلیل حسی با استفاده از روش هدونیک ۵ نقطه‌ای قرار گرفتند. نتایج بررسی‌ها نشان دادند استفاده از انواع مختلف پرکننده‌های حجمی تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های رئولوژیکی و حسی شکلات تلخ دارد، به‌طوری که ایزومالت سبب افزایش و اینولین و سوربیتول سبب کاهش ویسکوزیته ظاهری نمونه‌ها شده‌اند. جایگزین کردن شکر با سوربیتول سبب افزایش رفتار ژل‌مانند شد در حالی که ایزومالت و اینولین خاصیت ویسکوز نمونه‌ها را افزایش دادند. شیرین‌کننده‌های حجمی سبب تغییر در دمای ذوب اولیه، آنتالپی و کاهش دمای پیک ذوب شکلات تلخ شدند. ارزیابی حسی نشان داد که نمونه‌های حاوی سوربیتول پایین‌ترین و نمونه‌های حاوی ساکارز بیشترین امتیاز مربوط به پذیرش کلی را دارند. شیرین‌کننده‌های حجمی تأثیرات مختلفی بر ویژگی‌های حسی و رئولوژیکی شکلات تلخ داشتند از این‌رو استفاده از مخلوطی از این ترکیبات به‌منظور دستیابی به فرمولاسیون بهینه و مشابه با نمونه تجاری آن توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی حسی، رفتار ذوب‌شوندگی، رئولوژی، شکلات تلخ، شیرین‌کننده‌های حجمی

مقدمه

شکلات ترکیبی غذایی است حاوی ذرات جامد مانند کاکائو و پودر شیر که در بستری از کره کاکائو پراکنده شده‌اند و منابع غنی از ترکیبات فعال مانند آنتی اکسید آن‌ها هستند که تأثیرات مثبت بر سلامت انسان به ویژه بر سیستم قلب و عروق می‌گذارند. افراد داری نقص متابولیکی مانند دیابت و چاقی نباید مواد غذایی غنی از چربی و قندهایی را مصرف کنند که به آسانی قابل هیدرولیز به گلوکز هستند مانند ساکارز (Nebesny *et al.* , 2005). شکلات دارای انواع مختلفی است مانند شکلات معمولی تلخ

نویسنده مسئول: Email: mohojjat@iaushk.ac.ir

http://doi: 10.22092/FOODER.2023.359013.1335

© 2023,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

شیری و سفید که تفاوت آنها در مواد جامد حاوی کاکائو چربی شیر و کره کاکائو است از این رو محصول نهایی نیز دارای مقادیر مختلفی از کربوهیدرات پروتئین و چربی است (Beckett, 2008). شکلات مذاب‌تلخ سوسپانسیونی از ساکارز و پودر کاکائو و ذرات غیرچرب است که در فاز پیوسته‌ای از کره کاکائو پراکنده شده و مقدار مواد جامد آن بین ۶۵ تا ۷۵ درصد است (Foubert *et al.* , 2003). برخلاف ویژگی‌های مطلوب شکلات، وجود مقادیر زیادی ساکارز یکی از ویژگی‌های محدودکننده برای مصرف‌کنندگانی است که اختلالات متابولیکی مانند دیابت و چاقی دارند. (Nebesny *et al.* , 2005).

افزایش آگاهی جامعه در زمینهٔ سلامت غذایی و گرایش به سمت مصرف غذاهای کم‌کالری حاوی جایگزین‌های قندی به منظور کنترل وزن و کاهش خطر ابتلا به دیابت سبب‌شده تولیدکنندگان محصولات غذایی به‌تولید فراورده-های کم‌کالری حاوی جایگزین‌های قندی روی‌آورند. تعداد افراد مبتلا به دیابت در جهان در سال ۲۰۰۰ حدود ۱۷۱ میلیون نفر گزارش شده که پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۳۰ به ۳۶۶ میلیون نفر برسد. طبق آمار فدراسیون بین‌المللی دیابت، افراد مبتلا به دیابت نوع ۲ در گروه سنی ۲۰ تا ۷۹ سال در ایران در سال ۲۰۰۷ حدود ۲ میلیون و۵۶۷ هزار نفر برآورد شده است که تا سال ۲۰۲۵ به حدود ۵ میلیون و ۱۱۴ هزار نفر خواهد رسید(Wild *et al.* , 2004). جایگزین‌های شکر تنوع انتخاب انواع غذاها و نوشیدینی‌ها را برای افرادی که برای آنها کنترل کالری دریافتی و کاهش وزن حائز اهمیت است را فراهم می‌کند (Castellari *et al.* , 2001). شیرین‌کننده‌های مغذی ترکیباتی هستند که به عنوان جایگزین شکر به منظور ایجاد بافت و تأمین شیرینی استفاده می‌شوند. این ترکیبات که گاهی از آنها با عنوان ترکیبات پرکننده یا جایگزین شکر یاد می‌شود، می‌توانند به منظور کاهش میزان کالری کاهش نمایه گلایسمی و جلوگیری از پوسیدگی دندان به‌کار روند (Beckett, 2008) که از آن جمله می‌توان به ایزومالت، سوربیتول مالتیتول و اینولین (Castellari *et al.* , 2001) لاکتیتول، پلی دکستروز و آسپارتام (Krüger, 1999) اشاره کرد.

اینولین فیبر رژیمی است که از زنجیره‌های فروکتان با پیوندهای α (1→2) تشکیل شده‌است و به عنوان ترکیب پروبیوتیک قابل تخمیر به‌منظور تحریک رشد باکتری‌های مفید روده مصرف می‌شود. از دیگر ویژگی‌های این ماده می‌توان به تولید انرژی پایین در بدن، افزایش جذب کلسیم و ایجاد طعم شیرین در محصولات غذایی، به‌جای شکر، اشاره کرد(Abbasi and Farzanmehr, 2009). ایزومالت از دو دی ساکارید الکلی با نسبت حجم مساوی تشکیل شده که توسط فرآیندهای آنزیمی از ساکاروز بدست می آیدو این ترکیب جاذب رطوبت و شیرینی نسبی آن ۰/۴۵ شیرینی ساکاروز است که می‌توان آن را به عنوان یک شیرین‌کننده حجمی با ایجاد بافت قابل قبول در محصولات غذایی به عنوان جایگزین شکر در نظر گرفت (Sokmen and Gunes, 2006). میزان دریافت روزانه قابل قبول این ترکیب محدودیتی ندارد و کالری آن ۴/۲و ۲ کیلو کالری به ازای هر گرم بر اساس استانداردهای به ترتیب اتحادیه اروپا و آمریکا تعریف شده است (DuBois, 2000). سوربیتول فرم الکلی ساکارز است که به طور طبیعی در میوه‌ها و سبزی‌ها وجود دارد و در دستهٔ الکل‌های چندعاملی با تولید ۶/۲ کیلو کالری در هر گرم، در مقایسه با ساکارز(۴/۲ کیلو کالری در هر گرم) ،می‌تواند به‌جای شکر استفاده شود. این ترکیب در صنعت از هیدرولیز ساکارز و نشاستهٔ ذرت تولید می‌شود و در مقایسه با دیگر کربوهیدرات‌ها به طور کامل در بدن جذب نمی‌شود. استویا شیرین‌کنندهٔ گیاهی است که از برگ‌های گیاه *Stevia rebaudiana* استخراج می‌شود و در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این ترکیب علاوه بر ایجاد طعم شیرین در مادهٔ غذایی هیچگونه انرژی در بدن تولید نمی‌کندو اغلب حاوی بیش از ۹۰ درصد

A *rebaudioside* است. این ترکیب سبب ایجاد طعم مطلوب در ماده غذایی می‌شود (Zumbe *et al.* , 2001). نکتهٔ مهم در استفاده از چنین شیرین‌کننده‌هایی این است که این شیرین‌کننده‌ها طعم و ویژگی‌های حسی محصول نهایی را تغییر نمی‌دهند و کالری دریافتی را نیز کاهش می‌دهند. تحقیقات متعددی در زمینهٔ جایگزینی ساکارز با قندهای کم کالری مختلف مانند مالتیتول، ایزومالت و زایلیتول (Sokmen and Gunes, 2006) اینولین و مالتیتول (Rapaille *et al.* , 1995) ، دی تاگاتوز (Shourideh *et al.*, 2010) ، و گالاکتو اولیگوساکارید (Suter, 2010) شده است اما پژوهش‌ها در زمینهٔ تاثیر قندهای کم کالری بر ویژگی‌های رئولوژیکی شکلات تلخ محدود است.

میزان مصرف شکلات به شدت به ویژگی‌های رئولوژیکی آن وابسته است. بنابراین کنترل ویژگی‌های رئولوژکی از نکات مهم در تولید شکلات است. برای مثال، شکلات‌های دارای ویسکوزیتهٔ بالا حالت خمیری دارند که سبب ایجاد ماسیدگی در دهان می‌شوند (Beckett, 2008). ویژگی‌های رئولوژیکی شکلات به عواملی چند وابسته است مانند نحوهٔ اجرای فرآیند، توزیع اندازهٔ ذرات[1] و ترکیبات به‌کار رفته در فرمولاسیون شکلات مانند کره کاکائو و ترکیبات غیرچرب مانند پودر کاکائو و شکر (Fernandes *et al.* , 2013). مطالعات روی بهینه‌یابی جایگزین‌های شکر و تأثیر آن بر ویژگی‌های حسی، تکنولوژیکی و رئولوژیکی بدون در نظر گرفتن تشابه خاصیت شیرین‌کنندگی جایگزین‌های شکر نسبت به ساکارز صورت گرفته است. هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر ترکیبات جایگزین شکر است که نسبت شیرین‌کنندگی مشابه نسبت به یکدیگر دارند شامل ایزومالت (۰/۵)، اینولین (۰/۵) و سوربیتول (۰/۶) و تأثیر آن بر ویژگی‌های حسی و رئولوژیکی شکلات تلخ که علاوه بر تولید محصولی با ویژگی‌های حسی مناسب بتواند در تامین سلامت مصرف‌کننده مؤثر باشد.

مواد و روش‌ها

مواد

پودر سوربیتول با خلوص ۹۸ درصد از شرکت شیمیایی رازی اصفهان، لسیتین سویا با رطوبت ۲/۱ درصد وزنی ساخت شرکت Palssgard (Warcoimg, Belgium)، کره کاکائو تولید شرکت Cargill (Shanghai, China)، پودر کاکائو با ۱۲ درصد چربی و ۴/۸ درصد رطوبت تولید شرکت Cargill (Shanghai, China) شکر از شرکت قند نقش جهان اصفهان، اینولین بلند زنجیر Orafti®HPX از شرکت Beneo (Mannheim, Germany)، ایزو مالت galen IQ 990 تولید شرکت Beneo (Germany Mannheim) ، استویا با فاکتور شیرینی ۳۰۰ ساخت شرکت Steviapack(Singapore) در این پژوهش به‌کار گرفته شد.

تولید نمونه‌های شکلات تلخ

شکلات‌های تلخ مطابق با فرمولاسیونی که در جدول ۱ به آن اشاره شده است تهیه شدند. از استویا به منظور تامین طعم شیرینی استفاده و مقدار آن مطابق با معادلهٔ موازنه شیرینی تعیین شد (Shourideh *et al.* , 2010):

میزان شیرین‌کنندگی شکر× مقدار شکر= میزان شیرین کنندگی استویا× مقدار استویا + میزان شیرین کنندگی اینولین، ایزومالت یا سوربیتول × مقدار اینولین، ایزومالت یا سوربیتول

شیرینی شکر معادل ۱ اینولین و ایزومالت معادل ۰/۵، سوربیتول معادل ۰/۶ و استویا ۳۰۰برابر شیرینی ساکارز در نظر گرفته شد. مقدار محاسبه‌شده در فرمولاسیون آزمایشی استفاده شد و میزان شیرینی آن با ارزیابی حسی مورد آزمون و تأیید قرار گرفت. بر این اساس، در ازای مصرف ۴۹/۵ گرم ساکارز با توجه به نزدیک بودن ضرایب شیرینی

1 -particle size distribution

اینولین، ایزومالت و سوربیتول نسبت به ساکارز، حدود ۰/۰۸ گرم استویا در فرمولاسیون شکلات تلخ بدون شکر استفاده شد. به منظور جلوگیری از کلوخه‌ای شدن احتمالی مواد طی فرآیند تولید شکلات تلخ، ابتدا کره کاکائو پس از توزین در دمای ۵۰ درجه سلسیوس ذوب شد. این ماده با شکر کریستالی (یا جایگزین‌های شکر)، پودر کاکائو و لستین در یک هات پلیت مغناطیسی مدل HS860 ساخت شرکت آلفا (تهران، ایران) به منظور تولید خمیر شکلات هوموژنیزه شد به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط گردید. خمیر حاصل به منظور مخلوط کردن، آسیاب کردن و کنچ کردن در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به درون دستگاه آسیاب ساچمه‌ای آزمایشگاهی ریخته شد. این آسیاب ساخت شرکت فراگیر صنعت مهربین (اصفهان، ایران) با قطر ساچمه ۴ میلی‌متر، پمپ سیرکوله‌کننده با سرعت ۱۲کیلوگرم بر ساعت و سرعت چرخش ۱۰۰دور بر دقیقه است. پس از گذشت ۶۰ دقیقه، لستینی که پیش از این در ین ماری ذوب شده بود درون دستگاه آسیاب ساچمه‌ای ریخته شد. مدت‌زمان کل ریفاینینگ و همگن کردن (هوموژناسیون) ۳ ساعت بود. نمونه‌های شکلات در مرحلهٔ بعد تحت فرآیند آماده سازی دمایی قرار داده شدند. پس از آن فرآیند حرارتی سه مرحله‌ای به ترتیب۳۲، ۲۸ و ۵۰ درجه سلسیوس به کار گرفته شد و سپس مخلوط همگن شده به دقت در قالب ریخته شدند. به منظور سفت‌شدن بافت شکلات، نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۴ درجه‌سلسیوس قرار گرفتند. نمونه‌ها پس از قالب‌گیری به‌درون نایلون‌های در بسته منتقل و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۶ درجه سلسیوس، پیش از آغاز آزمایش، نگهداری شدند (Li & Liu , 2019).

اندازه‌گیری‌های رئولوژیکی

برای بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی، از دستگاه رئومتر (MCR-300, Physica/Anton Paar, Ostfildern, Germany) مجهز به سیستم اندازه‌گیری صفحات موازی (قطر ۲۵ میلی‌متر و فاصلهٔ صفحات ۱میلی‌متر) و سیستم کنترل دمایی peltier (P-PTD 200/AIR) بر اساس روش ICA46 (2000) با کمی تغییرات استفاده شد.

جدول ۱. نوع و نسبت شیرین‌کننده‌های مختلف به‌کار رفته در فرمولاسیون شکلات تلخ

Table 1- The type and ratio of different sweeteners used in the formulation of dark chocolate

نوع شکلات Chocolate Type	کره کاکائو Cocoa Butter	پودر کاکائو Cocoa powder	ساکارز Sucrose	لستین Lecithin	سوربیتول Sorbitol	اینولین Inulin	ایزومالت Isomalt	پودر استویا Stevia powder
	مواد تشکیل دهنده(٪) Raw Material (%)							
نمونهٔ شاهد Control	40	10	49.5	0.5	-	-	-	-
نمونهٔ حاوی ۱۰۰ درصد ایزومالت 100% Isomalt	40	10	-	0.5	-	-	49.5	0.08
نمونهٔ حاوی ۱۰۰ درصداینولین 100%Inulin	40	10	-	0.5	–	49.5	-	0.08
نمونهٔ حاوی ۱۰۰ درصد سوربیتول 100%Sorbitol	40	10	-	0.5	49.5	–	-	0.08

برای اندازه‌گیری ویژگی‌های رئولوژیکی پایا، نمونه‌ها ابتدا در آون ۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۶۰ دقیقه ذوب و پس از آن به حمام آب گرم با دمای ثابت ۴۰ درجه سلسیوس منتقل شدند. آزمون‌ها در روش پایا شامل دو مرحله بود؛ در مرحلهٔ اول نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در معرض تنش برشی ۵ پاسکال و در مرحلهٔ دوم تحت تنش

برشی ۵ تا ۵۰ پاسکال به مدت ۳ دقیقه قرار گرفتند. نمودارهای تنش و ویسکوزیته ظاهری به عنوان تابعی از سرعت برشی رسم شدند. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های رئولوژیکی در شرایط نوسانی به منظور تعیین دامنهٔ خطی[1] (LVR)آزمون روبش فرکانس در دامنهٔ یک ۰/۱ تا ۱۰۰ با فرکانس ثابت ۱۱ هرتز اجرا شد. پس از تعیین کرنش مناسب، آزمون روبش فرکانس در دامنه ۰/۰۱ تا ۱۰۰ هرتز با کرنش ثابت ۰/۰۱ درصد اجرا و مقادیر مدول افت(G'') و مدول ذخیره (G') به عنوان تابعی از فرکانس رسم شد.

مقاومت کلی مواد در برابر تغییر شکل را مدول کمپلکس(G^*) با واحد پاسکال در نظر می‌گیرند. پاسخ نمونه به کرنش سینوسی اعمال شده از طریق مدول کمپلکس مطابق با معادله ۱ محاسبه می‌شود(Dimitreli and Thomareis, 2008).

$$G^* = \sqrt{G'^2 + G''^2} \qquad (۱)$$

فاکتور افت[2] عددی است بدون بعد که از نسبت مدول افت به مدول ذخیره مطابق با رابطهٔ ۲ به دست می‌آید. پس از محاسبهٔ مقادیر مربوط به فاکتور افت تغییرات آن به عنوان تابعی از فرکانس روی نمودار رسم شد (Gao *et al.* , 2015).

$$\tan\delta = \frac{G''}{G'} \qquad (۲)$$

پروفایل ذوب شکلات

برای بررسی ویژگی‌های ذوب شکلات تلخ، از دستگاه کالریمتر روبش افتراقی[3] (NETZSCH DSC 214,) ساخت آمریکا مجهز به سیستم پایگاه آنالیز حرارتی استفاده شد. بدین منظور پس از قرار دادن ۵ گرم نمونهٔ شکلات در یک ظرف آلومینیمی، جریانی از نیتروژن با سرعت ۲۰ میلی‌لیتر بر دقیقه از روی نمونه عبور داده شد. نمونه‌ها از دمای صفر تا ۵۰ درجه سلسیوس با شدت ۵ درجه سلسیوس بر دقیقه حرارت‌دهی شده و پارامترهایی مانند دمای ابتدایی ذوب[4]، دمای انتهایی ذوب[5] دمای پیک ذوب[6] و آنتالپی ذوب[7] اندازه‌گیری شدند. (Gloria and Sievert, 2001).

ارزیابی حسی

نمونه‌های شکلات با کدهای سه رقمی به طور تصادفی شماره‌گذاری و همراه با پرسشنامه در اختیار ۱۵ نفر ارزیاب مرد گذاشته شدند. این افراد در گروه سنی ۲۵ تا ۳۷ سال بودند و آموزش‌های لازم را در این زمینه و پیش از آن طی کرده بودند. نمونه‌ها در یک اتاق کوچک زیر نور لامپ فلورسنت با استفاده از روش آزمون هدونیک ۵ نقطه‌ای قرار داده شدند. . از ارزیاب‌ها خواسته شد تا ویژگی‌های رنگ، عطر و بو، طعم و مزهٔ شیرینی، احساس دهانی، سختی، نحوهٔ ذوب در دهان را از اعداد ۱ تا ۵ رتبه‌بندی کنند برای بهترین کیفیت عدد ۵ و برای کمترین کیفیت عدد ۱ در نظر گرفته شد (Cleaver, 2018).

تجزیه و تحلیل آماری

در مـــورد ویژگی‌های کمی از شاخص‌های میانگین و انحراف معیار استفاده شد و برای مقایسهٔ میانگین نتایج آزمون‌ها از آنالیز واریانس یک‌طرفه در سطح احتمال ۵ درصد (α =۰/۰۵) و در صورت معنی‌دار بودن ($p<۰/۰۵$) برای تعیین تفاوت میانگین‌ها از آزمون دانکن استفاده شد. داده‌ها با نرم‌افزار SPSS19 آنالیز شدند.

نتایج و بحث

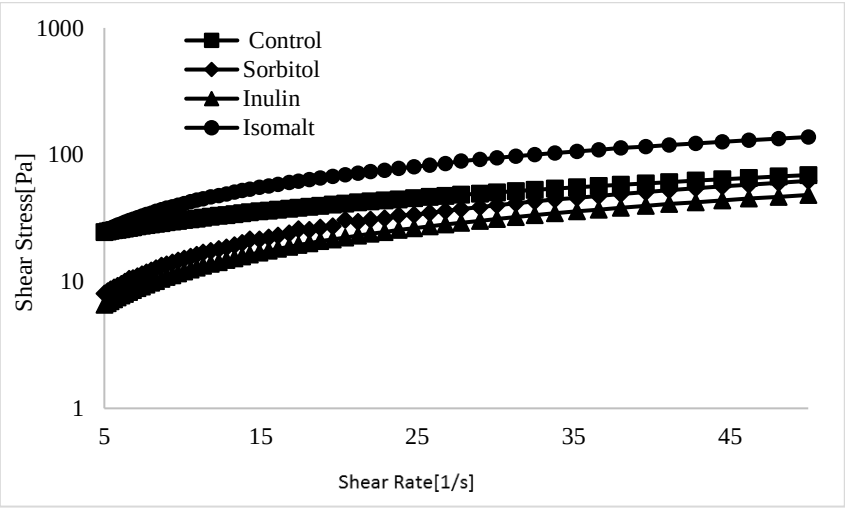
بررسی رفتار جریانی شکلات

برای بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی، از نمودارهای تنش برشی و ویسکوزیتهٔ ظاهری در برابر سرعت برشی استفاده شد. نتایج مطابق با شکل ۱ نشان داد که تمامی نمونه‌ها

1- Linear viscoelastic region
2 -Loss factor
3 - Differential scanning calorimeter
4 - Onset temperature
5 - End temperature
6 - Peak temperature
7 - Enthalpy of melting

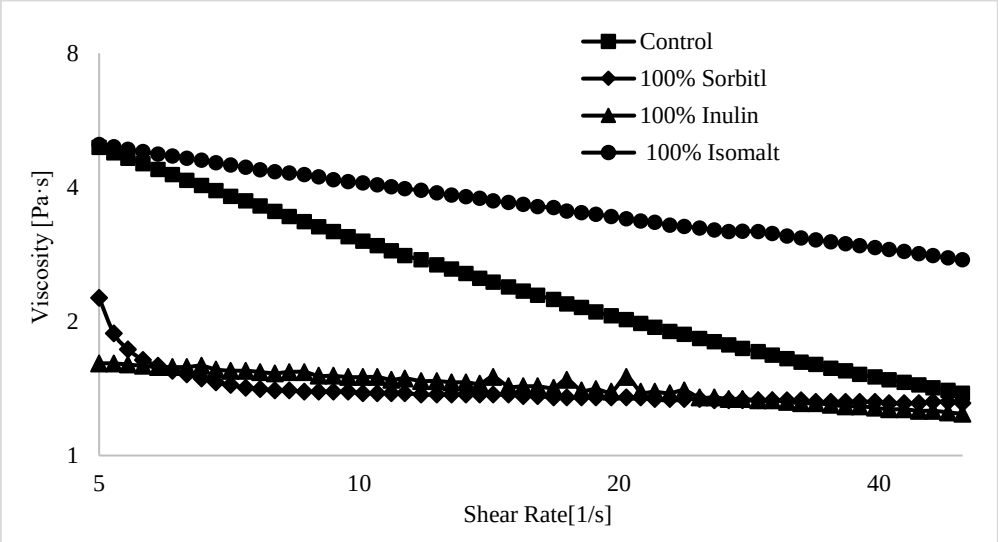
دارای تنش رفتار رقیق‌شوندگی با برش هستند. این نتیجه‌گیری با یافته‌های سرویز و همکاران(Servais *et al.* , 2003) و گلیرنا همکاران (Glicerina *et al.*, 2013) مطابقت دارد. کمترین میزان تنش تسلیم مربوط به نمونه‌های حاوی اینولین و بیشترین مقدار آن مربوط به نمونه‌های حاوی ایزومالت است. به عبارت دیگر، کمترین و بیشترین انرژی لازم برای جریان یافتن نمونه‌ها به ترتیب مربوط به شکلات‌های حاوی اینولین و ایزومالت است. در پژوهش فرزان مهر و همکاران (Farzanmehr *et al.* , 2008) نیز تنش تسلیم نمونهٔ شاهد از تمامی نمونه‌ها بیشتر اعلام شده است. در بررسی‌های شاه و همکاران(Shah *et al.* , 2010) روی تولید شکلات کم‌کالری با استفاده از استویا به عنوان شیرین‌کننده و اینولین و پلی دکستروز به عنوان پرکننده نیز کاهش تنش تسلیم مشاهده شده است.

میزان تنش برشی به صورت خطی با افزایش سرعت برشی افزایش یافته است به طوری که نمونه‌های حاوی ایزومالت و ساکاروز دارای بیشترین میزان ویسکوزیتهٔ ظاهری و نمونهٔ حاوی اینولین دارای کمترین مقدار ویسکوزیته ظاهری هستند (شکل ۲). اینولین پلی-ساکاریدی است با ساختارهای شاخه‌مانند متعدد که از پرشدن فضاهای خالی موجود در ماتریکس شکلات توسط کره کاکائو جلوگیری می‌کند بنابراین، قابلیت تحرک کره کاکائو در فضای ماتریکس شکلات افزایش می‌یابد که به نظر می‌رسد این امر موجب کاهش ویسکوزیتهٔ ظاهری نمونه‌های حاوی این ترکیب شده است. بیشتر بودن ویسکوزیتهٔ ظاهری نمونه‌های حاوی ایزومالت را می‌توان به بیشتر بودن سطح ذرات ایزومالت نسبت داد. بدین معنی که ایزومالت مورد استفاده در این پژوهش دارای دانسیتهٔ کمتری(۰/۸۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) نسبت به سایر شیرین‌کننده‌هاست (۱/۶۰ و ۱/۴۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب به ترتیب مربوط به ساکارز و سوربیتول). بنابراین در وزن مساوی از شیرین‌کننده‌ها ایزومالت دارای مواد جامد و سطح بیشتری است که سبب افزایش ویسکوزیتهٔ شکلات‌های تلخ حاوی این ترکیب شده است (Sokmen and Gunes, 2006). رفتار سودوپلاستیک نمونه‌های شکلات را نیز می‌توان به شکسته‌شدن ساختار شبکه ماتریکس شکلات و کشیده‌شدن مولکول‌های جریان نسبت داد که بر اثر نیروهای هیدرولیک تنش برشی وارد می‌شود (Izidoro *et al.* , 2008).



شکل ۱. نمودار تنش برشی به سرعت برشی شکلات‌های تلخ حاوی ساکارز و شیرین‌کننده‌های کم‌کالری در دمای ٤۰ درجه سلسیوس

Fig.1- Shear stress-shear rate rheograms of dark chocolates containing sucrose and low-calorie sweeteners at 40°C.



شکل۲. نمودار ویسکوزیتهٔ ظاهری به سرعت برشی شکلات‌های تلخ حاوی ساکارز و شیرین‌کننده‌های کم‌کالری در دمای ٤٠ درجه سلسیوس

Fig.2- Apparent viscosity-shear rate rheograms of dark chocolates containing sucrose and low-calorie sweeteners at 40°C.

بررسی نتایج آزمون نوسانی

محدوده‌ای که در آن مدول کمپلکس در برابر نوسان اعمال‌شده تغییر نمی‌کند محدوده، ویسکوالاستیک خطی (LVR) نامیده می‌شود. آزمون روبش کرنش به منظور تعیین محدودهٔ ویسکوالاستیک خطی اجرا گردید و کرنش ثابت ۰/۰۱ درصد در آزمون روبش فرکانس برای تعیین ویژگی‌های رئولوژیکی شکلات تلخ ذوب‌شده در دمای ۴۰ درجه سلسیوس استفاده شد. مدول ذخیرهٔ (G') شاخصی است از رفتار الاستیک نمونه و نشان‌دهنده میزان انرژی لازم برای تغییر شکل نمونه طی اعمال نیرو که به صورت ذخیره‌ای در داخل جسم موجود است در حالی که مدول افت(G") نشان‌دهنده میزان انرژی آزادشده از تجسم اعمال فرایند برش و نشان‌دهندهٔ اجزای ویسکوز نمونه است (De Graef *et al.* , 2011). مطابق با شکل ۳ ، در فرکانس‌های کمتر از ۲۰ هرتز مقادیر مربوط به هر دو مدول افت و ذخیره با افزایش فرکانس زاویه افزایش پیدا می‌کنند در حالی که در فرکانس‌های بالاتر از ۲۰ هرتز مقادیر هر دو مدول با افزایش فرکانس تقریباً ثابت و مستقل از فرکانس هستند.

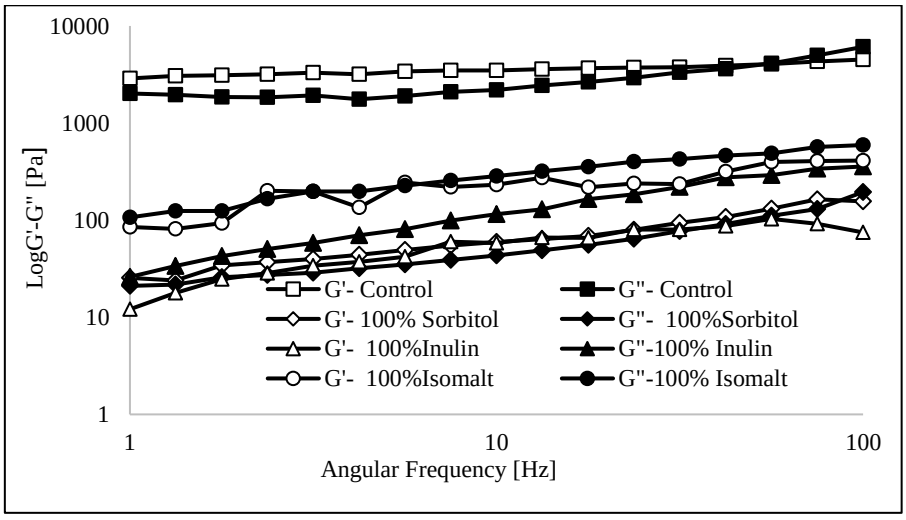
در نمونه‌های شکلات حاوی ساکاروز و سوربیتول به ترتیب در فرکانس‌های کمتر از ۵۰ و۹۰ هرتز مدول ذخیره‌ای بیش از مدول افت است. هنگامی که فرکانس زاویه‌ای به فرکانس‌های مذکور رسید نمودارهای مدول افت و ذخیره یکدیگر را قطع می‌کنند و مدول افت بر الاستیک غلبه پیدا می‌کند که این مسئله نشان‌دهندهٔ شروع رفتار ویسکوز در شکلات‌های حاوی ساکاروز و سوربیتول است، بنابراین، در مجموع می‌توان گفت جایگزین کردن سوربیتول با ساکارز سبب افزایش فرکانس تقاطعی مدول‌ها از ۵۰ به ۹۰ هرتز می‌شود که افزایش رفتار الاستیک را در شکلات‌های حاوی این ترکیب نشان می‌دهد، و باعث کاهش مدول‌های ذخیره و افت در نمونه می‌شود. در شکلات‌های حاوی اینولین و ایزومالت هیچگونه تقاطعی میان نمودارهای مدول افت و ذخیره در طول فرکانس زاویه مورد بررسی دیده نشد و همیشه مقادیر مدول افت از مدول ذخیره‌ای

بالاتر است که نشان‌دهندهٔ غلبهٔ رفتار ویسکوز بر الاستیک در این نمونه‌هاست.

الاستیسیته سوسپانسیون شکلات را می‌توان از طریق سرعت بازیابی تغییر شکل ایجادشده در ساختار شبکه آنها ارزیابی کرد. بیشتر بودن اعداد مربوط به مدول ذخیره‌ای نسبت به مدول افت نشان‌دهندهٔ تشکیل ساختارهایی در شکلات است که با افزایش فرکانس زاویه‌ای شکسته شده‌اند. جانسون و برگنشتال(Johansson & Bergenståhl, 1992) گزارش دادند که بیشتر بودن اعداد مربوط به ذخیره‌ای می‌تواند ارتباط داشته باشد با نیروهای شکل‌گرفته و برهمکنش بیشتر میان اجزا در مادهٔ غذایی. بنابراین، به نظر می‌رسد بیشتر بودن مدول الاستیک نسبت به مدول افت در نمونه‌های حاوی سوربیتول و ساکاروز می‌تواند نشان دهندهٔ تشکیل ساختارهای ژل مانندی به ترتیب در فرکانس‌های پایین‌تر از ۹۰ و ۵۰ هرتز باشد که با افزایش فرکانس شکسته شده‌اند. در حالی که در نمونه‌های حاوی ایزومالت و اینولین به دلیل تشکیل‌نشدن فرکانس تقاطعی میان مدول افت و ذخیره‌ای چنین ساختارهایی تشکیل نشده است. بیشتر بودن مدول الاستیک در نمونهٔ حاوی ساکارز و ایزومالت نسبت به سایر تیمارها نشان دهندهٔ وجود نیروهای جاذبهٔ درون مولکولی بیشتر میان این تیمارها ست که مطابق با یافته‌های شکل ۱ سبب شده نیروی مورد نیاز بیشتری برای جریان یافتن آنها لازم باشد و به عبارتی دارای بیشترین تنش تسلیم باشند. در حالی که نمونهٔ حاوی اینولین با کمترین میزان مدول ذخیره‌ای دارای کمترین میزان تنش تسلیم نیز هست.

تانژانت افت نشان‌دهنده نسبت مقدار انرژی آزادشده در هر سیکل آزمایش به مقدار انرژی ذخیره‌شده در جسم در همان زمان است. شکل ۴ نتایج نشان می‌دهد که این پارامتر در مورد شکلات‌های حاوی ایزومالت و اینولین در تمامی فرکانس‌های مورد بررسی بیشتر از ۱ است که نشان‌دهنده غلبه رفتار ویسکوز و وجود مقادیر زیادی از اجزای چسبنده در فرمولاسیون شکلات بوده است

.



شکل۳. نمودار تغییرات مدول‌های ذخیره‌ای و افت نسبت فرکانس زاویه‌ای شکلات‌های تلخ حاوی ساکارز و شیرین‌کننده‌های کم‌کالری در دمای ٤۰ درجه سلسیوس

Fig. 3- Loss and storage modulus of dark chocolates containing sucrose and low-calorie sweeteners at 40°C as a function of frequency.

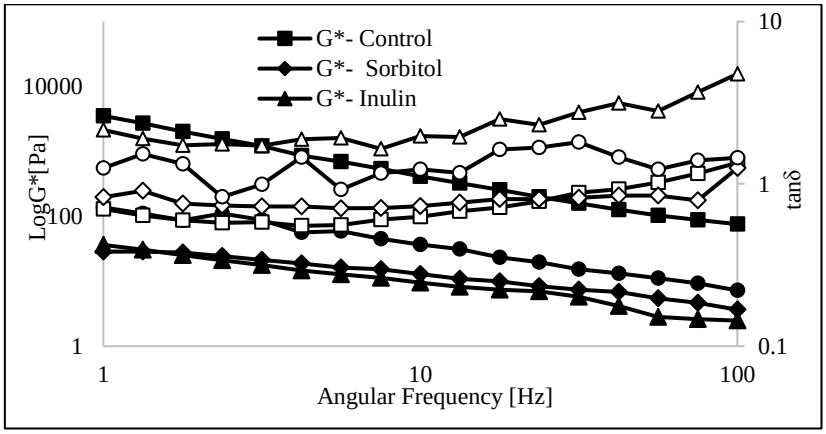
نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج یافته‌های گائو و همکاران (Gao *et al.* , 2015) و ون در وارت و همکاران (Van der Vaart *et al.*, 2013) در مورد بررسی رفتار رئولوژیکی شکلات تلخ حاوی شیرین‌کننده‌های حجمی مطابقت دارد. بنابر انتظار، میزان تانژانت افت با افزایش فرکانس زاویه‌ای از کمتر از یک به بیش از یک در مورد شکلات‌های حاوی سوربیتول و ساکاروز افزایش یافته است. بیشترین میزان تانژانت افت مربوط به نمونهٔ حاوی اینولین است که با یافته‌های کیومرثی و همکاران (Kiumarsi *et al.* , 2017) مطابقت دارد. کمترین میزان تانژانت افت مربوط به نمونه‌های حاوی سوربیتول است که نشان می‌دهد جایگزینی شکر با اینولین و ایزومالت سبب افزایش رفتار ویسکوز در نمونه‌های شکلات شده‌است، در حالی که جایگزینی شکر با سوربیتول سبب افزایش رفتار ویسکوالاستیک در شکلات‌های تلخ شده است.

یافته‌های مربوط به تغییرات مدول کمپلکس نسبت به فرکانس زاویه‌ای نشان می‌دهد با جایگزین کردن شکر با شیرین‌کننده‌های حجمی این پارامتر کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، نمونهٔ شاهد دارای بیشترین مقاومت در برابر تغییر شکل است که با جایگزینی شکر ساختارها شکلات‌های تلخ بدون شکر ضعیف‌تر شده‌است. در توجیه این امر می‌توان گفت به نظر می‌رسد وجود سطح هیدروفیلیک کریستال‌های ساکارز و بر هم کنش میان ذرات ساکارز با هم و با سایر ذرات موجود در فرمولاسیون شکلات تلخ سبب افزایش استحکام بافت شکلات تلخ حاوی این ترکیب شده‌است. با کاهش فضاهای موجود میان ذرات تشکیل دهندهٔ شکلات تلخ، حرکت کره کاکائو را در فضای آزاد موجود در ماتریکس شکلات محدود کرده و از این طریق تغییر شکل شکلات تلخ را تحت تاثیر قرار داده است (Kiumarsi *et al.* , 2017).

ترتیب نمونه‌های شکلات بر اساس میزان مقاومت در برابر تغییر شکل به صورت زیر است:

نمونهٔ حاوی سوربیتول < نمونهٔ حاوی اینولین< نمونهٔ حاوی ایزومالت < نمونهٔ حاوی ساکارز

همان‌گونه که پیش از این گفته شد، مطابق با شکل ۳ جایگزین کردن شکر با شیرین‌کننده‌های حجمی سبب کاهش مدول و ذخیره شده است. بنابراین، می‌توان تفاوت ایجادشده میان مدول کمپلکس در نمونه‌های مختلف را بدین صورت توجیه کرد.



شکل ٤. نمودار تغییرات مدول کمپلکس و تانژانت افت نسبت به فرکانس زاویه‌ای شکلات‌های تلخ حاوی ساکارز و شیرین‌کننده‌های کم‌کالری در دمای ٤٠ درجه سلسیوس

Fig. 4- Loss and complex modulus of dark chocolates containing sucrose and low-calorie sweeteners at 40°C as a function of frequency.

پروفایل ذوب شکلات‌های تلخ

کره کاکائو ۶ نوع پلی‌مورفیسم دارد که نوع اول (γ) آن دارای دمای ۱۶ تا ۱۸ درجه سلسیوس و نوع دوم(α) دارای دمای ۲۲ تا ۲۴ درجه سلسیوس کمترین میزان پایداری را دارد و به آرامی به نوع سوم پلی‌مورفیسم با دمای ۲۴ تا ۲۶ درجه سلسیوس و نوع چهارم(β1) با دمای ۲۶ تا ۲۸ درجه سلسیوس تبدیل می‌شود. پلی‌مورفیسم نوع ۵ (β) که مناسب‌ترین نوع پلی‌مورف در شکلات است دارای دمای ۳۲ تا ۳۴ درجه سلسیوس ،پایین‌تر از دمای بدن، است. انواع پلی‌مورف ۴ و ۵ نیز می‌توانند در دوره نگهداری به پلی‌فرم نوع ۶ (β2) پایدارترین فرمت تبدیل شود. شکلات‌هایی که دارای گرمادهی با دمای مناسب بوده‌اند دارای پلی‌مورف نوع ۵ یا بتا هستند که دارای ظاهری مطلوب و براق، خاصیت خرد شدن مناسب مقاومت در برابر شکوفه‌ای شدن و عمر انبارداری خوب هستند. مهاجرت حتمی و کریستالیزاسیون مجدد می‌تواند منجر به تشکیل نامناسب پلی‌فرم‌های پایدار در کره کاکائو و تشکیل پلی‌فرم نوع ۶ شود(Afoakwa *et al.* , 2008). جدول۲ نشان می‌دهد که میان نمونه‌های مختلف شکلات اختلاف معنی‌داری (p<۰/۰۵) از لحاظ دمای ابتدایی وجود دارد، به‌طوری‌که نمونهٔ حاوی سوربیتول دارای بیشترین و نمونهٔ حاوی ایزومالت و اینولین دارای کمترین مقدار دمای ذوب اولیه هستند. پایین‌تر بودن دمای اولیه در نمونه‌های شکلات حاوی ایزومالت و اینولین نشان‌دهنده میزان کریستالیزاسیون بالاتر در این دو نمونه شکلات است. در این دو نمونه، در دماهای پایین‌تر کریستال‌ها شروع به ذوب شدن کردند در حالی که در نمونه‌های حاوی ساکاروز و سوربیتول کریستال‌ها در دماهای بالاتر شروع به ذوب شدن کردند. اضافه کردن اینولین به فرمولاسیون شکلات سبب ایجاد فضاهای خالی و متخلخل در ماتریکس شکلات می‌شود که برهمکنش بین ذرات را کاهش می‌دهند و همین عامل سبب شده ویسکوزیتهٔ شکلات‌های حاوی اینولین و میزان تنش تسلیم آن نیز کاهش یابد(Esmali *et al.* , 2019). از طرف دیگر، ایزومالت نیز دارای ساختارهای اسفنجی با حفره‌های متعدد است که اجزای سازندهٔ آن به صورت یکپارچه اتصال برقرار نکرده و باعث ایجاد حفره‌هایی در ماتریکس شکلات شده و برهمکنش اجزا را کاهش داده است. بنابراین، دمای اولیه ذوب در این نمونه شکلات‌ها نیز کاهش یافته است(Oba *et al.* , 2017). اما وجود دماهای اولیه بالاتر نشان‌دهندهٔ برهمکنش بیشتر بین ذرات است و از حرکت آزادانهٔ چربی در ماتریکس شکلات جلوگیری می‌کند. بنابراین، شکلات‌های حاوی سوربیتول برهم‌کنش اجزای بیشتر و دمای اولیه ذوب بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشته‌اند. یافته‌ها مطابق با جدول ۲ نشان می‌دهند که نمونه‌های حاوی اینولین دارای کمترین میزان دمای پیک و نمونهٔ شاهد به صورت معنی‌داری دارای بالاترین دمای پیک است. با بررسی نقطهٔ ذوب نمونه‌ها در می‌یابیم برای تمامی نمونه‌ها این دما در محدودهٔ ۳۲ تا ۳۴ درجه سلسیوس است که نشان‌دهندهٔ تشکیل پلی‌مورفیسم نوع ۵ (β)، مناسب‌ترین نوع پلی مورف در شکلات، و بیانگر فرآیند حرارت دهی (تمپرینگ) مناسب در شکلات است. بنابراین، جایگزین کردن شکر با ترکیبات شیرین‌کنندهٔ کم‌کالری سبب کاهش جزئی دمای پیک می‌شود. در توجیه این امر می‌توان گفت به دلیل اختلاف در ساختار و پیوندهای بین مولکولی پلی‌اولهایی مانند ایزومالت و سوربیتول دارای انحلال‌پذیری و مقدار رطوبت بیشتر نسبت به ساکاروز هستند. بنابراین، ذوب کره کاکائو را به دلیل رسیدن سریع‌تر به دمای دهان تسهیل می‌کند. با توجه به اینکه فاز پیوسته در شکلات را چربی تشکیل می‌دهد اما دیگر ترکیبات مانند پودر کاکائو شکر و شیرین‌کننده‌های کم‌کالری دارای انحلال‌پذیری بسیار بالا در آب هستند این ترکیبات بر ویژگی‌های ذوب کره کاکائو در فضای دهان اثر می‌گذارد و بنابراین ویژگی‌های ذوب کره کاکائو به دیگر ترکیبات موجود در فرمولاسیون شکلات مربوط خواهد بود. آنتالپی ذوب نشان‌دهندهٔ گرمای لازم برای ذوب کامل نمونه‌های شکلات است که به فاکتورهای متعددی مانند

برهمکنش و پیوند میان اجزا، اندازهٔ ذرات و ساختار شیمیایی ترکیبات بستگی دارد. جدول ۲ و شکل ۵ نشان می‌دهند که نمونهٔ حاوی سوربیتول بیشترین و نمونهٔ حاوی اینولین کمترین مقدار آنتالپی ذوب را دارند.

همان‌گونه که پیشتر گفته شد، نمونه‌های حاوی ایزومالت به دلیل ساختارهای اسفنجی و وجود حفره‌های متعدد و نمونه‌های حاوی اینولین به دلیل فضاهای خالی زیاد، نسبت به نمونه‌های حاوی ساکاروز و سوربیتول، دارای برهمکنش اعضای کمتری هستند و بنابراین منطقی به نظر می‌رسد که با توجه به برهمکنش کمتر میان اجزا، این نمونه‌ها دارای آنتالپی ذوب کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها باشند. آنتالپی ذوب بیشتر در نمونه‌های حاوی سوربیتول می‌تواند نشان‌دهندهٔ این موضوع باشد که شکلات‌های حاوی سوربیتول ساختارهای مستحکمی در شبکهٔ ماتریکس شکلات ایجاد کرده‌اند که این ساختارها برای تکمیل ذوب کره کاکائو نیازمند انرژی بالاتری هستند و شکلات‌های حاوی سوربیتول مدت‌زمان بیشتری باید انرژی دریافت کنند تا ذوب شوند، به عبارت دیگر پایداری حرارتی بیشتری نسبت به سایر تیمارها دارند.

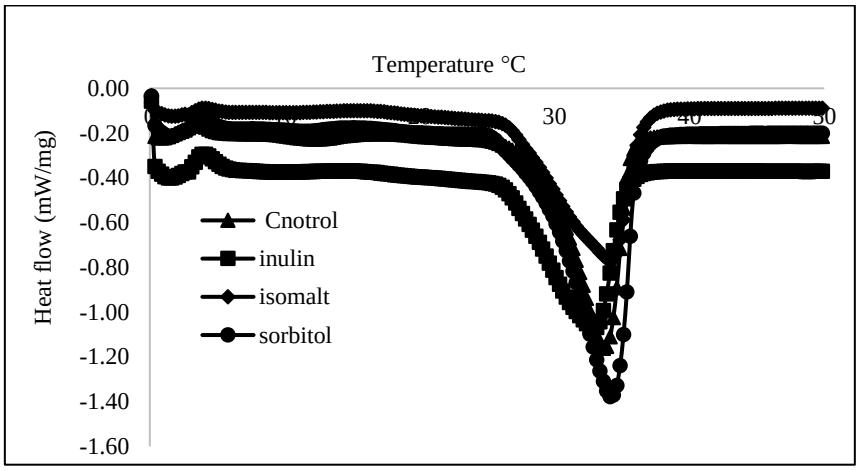
آفوکا و همکاران(Afoakwa *et al.* , 2008) دریافتند که تغییرات اندازهٔ ذرات بر کریستالیزاسیون اثر ندارد در حالی که تغییر در محتوا و میزان چربی و لستین خصوصیات ذوب را تحت تأثیر قرار می‌دهد به طوری که با افزایش مقدار لسیتین پارامترهای ذوب کاهش یافت در حالی که با افزایش میزان چربی پارامترها کاهش می‌یابد

مطابق با جدول۵ ، با توجه به اینکه دامنه دمای انتهایی ذوب نمونه‌ها ۳۴-۳۶ است می‌توان نتیجه گرفت که در انتهای ذوب پلی‌مورفیسم ۶(β2)کره مربوط به کریستال کاکائو تشکیل‌شده اختلاف معنی‌داری بین تیمارها در سطح اطمینان ۵ درصد مشاهده نمی‌شود. شاه و همکـاران (Shah, *et al.* , 2010) در پژوهش‌های خود در مورد جایگزینی شکر با اینولین و پلی‌دکستروز در شکلات شیری گزارش دادند که نقطهٔ ذوب برای تمامی نمونه‌ها در دامنهٔ ۸/۳۰ تا ۶/۳۲ است و نمونهٔ شاهد و نمونهٔ حاوی اینولین دمای ذوب بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند. این پژوهشگران دلیل افزایش نقطهٔ ذوب برای نمونه‌های حاوی اینولین را مربوط به وجود کریستال‌های ضخیم در ساختار اینولین می‌دانند. همایونی راد و همکاران (Homayounirad *et al.* , 2019) در پژوهش‌های خود در زمینهٔ استفاده از زایلیتول، ایزومالت و مالتیتول به عنوان جایگزین شکر در شکلات شیری گزارش دادند که شکلات حاوی شکر (نمونهٔ شاهد) دمای ابتدایی و دمای پیک بالاتری نسبت به دیگر نمونه دارد.

جدول ۲. پارامترهای مربوط به پروفایل ذوب شکلات‌های تلخ حاوی ساکارز، ایزومالت، اینولین و سوربیتول در دمای ۵۰ درجه سلسیوس

Table 2- Parameters related to the melting profile of dark chocolate containing sucrose, isomalt, inulin and sorbitol at 50 °C.

تیمار Sample	دمای اولیه (درجه سلسیوس) T_{onset}(°C)	دمای پیک(درجه سلسیوس) T_{peak}(°C)	دمای پایانی(درجه سلسیوس) T_{end}(°C)	آنتالپی(درجه سلسیوس) $\Delta H(Jg)^{-1}$
نمونه شاهد Control	$28.8^{b}\pm0.33$	$34.2^{a}\pm0.25$	$35.4^{a}\pm0.33$	$48.51^{c}\pm1.34$
نمونهٔ حاوی ۱۰۰ درصد ایزومالت 100%Isomalt	$26.8^{c}\pm0.37$	$32.9^{c}\pm0.27$	$35.3^{a}\pm0.28$	$42.44^{d}\pm2.14$
نمونهٔ حاوی ۱۰۰ درصداینولین 100% Inulin	$26.9^{c}\pm0.28$	$33.7^{b}\pm0.29$	$35.2^{a}\pm0.26$	$45.54^{b}\pm1.27$
نمونهٔ حاوی ۱۰۰ درصد سوربیتول 100%Sorbitol	$29.9^{a}\pm0.31$	$33.5^{b}\pm0.34$	$35.3^{a}\pm0.29$	$69.07^{a}\pm1.68$



شکل ۵. روند پروفایل ذوب‌شدن شکلات تلخ حاوی ساکارز و شیرین‌کننده‌های کم‌کالری

Fig. 5- DSC thermograms of dark chocolates containing sucrose and low-calorie sweeteners

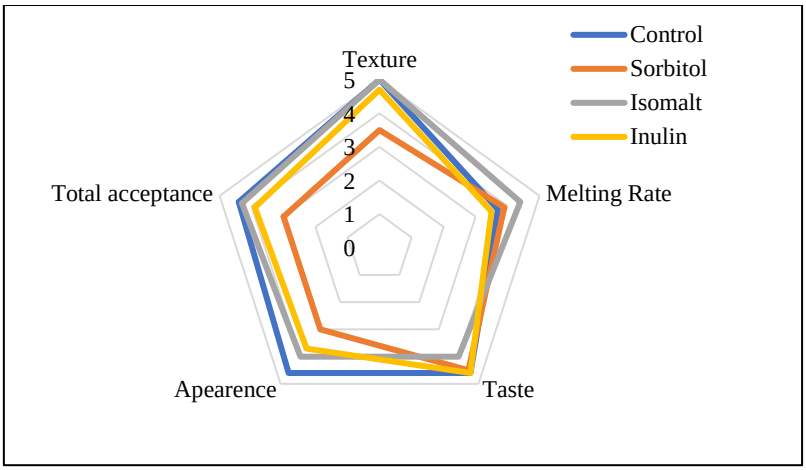
نتایج مربوط به آنالیز حسی

شکل۶ نتایج حاصل از جایگزین کردن شکر با سوربیتول، ایزومالت و اینولین را بر ویژگی‌های حسی شکلات تلخ تولیدشده نشان می‌دهد. بررسی ویژگی‌های حسی نشان می‌دهد نمونهٔ حاوی سوربیتول رنگ روشن‌تری نسبت به نمونهٔ شاهد دارد. در توجیه این امر به نظر می‌رسد با توجه به اینکه پلی اول‌ها فاقد گروه عاملی هستند و در واکنش‌های قهوه‌ای شدن آنزیمی شرکت نمی‌کنند رنگ روشن‌تر نسبت به نمونهٔ شاهد و امتیاز پایین‌تری دارند (Rossini *et al.* , 2011) ، در حالی که نمونه شاهد، ایزومالت و اینولین به ترتیب دارای بیشترین مقدار رنگ هستند و امتیازات بیشتری دارند.

ارزیابی‌های مربوط به ذوب‌شوندگی نشان می‌دهد نمونه‌های حاوی ایزومالت امتیاز بیشتری نسبت به نمونه شاهد دارند که به نظر می‌رسد دلیل این امر پایین‌تر بودن نقطهٔ ذوب اولیه این نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد است در حالی که نمونه حاوی اینولین، به‌رغم پایین‌تر بودن دمای ذوب اولیهٔ آن نسبت به نمونهٔ شاهد، امتیاز پایین‌تری در ویژگی‌های مربوط به ذوب‌شوندگی نسبت به نمونه شاهد داشته‌اند که دلیل آن را ارزیابان حسی ایجاد احساس چسبندگی در دهان بیان کرده‌اند. در مطالعات گلب و همکاران (Golob *et al.* , 2004) احساس دهانی در سه نوع شکلات شیری حاوی اینولین کمترین امتیاز را کسب کرده‌است. این محققان می‌گویند به نظر می‌رسد قابلیت کمتر انحلال اینولین نسبت به قندهای ساده مانند ساکارز سبب ایجاد احساس نامطلوب و جمع‌شدگی در دهان شده است. نتایج مربوط به پذیرش عطر و طعم مطابق با شکل۸ نشان می‌دهد که جایگزین کردن شکر با ایزومالت سبب کاهش امتیاز عطر و طعم در این نمونه‌ها شده‌است در حالی که اینولین و سوربیتول امتیازات مشابهی با نمونهٔ شاهد کسب کرده بودند. به نظر می‌رسد یکی از دلایل این موضوع میزان گرانروی نمونه‌ها باشد. گرانروی شکلات بر مدت زمانی که طول می‌کشد تا ذرات جامد شکلات به گیرنده‌های چشایی برسد تأثیر می‌گذارد (Beckett, 2008).

آزاد شدن مواد مولد عطر و بو نیز تحت تأثیر گرانروی شکلات است. بنابراین، منطقی به نظر می‌رسد که نمونهٔ حاوی ایزومالت به دلیل گرانروی ظاهری بالاتر امتیاز کمتری نسبت به سایر تیمارها داشته باشد (Bitaraf *et al.* , 2016). همایونی راد و همکاران (Homayounirad *et al.* , 2019) در پژوهش‌هایشان در زمینهٔ تولید شکلات تلخ کم‌کالری پری بیوتیک با استفاده از اینولین، پلی دکستروز و مالتو دکسترین گزارش دادند که امتیازات مربوط به طعم

نمونه‌های فاقد شکر نسبت به نمونهٔ شاهد کاهش یافته است و دلیل این امر را افزایش میزان گرانروی این نمونه‌ها نسبت به نمونهٔ شاهد ذکر کردند. نتایج حاصل از ارزیابی حسی ویژگی سختی نمونه‌ها نشان داد که شکلات حاوی سوربیتول پایین‌ترین امتیاز را دارد و ارزیابان دلیل این امر را سختی بیشتر بافت شکلات نسبت به سایر تیمارها عنوان می‌دانند. دیگر تیمارها با نمونهٔ شاهد دارای امتیازات مشابهی بودند و در مجموع از لحاظ پذیرش کلی شکلات حاوی ایزومالت امتیازات بیشتری نسبت به سوربیتول و اینولین و شباهت بیشتری با نمونهٔ شاهد دارد.



شکل ٦. نمودار تار عنکبوتی مربوط به ارزیابی حسی شکلات تلخ حاوی ساکارز و شیرین‌کننده‌های کم‌کالری

Fig. 6- Spider chart representing sensory attributes dark chocolates containing sucrose and low-calorie sweeteners.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد که تمامی نمونه‌های ذوب شده در دمای ۴۰ درجه سلسیوس دارای رفتار رقیق‌شونده با برش بودند که دلیل این امر را می‌توان به شکسته شدن ساختارهای داخلی نمونه‌های شکلات نسبت داد. شیرین‌کننده‌های حجمی بسته به ساختارهای مولکولی خود تأثیرات مختلفی بر ویژگی‌های شکلات تلخ ذوب‌شده داشتند. اینولین پلی‌ساکاریدی با ساختارهای شاخه‌مانند متعدد که سبب کاهش ویسکوزیته و ایزومالت به دلیل وجود دانسیتهٔ پایین و سطح زیاد سبب افزایش ویسکوزیته در نمونه‌های شکلات تلخ شده است که به نظر می‌رسد این مسئله به دلیل ارتباط آزادشدن مواد دارای عطر و طعم با ویسکوزیته در ارزیابی حسی آنها موثر بوده است. بررسی‌های مربوط به آزمون‌های رئولوژیکی نوسانی نشان داد که نمونه‌های حاوی سوربیتول دارای رفتارهای ژل مانند مشابه با نمونهٔ شاهد و شکلات حاوی اینولین و ایزومالت رفتار ویسکوز از خود نشان می‌دهند. جایگزین کردن شکر با ایزومالت سبب کاهش دمای ذوب اولیه آن شد که این مسئله سبب افزایش امتیاز ذوب شوندگی در دهان در ارزیابی‌های حسی شد، در حالی که به‌رغم کاهش دمای اولیه ذوب در نمونهٔ حاوی اینولین به دلیل احساس چسبندگی در دهان، امتیاز این نمونه کمتر بود. ارزیابی‌های حسی نشان داد اگرچه شکلات‌های حاوی ایزومالت از نظر پذیرش کلی شبیه به نمونهٔ شاهدند، ولی سبب تغییرات اساسی در ویژگی‌های فیزیکی شکلات شده‌اند. بنابراین، استفاده از مخلوطی از شیرین‌کننده‌های حجمی با استفاده از روش‌هایی مانند طرح ترکیبی لاتیس ساده یا شبکهٔ عصبی به‌منظور تعیین بهترین فرمولاسیون در شکلات تلخ توصیه می‌شود.

تعارض منافع

نویسندگان در خصوص انتشار مقاله ارائه شده به طور کامل از سوء اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده اند و منافع تجاری در این راستا وجود ندارد.

مراجع

Abbasi, S. and Farzanmehr, H. 2009. Optimization of the formulation of prebiotic milk chocolate based on rheological properties. Food Technology and Biotechnology. 47(4): 396-403. (in Persian).

Afoakwa, E. O. , Paterson, A. , Fowler, M. and Ryan, A. 2008. Flavor formation and character in cocoa and chocolate: a critical review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 48(9): 840-857.

Beckett, S. T. 2008. The science of chocolate, Royal Society of Chemistry. Cambridge, United Kingdom.

Bitaraf, S. , Abbasi, S. and Hamidi, Z. 2016. Effects of inulin and bulking agents on rheological properties and particle size distribution of low-calorie dark chocolate. Food Science and Technology. 13(58): 183-194. (in Persian).

Castellari, M. , Versari, A. , Fabiani, A. , Parpinello, G. P. and Galassi, S. 2001. Removal of ochratoxin A in red wines by means of adsorption treatments with commercial fining agents. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 49(8): 3917-3921.

Cleaver, G. 2018. Ranking and rank-rating. Descriptive Analysis in Sensory Evaluation. 2: 447-492.

De Graef, V. , Depypere, F. , Minnaert, M. and Dewettinck, K. 2011. Chocolate yield stress as measured by oscillatory rheology. Food Research International. 44(9): 2660-2665.

Dimitreli, G. , & Thomareis, A. S. 2008. Effect of chemical composition on the linear viscoelastic properties of spreadable-type processed cheese. Journal of Food Engineering. 84: 368–374

DuBois, G. E. 2000. Sweeteners: nonnutritive. In F. J. Francis (Ed.), Encyclopedia of food science and technology (2nd ed.) Vol. 4 (pp. 2245e2265). New York: John Wiley & Sons, Inc.

Esmali, A. , Asefi, N. and Yeganehzad, S. 2019. Effect the Ratio of an Emulsion Containing Sugar Alcohols and Particle Size on Thermal Resistance and Some Physical and Sensory Characteristics of Chocolate. Research and Innovation in Food Science and Technology. 8(2): 165-176. (in Persian).

Farzanmehr H, Abbasi S, Sahari MA. 2008. Effect of sugar replacer on some physicochemical, rheological and sensory properties of milk chocolate. Iranian Journal of Food Science & Technology. 3(3): 65-82. (in Persian)

Fernandes, V. A. , Müller, A. J. and Sandoval, A. J. 2013. Thermal, structural and rheological characteristics of dark chocolate with different compositions. Journal of Food Engineering. 116(1): 97-108.

Foubert, I. , Vanrolleghem, P. A. and Dewettinck, K. 2003. A differential scanning calorimetry method to determine the isothermal crystallization kinetics of cocoa butter. Thermochimica Acta. 400(1-2): 131-142.

Gao, X. , Guo, T. , Han, F. , Tian, Y. and Zhang, Z. 2015. Rheological and sensory properties of four kinds of dark chocolates. American Journal of Analytical Chemistry. 6(13): 1010-1020.

Glicerina, V. , Balestra, F. , Dalla Rosa, M. and Romani, S. 2013. Rheological, textural and calorimetric modifications of dark chocolate during process. Journal of Food Engineering. 119(1): 173-179.

Gloria, H. and Sievert, D. 2001. Changes in the physical state of sucrose during dark chocolate processing. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 49(5): 2433-2436.

Golob, T, Micovic, E, Bertoncelj, J. , Jamnik, M. 2004. Sensory acceptability of chocolate with inulin. Acta agriculturae slovenica. 83(2): 221-231.

Homayounirad, A. , Pirouzian, H. R. , Konar, N. , Toker, O. S. and Polat, D. G. 2019. Effects of polyols on the quality characteristics of sucrose-free milk chocolate produced in a ball mill. RSC advances. 9(51): 29676-29688. (in Persian)

Izidoro, D. R. , Scheer, A. P. , Sierakowski, M. R. and Haminiuk, C. W. 2008. Influence of green banana pulp on the rheological behaviour and chemical characteristics of emulsions (mayonnaises). LWT-Food Science and Technology. 41(6): 1018-1028.

Johansson, D. and Bergenståhl, B. 1992. The influence of food emulsifiers on fat and sugar dispersions in oils. I. Adsorption, sedimentation. Journal of the American Oil Chemists Society. 69(8): 705-717.

Kiumarsi, M. , Rafe, A. and Yeganehzad, S. 2017. Effect of different bulk sweeteners on the dynamic oscillatory and shear rheology of chocolate. Applied Rheology. 27(6): 11-19. (in Persian).

Krüger. C. 1999. Sugar and Bulk Sweetner,In: Industrial Chocolate Manufacture and Use. Beckett, S. T. 3rd ed. Oxford: Blackwell Science. 5: 36-55.

Li, L. and Liu, G. 2019. Corn oil-based oleogels with different gelation mechanisms as novel cocoa butter alternatives in dark chocolate. Journal of Food Engineering. 263: 114-122.

Nebesny, E. , Żyżelewicz, D. , Motyl, I. and Libudzisz, Z. 2005. Properties of sucrose-free chocolates enriched with viable lactic acid bacteria. European Food Research and Technology. 220(3): 358-362.

Oba, S. , Toker, O. S. , Palabiyik, I. , Konar, N. , Goktas, H. , Cukur, Y. , Artik, N. and Sagdic, O. 2017. Rheological and melting properties of sucrose-free dark chocolate. International Journal of Food Properties. 20(sup2): 2096-2106.

Rapaille A, Gonze M, Van Der Schueren F. 1995. Formulating sugar-free chocolate products with maltitol. Food Technol. 49(7): 51-4.

Rossini, K, Noreña, C. P. and Brandelli, A. 2011. Changes in the color of white chocolate during storage: potential roles of lipid oxidation and non-enzymatic browning reactions. Journal of food science and technology. 48(3): 305-311.

Servais, C. , Ranc, H. and Roberts, I. D. 2003. Determination of chocolate viscosity. Journal of Texture Studies. 34(5-6): 467-497.

Shah, A. B. , Jones, G. P. and Vasiljevic, T. 2010. Sucrose-free chocolate sweetened with Stevia rebaudiana extract and containing different bulking agents–effects on physicochemical and sensory properties. International Journal of Food Science & Technology. 45(7): 1426-1435.

Shourideh M, Taslimi A, Azizi MH, Mohammadifar MA, Mashayekh M. 2010. Effects of D-Tagatose, inulin and stevia as sugar substitutes on the physical, chemical,rheological and sensory properties of dark chocolate. Iranian Journal of Food Science & Technology. 5(3): 29-38.

Sokmen, A. and Gunes, G. 2006. Influence of some bulk sweeteners on rheological properties of chocolate. LWT-food Science and Technology. 39(10): 1053-1058.

Suter, A. 2010. The effect of galactooligosaccharide addition to a chocolate system. Doctoral dissertation, Ohio State University.

Van der Vaart, K. , Depypere, F. , De Graef, V. , Schall, P. , Fall, A. , Bonn, D. and Dewettinck, K. 2013. Dark chocolate’s compositional effects revealed by oscillatory rheology. European Food Research and Technology. 236(6): 931-942.

Wild, S. H. , Roglic, G. , Green, A. , Sicree, R. and King, H. 2004. Global prevalence of diabetes: estimates for the year 2000 and projections for 2030: response to Rathman and Giani. Diabetes Care. 27(10): 2569-2569.

Zumbe, A. , Lee, A. , & Storey, D. 2001. Polyols in confectionery: the route to sugar free, reduced sugar and reduced calorie confectionary. British Journal of Nutrition, 85(1): 32- 45.

Food Engineering Research/Vol.22/No.74/Spring & Summer 2023/P: 147-162

Journal Home page: https://fooder.areeo.ac.ir/

Original Research

The Effect of Substituting Sugar With Isomalt, Inulin and Sorbitol on the Physical and Sensory Properties of Dark Chocolate

Seyed Vahid Loghmani, Mohammad Hojjatoleslamy*, Hooman Molavi, Mohammad Fazel

*** Corresponding Author**: Ph.D, Department of Agriculture and Food Technology, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, 88137-33395, Iran.

Email: mohojjat@iaushk.ac.ir

Received:28 August 2022 **Accepted**: 12 June 2022

http://doi: 10.22092/FOODER.2023.359013.1335

Abstract

In recent years, there has been tendency among consumers to use low-calorie products with lower sugar content to promote their health. In this study, the effects of various bulk sweeteners such as isomalt, inulin and sorbitol in the formulation of dark chocolate as a sugar substitute on the rheological properties, melting behaviors and sensory properties of dark chocolate were compared and evaluated. The samples were subjected to steady and dynamic rheological analyses; melting parameters such as initial melting temperature, peak temperature, enthalpy and final melting temperature, as well as sensory analysis, were investigated using a 5-point hedonic method. The use of different types of bulk sweeteners had a significant effect on the rheological and sensory properties of dark chocolate; so, isomalt increased, while inulin and sorbitol decreased the apparent viscosity of the samples. Substituting sugar with sorbitol increased the gel-like behavior, while isomalt and inulin increased the viscous behavior of the samples. Bulk sweeteners also caused changes in the initial melting temperature and enthalpy, as well as decreasing the peak melting temperature of dark chocolate. Sensory evaluation also showed that the samples containing sorbitol had the lowest and those having sucrose had the highest score related to the total acceptance. Bulk sweeteners had different effects on the sensory and rheological properties of dark chocolate; so, the use of a mixture of these compounds to achieve an optimal formulation similar to that of the commercial sample is recommended.

Keywords: Sensory evaluation, Melting behavior, Rheology, Dark chocolate, Volumetric sweeteners.