



ایجاد یک سیستم هوشمند فازی برای تعیین ویژگی‌های کیفی فرآورده کاکائویی حاوی امولسیون آب در روغن

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۱

تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۱

کلمات کلیدی:

فرآورده کاکائویی،

امولسیون آب در روغن،

کنترل کیفیت،

منطق فازی

امولسیون‌های آب در روغن به‌عنوان جایگزین جزئی کره کاکائو، رویکردی نوین برای تولید فرآورده‌های کاکائویی با کالری کاهش‌یافته محسوب می‌شوند، اما ارزیابی ویژگی‌های کیفی این فرآورده‌ها با روش‌های سنتی، زمان‌بر و وابسته به قضاوت انسانی است. از این‌رو این پژوهش با هدف بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف امولسیون آب در روغن (صفر، ۲ و ۴ درصد وزنی) بر ویژگی‌های کیفی فرآورده‌های کاکائویی شامل آنتالپی، تغییرات طول، سفتی، شاخص کروما، فعالیت آبی، ویسکوزیته پلاستیک و پذیرش کلی و همچنین طراحی یک مدل هوشمند مبتنی بر منطق فازی برای پیش‌بینی این ویژگی‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش غلظت امولسیون باعث کاهش آنتالپی ذوب، شاخص کروما و پذیرش کلی شد، در حالی که فعالیت آبی و ویسکوزیته پلاستیک نمونه‌ها افزایش یافت و کمترین میزان سفتی مربوط به نمونه حاوی ۲ درصد امولسیون بود. مدل فازی طراحی‌شده بیشترین دقت را در پیش‌بینی فعالیت آبی (با ضریب همبستگی ۰/۹۱۵) و کمترین دقت را در پیش‌بینی سفتی (با ضریب همبستگی ۰/۷۵۳) نشان داد و در سایر ویژگی‌ها نیز ضرایب همبستگی در محدوده‌ی قابل قبولی قرار داشت که بیانگر کارایی مناسب این سیستم در پیش‌بینی ویژگی‌های کیفی فرآورده‌های کاکائویی می‌باشد. در نهایت می‌توان بیان داشت که سیستم منطق فازی توسعه‌یافته در این پژوهش، ابزاری کارآمد، سریع و قابل اطمینان برای پیش‌بینی ویژگی‌های کیفی فرآورده‌های کاکائویی ارائه می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان یک سامانه کمکی تصمیم‌گیری در کنترل کیفیت و بهینه‌سازی فرمولاسیون در صنعت شکلات مورد استفاده قرار گیرد.

DOI:10.48311/fsct.2026.121738.83270

* مسئول مکاتبات:

۱-مقدمه

درخت کاکائو با نام علمی *Theobroma cacao* L.، از راسته پنیرک‌سانان، تیره پنیرکیان و سرده تئوبروما است. نام یونانی آن به معنای «غذای خدایان» است که از آن به‌طور تجاری برای تولید شکلات استفاده می‌شود. اگرچه گوشت میوه کاکائو طعم دلپذیری دارد، اما دانه آن پرکاربردترین بخش آن در صنایع غذایی است که فرآورده‌های متنوعی از آن ساخته می‌شود که شکلات مهم‌ترین آنهاست. کاکائو و فرآورده‌های آن، به‌ویژه شکلات، از با ارزش‌ترین و پیچیده‌ترین زنجیره‌های محصولات کشاورزی در جهان هستند که از جنبه‌های اقتصادی، فرهنگی، تغذیه‌ای و حتی سیاسی نقشی عمیق دارند. با این حال، در سال‌های اخیر، بازار جهانی کاکائو با نوسانات شدید عرضه و قیمت روبه‌رو شده، پدیده‌ای که اغلب «بحران عرضه کاکائو» نامیده می‌شود و ناشی از تعامل عوامل محیطی و اجتماعی-اقتصادی است. تقاضای جهانی برای کاکائو به شدت افزایش یافته و این محصول به یکی از مهم‌ترین مواد اولیه برای تولید شکلات تبدیل شده است. اگرچه انتظار می‌رفت تولید کاکائو بین سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۳ حدود ۱ درصد رشد کند، اما مشکلات تأمین، این رشد را متوقف کرد و تولید در فصل ۲۰۲۴ به ۴/۳۸۲ میلیون تن رسید که نسبت به سال‌های قبل کاهش یافت. قیمت جهانی کاکائو در یک سال اخیر بیش از سه برابر شده است، اما این افزایش قیمت بیشتر به خاطر کمبود عرضه بوده تا بالا رفتن هزینه‌های تولید [۱-۳]. کاکائو منبع غنی از ترکیبات آنتی‌اکسیدانی مانند کاتچین، اپی‌کاتچین و پروسیانیدین است که نقش مؤثری در خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد و کاهش استرس اکسیداتیو دارند. همچنین، دانه کاکائو حاوی متیل‌گزانتین‌هایی نظیر تئوبرومین و کافئین است که اثرات محرک و افزایش‌دهنده هوشیاری دارند [۳]. چربی کاکائو حدود ۴۰ تا ۵۸ درصد از ترکیب دانه را تشکیل می‌دهد و عمدتاً از اسیدهای چرب پالمیتیک، استئاریک و اولئیک تشکیل شده است که رفتار ذوب و کیفیت بافت شکلات را تعیین می‌کنند [۴]. پیش‌بینی می‌شود بازار جهانی شکلات بیش از ۱۰۰ میلیارد دلار ارزش داشته باشد [۵] که

امر ممکن است ناشی از افزایش تقاضای مصرف‌کنندگان برای محصولات قنادی ممتاز و عملکردی با پروفایل‌های تغذیه‌ای بهبودیافته است.

کره کاکائو به‌عنوان فاز لیپیدی پیوسته در شکلات نقش دارد، اما محدودیت‌های ذاتی آن مثل حساسیت زیاد به گرما، ناپایداری در شرایط ترمودینامیکی و آسیب‌پذیری زنجیره تأمین، چالش‌های بزرگی پیش روی این صنعت قرار داده است [۶]. از طرفی رژیم‌های غذایی سرشار از اسیدهای چرب اشباع با بروز فشار خون بالا، مقاومت به انسولین و غیره مرتبط دانسته شده‌اند. به‌همین دلیل، علاقه روزافزونی به تولید جایگزین‌هایی برای جایگزینی کامل یا جزئی کره کاکائو در محصولات شکلاتی وجود دارد. این جایگزین‌ها شامل برخی امولسیون‌ها، اولئوژل‌ها، هیدروژل‌های ترکیبی و غیره هستند. در میان این گزینه‌ها، استفاده از امولسیون‌های آب در روغن (که شامل قطرات ریزی از آب با اندازه‌ای کمتر از آستانه تشخیص دهان هستند) برای جایگزینی کره کاکائو، مزایایی مانند کالری پایین‌تر و تغییرات اندک در ویژگی‌های محصول نهایی دارد، همچنین این، امولسیون‌ها می‌توانند به‌عنوان سامانه‌های انتقال مؤثر برای ترکیبات زیست‌فعال آب‌دوست در تولید محصولات شکلاتی عملکردی عمل کنند [۷]. Prosapio و Norton (۲۰۱۹) گزارش دادند که با استفاده از امولسیون‌های آب در کره کاکائو و بهینه‌سازی فرمولاسیون و پارامترهای فرآیندی، می‌توان شکلاتی با ۴۰ درصد چربی کمتر تولید کرد که ویژگی‌های بافتی و حرارتی آن به شکلات پرچرب بسیار نزدیک است [۸].

ارزیابی ویژگی‌های کیفی شکلات و فرآورده‌های کاکائویی با روش‌های سنتی اغلب وابسته به قضاوت انسانی و داده‌های نادقیق است که می‌تواند زمان‌بر و همراه با خطا باشد [۹]. منطق فازی روشی است که به ماشین‌ها امکان می‌دهد مانند انسان فکر کنند و به جای پاسخ‌های دوگانه، تصمیم‌گیری را با درجات مختلف امکان‌پذیر سازند. این روش با بهره‌گیری از قوانین ساده و دانش خبرگان، در شرایطی که اطلاعات دقیقی در دسترس نیست، به پیش‌بینی و تصمیم‌گیری کمک

می‌کند. منطق فازی در صنایع غذایی برای ارزیابی کیفیت محصولات و همچنین در مدیریت ریسک و بهبود فرایندها کاربرد گسترده‌ای دارد. هدف اصلی آن، ارائه مدلی شفاف و قابل درک برای کنترل و بهینه‌سازی فرایندهای مختلف است [۱۰-۱۲]. Azarmizad و همکاران (۲۰۲۲) با طراحی مدل فازی کنترل فرآیند آماری در صنعت شکلات، نشان دادند که رویکرد فازی نسبت به روش کلاسیک، حساسیت بیشتری در شناسایی تغییرات فرآیند داشته و کیفیت محصول را واقع‌بینانه‌تر طبقه‌بندی می‌کند [۱۳]. با این وجود، تاکنون مطالعه‌ای جامع برای ترکیب هم‌زمان دو رویکرد (استفاده از امولسیون آب در روغن و مدل‌سازی فازی) در ارزیابی کیفی فرآورده‌های کاکائویی ارائه نشده است. بنابراین، هدف از این پژوهش، ایجاد یک مدل هوشمند مبتنی بر منطق فازی است که با بهره‌گیری از داده‌های تجربی و دانش خبرگی، قادر به ارزیابی هم‌زمان و غیرخطی ویژگی‌های کیفی فرآورده‌های کاکائویی حاوی امولسیون آب در روغن بوده و به‌عنوان ابزاری کارآمد برای کنترل کیفی و بهینه‌سازی فرمولاسیون در صنعت شکلات مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

جهت انجام این پژوهش، کره‌ی کاکائو (Premium، مالزی) و امولسیفایر^۱ PGPR (Palsgaard، دانمارک)، کنسانتره‌ی پروتئین آب پنیر (Hilmar، آمریکا)، لسیتین سویا (Cargill، مالزی) پودر کاکائو کم‌چرب (با ۱۰-۱۲ درصد چربی، Altinmarka، ترکیه) وانیلین (پاندا، چین)، شربت فروکتوز (با معادل دکستروز ۴۲، گلشهد، ایران) و شکر نیز (قند بیستون، ایران) تأمین گردید.

۲-۲- تولید فرآورده‌ی کاکائویی حاوی امولسیون

برای تولید فرآورده‌ی کاکائویی با استفاده از امولسیون CBS^۲، ابتدا مواد اولیه‌ی خشک شامل پودر کاکائو، پودر شکر و شیر خشک به همراه مقدار مشخصی روغن جانشین کره کاکائو ذوب‌شده در دمای ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد روی حمام آب گرم (فن آزما گستر، ایران)، مطابق فرمولاسیون پایه، به‌همزن (فن آزماگستر، ایران) منتقل شد و فرایند اختلاط تا حصول خمیری یکنواخت و همگن ادامه یافت و خمیر حاصل برای کاهش اندازه‌ی ذرات از دستگاه رول‌ریفاینر (چرخش ماشین، ایران) عبور داده شد و سپس روغن جانشین کره کاکائو باقیمانده در دمای ۴۵ درجه‌ی سانتی‌گراد ذوب شده و به مخلوط اضافه گردید و برای انجام هم‌زمان کاهش اندازه‌ی ذرات و ورزدادن، از دستگاه آسیاب ساچمه‌ای (ماژان صنعت ارشیا، ایران) استفاده شد و فرایند تا حصول خمیری روان و یکنواخت ادامه یافت. در مرحله‌ی پایانی، به منظور کاهش ویسکوزیته و بهبود ویژگی‌های رئولوژیکی و حسی، امولسیفایرهای لسیتین و PGPR به‌همراه امولسیون آب در روغن جانشین کره کاکائو با نسبت آب به روغن ۴۵:۵۵ (حجمی/حجمی) در سه سطح غلظت صفر (شاهد)، ۲ و ۴ درصد وزنی به مخلوط اضافه گردید و سپس دمای دستگاه بر روی ۴۵ درجه‌ی سانتی‌گراد تنظیم و فرایند هم‌زدن با سرعت ۹۵ دور در دقیقه به مدت ۲ ساعت ادامه یافت و در ادامه، نمونه‌های تولیدی در دمای ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قالب‌گیری شده و سپس در دمای ۷ درجه‌ی سانتی‌گراد سرد شدند و پس از سرد شدن، نمونه‌ها در بسته‌بندی‌های پلاستیکی اتیلنی قرار گرفته و تا زمان انجام آزمون‌ها در دمای ۲۸ درجه‌ی سانتی‌گراد نگهداری شدند [۱۴-۱۶]. ترکیب دقیق هر تیمار در جدول ۱ آورده شده است.

2-Cocoa butter substitute

1-Polyglycerol polyricinoleate

Table 1- Formulation of cocoa product containing different levels of emulsion

Ingredients (%)	Control	Treatment 1	Treatment 2
Cocoa butter substitute (CBS)	30.00	28.00	26.00
Sugar	47.00	47.00	47.00
Cocoa Powder	12.40	12.40	12.40
Lecithin	0.45	0.45	0.45
Skim milk powder	10.00	10.00	10.00
PGPR	0.05	0.05	0.05
Vanillin	0.10	0.10	0.10
CBS emulsion	0.00	2.00	4.00

به منظور بررسی پایداری ابعادی فرآورده‌های کاکائویی در برابر تنش حرارتی، تغییرات طول نمونه‌ها بر اساس روش Asghar و همکاران (۲۰۱۷) با اعمال اصلاحات جزئی اندازه‌گیری گردید. بدین منظور، ابتدا طول اولیه‌ی هر نمونه با استفاده از کولیس دیجیتالی (با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر، INSIZE، چین) در سه نقطه‌ی مختلف اندازه‌گیری و میانگین آن ثبت گردید. سپس نمونه‌ها در آون الکتریکی (Memmert، آلمان) با دمای ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شدند تا تنش حرارتی اعمال شود. پس از پایان دوره‌ی تنش حرارتی، نمونه‌ها از آون خارج شده و پس از خنک‌شدن در دمای محیط (۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) به مدت ۱۰ دقیقه، طول نهایی هر نمونه مجدداً در همان نقاط اندازه‌گیری و میانگین آن محاسبه گردید. در نهایت، تغییرات طول برای هر نمونه از تفاضل طول اولیه و نهایی محاسبه گردید [۱۶].

۲-۵- تعیین سفتی نمونه‌ها

به منظور ارزیابی ویژگی‌های بافتی فرآورده‌های کاکائویی، از آزمون پروفایل بافت (TPA⁴) با استفاده از دستگاه سنجش بافت (Instron، آمریکا) مجهز به پروب استوانه‌ای به قطر ۲ میلی‌متر استفاده گردید. آزمون در شرایطی انجام شد که نمونه‌ها در دمای محیط (۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) قرار داشتند و پارامترهای آزمون شامل سرعت نفوذ ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه،

۲-۳- تعیین آنتالپی ذوب

به منظور بررسی رفتار حرارتی (آنتالپی ذوب)، فرآورده‌های کاکائویی حاوی سطوح مختلف امولسیون، از دستگاه کالریمتر روبشی تفاضلی (DSC³) (سنف، ایران) استفاده گردید. بدین منظور، حدود ۵ میلی‌گرم از هر نمونه وزن شده و درون ظروف آلومینیومی مخصوص قرار داده شد و درپوش آن محکم بسته گردید و سپس نمونه‌ها به مدت یک شب در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد نگهداری شدند تا به تعادل دمایی برسند. یک ظرف خالی آلومینیومی نیز به‌عنوان نمونه‌ی مرجع در نظر گرفته شد. نمونه‌ها و ظرف مرجع در دستگاه قرار داده شدند و از دمای صفر تا ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد با سرعت ۲ درجه‌ی سانتی‌گراد در دقیقه گرم شدند و در طول این مدت، مقدار گرمای جذب‌شده توسط نمونه اندازه‌گیری گردید. پیش از انجام آزمون، دستگاه با استفاده از استاندارد ایندیم (با دمای ذوب ۱۵۶/۶ درجه‌ی سانتی‌گراد و آنتالپی ذوب ۲۸/۴۵ ژول بر گرم) کالیبره شد. داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار TA Universal Analysis 2000 پردازش شدند تا آنتالپی ذوب (مقدار گرمای مورد نیاز برای ذوب کامل) هر نمونه تعیین گردد [۱۵].

۲-۴- اندازه‌گیری تغییرات طول (ΔL)

نسبی فضای بالای نمونه^۹ در حالت تعادل عمل نموده و شاخصی از میزان آب در دسترس را ارائه می‌دهد [۱۶].

۲-۸- اندازه‌گیری ویسکوزیته پلاستیک

برای تعیین ویسکوزیته پلاستیک فرآورده‌های کاکائویی، از آزمون رئولوژیکی پایا با استفاده از دستگاه رئومتر (Physica MCR301، اتریش) مجهز به سل اندازه‌گیری جریان استفاده گردید. آزمون در دمای ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و در محدوده‌ی نرخ برشی ۰ تا ۱۰۰ (۱ بر ثانیه) انجام شد. داده‌های حاصل از منحنی جریان (تنش برشی بر حسب نرخ برش) با مدل رئولوژیکی کاسون (رابطه‌ی ۲) برازش داده شدند تا ویسکوزیته‌ی پلاستیک به‌دست آید.

$$\sqrt{\sigma} = \sqrt{\sigma_0} + \sqrt{\mu\dot{\gamma}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در رابطه ۲، σ ، σ_0 ، μ و $\dot{\gamma}$ به‌ترتیب عبارتند از تنش برشی (پاسکال)، حد تنش جاری (پاسکال)، ویسکوزیته پلاستیک (پاسکال ثانیه) و نرخ برش (۱ بر ثانیه) [۲۰].

۲-۹- تعیین پذیرش کلی

به‌منظور بررسی کیفیت حسی فرآورده‌های کاکائویی حاوی سطوح مختلف امولسیون، آزمون پذیرش مصرف‌کننده با استفاده از ۵۱ ارزیاب نیمه‌آموزش‌دیده که با تکنیک‌های ارزیابی حسی آشنایی داشتند، انجام گردید. نمونه‌ها در اختیار ارزیاب‌ها قرار داده شدند. ویژگی‌های حسی مورد ارزیابی شامل شکل و فرم، ویژگی‌های سطح رویی، ویژگی‌های سطح زیرین، تخلخل، سفتی و نرمی بافت، جویدنی بودن و همچنین طعم و مزه بودند که به‌ترتیب دارای ضرایب وزنی ۴، ۲، ۱، ۲، ۲، ۳ و ۳ بودند. مقیاس امتیازدهی برای این ویژگی‌ها از ۱ (بسیار ضعیف) تا ۵ (بسیار خوب) در نظر گرفته شد. پذیرش کلی (Q) برای هر نمونه بر اساس رابطه‌ی ۳ محاسبه گردید [۲۰، ۲۱].

عمق نفوذ ۷ میلی‌متر و فاصله‌ی بین دو دوره‌ی فشرده‌سازی ۵ ثانیه تنظیم گردید. نمونه‌ها به‌صورت جداگانه روی صفحه‌ی دستگاه قرار داده شدند و پروب به‌صورت عمودی بر روی نمونه فرود آمد و دو دوره‌ی فشرده‌سازی را اعمال کرد. از منحنی نیرو-زمان حاصل، سفتی بافت که حداکثر نیروی مورد نیاز برای فشرده‌سازی نمونه در اولین دوره (نیروی پیک اول) که بیانگر مقاومت نمونه در برابر تغییر شکل است، محاسبه گردید [۱۷].

۲-۶- اندازه‌گیری شاخص کروما

برای بررسی شدت و خلوص رنگ فرآورده‌های کاکائویی حاوی سطوح مختلف امولسیون، ابتدا پارامترهای رنگی با استفاده از دستگاه رنگ‌سنج (هانتربل، CR-300، ژاپن) اندازه‌گیری گردیدند. سپس شاخص کروما (Chroma) که نشان‌دهنده‌ی اشباع و غلظت رنگ است، از طریق رابطه‌ی ۱، محاسبه گردید.

$$Chroma = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در رابطه ۱، شاخص a^* نشان‌دهنده میزان سبزی یا قرمزی نمونه که محدوده‌ی آن از ۱۲۰- (سبز خالص) تا ۱۲۰+ (قرمز خالص) می‌باشد و شاخص b^* نشان می‌دهد که رنگ نمونه تا چه اندازه به آبی یا زرد نزدیک است و محدوده‌ی آن از ۱۲۰- (آبی خالص) تا ۱۲۰+ (زرد خالص) متغیر است [۱۸، ۱۹].

۲-۷- تعیین فعالیت آبی (a_w)

به منظور ارزیابی میزان آب آزاد موجود در فرآورده‌های کاکائویی حاوی سطوح مختلف امولسیون، فعالیت آبی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری فعالیت آبی (Novasina، سوئیس) در دمای ۲۷ درجه‌ی سانتی‌گراد اندازه‌گیری گردید. این دستگاه بر اساس تعیین میزان رطوبت

$$Q = \frac{\sum(P \times G)}{\sum P} \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه ۳، Q = پذیرش کلی (شاخص کیفیت نمونه‌های تولیدی)، P = ضریب وزنی ویژگی، و G = ضریب ارزیابی ویژگی می‌باشد.

۲-۱۰- مدل سازی با استفاده از منطق فازی

برای شبیه‌سازی، درونیابی و افزایش داده‌های حاصل از آزمون‌های کیفی فرآورده‌های کاکائویی حاوی سطوح مختلف امولسیون (۰، ۲ و ۴ درصد) از ابزار منطق فازی در نرم‌افزار متلب استفاده گردید. با استفاده از روش مدل‌سازی ممدانی برای ورودی و خروجی‌های تحت قاعده «اگر-آنگاه» فازی، نسبت‌های سطوح مختلف امولسیون در فواصل زمانی معین بر اساس انتخاب غلظت امولسیون در ۳ سطح کم برای نمونه حاوی صفر درصد امولسیون (L)، متوسط برای نمونه

دارای ۲ درصد امولسیون (M) و زیاد برای نمونه حاوی ۴ درصد امولسیون (H) در ابزار منطق فازی نرم افزار متلب شبیه‌سازی شدند. هفت متغیر خروجی شامل آنتالپی ذوب، تغییرات طول، سفتی، کروما، فعالیت آبی، ویسکوزیته پلاستیک و پذیرش کلی نیز به‌همین ترتیب در ۳ سطح تعیین و تعریف گردیدند. از توابع عضویت مثلثی برای تنظیم تغییرات متغیرهای ورودی بهره گرفته شد. یک تابع عضویت مثلثی با سه پارامتر a ، b و c به‌صورت رابطه ۴، تعریف می‌شود. شکل (۱) مدل ممدانی طراحی شده برای این مطالعه را نشان می‌دهد [۲۲].

رابطه ۴)

$$\text{triangle}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & c \leq x \end{cases}$$

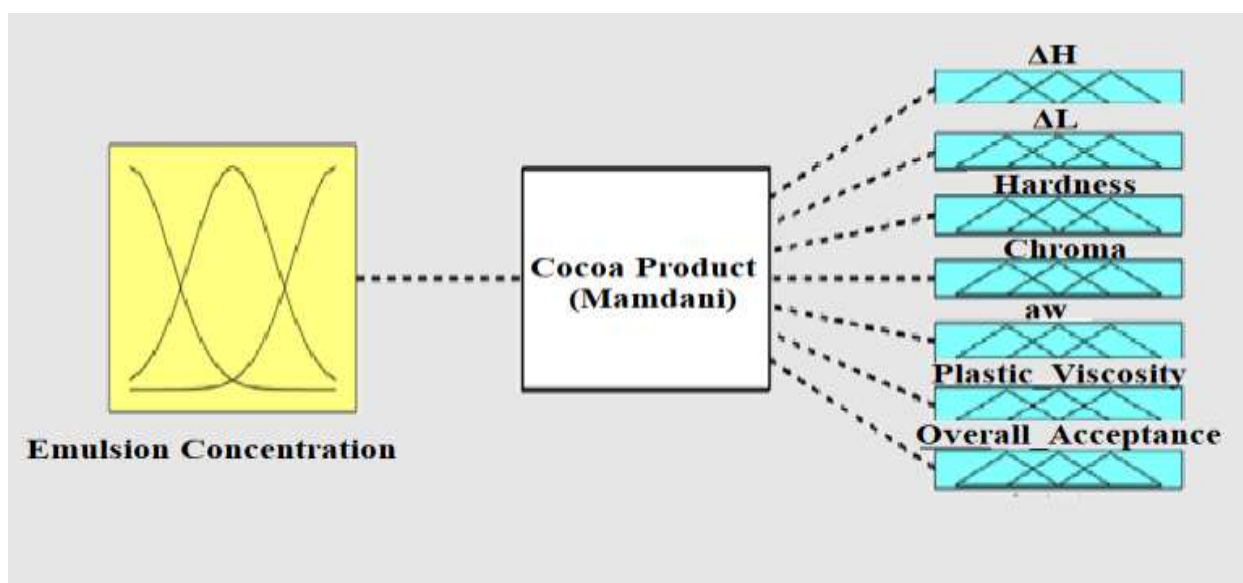


Figure1- The suggested topology of the designed fuzzy logic system in this investigation

سامانه‌ای بهینه برای دستیابی به کمترین خطا و بیشترین همبستگی می‌باشد. مقادیر پارامترهای استفاده شده برای توابع عضویت متغیر ورودی در جدول ۲، آورده شده است. همچنین نمودار توابع عضویت ورودی و خروجی (برای تغییرات طول) مدل نیز در شکل ۲، ارائه شده است.

با استفاده از این دسته‌بندی زبانی، ۳ قانون اگر-آنگاه فازی تعریف شد که در روابط ۵ تا ۷ آورده شده است. با توجه به این‌که از تابع عضویت مثلثی برای مدل‌سازی و تنظیم این سامانه استفاده شده است، نیاز به تعیین سه پارامتر a ، b و c برای متغیرهای ورودی و خروجی می‌باشد (طبق رابطه ۴). تعیین این مقادیر یکی از مهمترین مراحل در رسیدن به

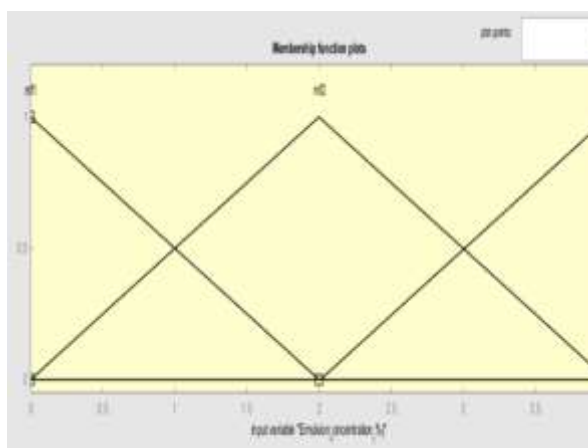
5- If (Emulsion Concentration is L) then (ΔH is H) (ΔL is L) (Hardness is H) (Chroma is H) (a_w is L) (Plastic viscosity is L) (Overall acceptance is H)

6- If (Emulsion Concentration is M) then (ΔH is M) (ΔL is H) (Hardness is L) (Chroma is M) (a_w is M) (Plastic viscosity is M) (Overall acceptance is M)

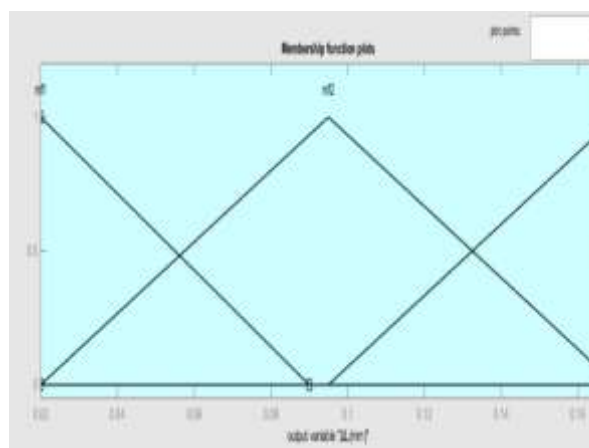
7- If (Emulsion Concentration is H) then (ΔH is L) (ΔL is M) (Hardness is M) (Chroma is M) (a_w is H) (Plastic viscosity is H) (Overall acceptance is L)

Table 2- Triangular membership function parameters for emulsion concentration

The title of membership functions	Parameters of membership functions		
	A	b	c
The first membership function	0	0	2
Second membership function	0	2	4
Third membership function	0	4	4



a)



b)

Figure 2- Membership functions: a) input (emulsion concentration) and b) output variable (ΔL)

افزایش تحرک مولکولی و تسهیل بازآرایی ساختاری تری گلیسریدها می شود. این پدیده منجر به تکاملی با سرعت بیشتر به سمت فرم های پایدارتر بلوری شده و در نتیجه، انرژی مورد نیاز برای ذوب شبکه بلوری کاهش می یابد [۲۴]. مطالعه Prosapio و Norton (۲۰۱۹) نشان داد که در امولسیون های آب در کره کاکائو، دمای فرآوری نقشی کلیدی در تعیین فرم چند ریختی چربی دارد. به طوری که دمای بالای ۵۰ درجه سانتی گراد منجر به تشکیل فرم های ناپایدار با دمای ذوب پایین تر می شود، در حالی که دمای زیر ۳۵ درجه سانتی گراد تشکیل فرم پایدار را ترویج می کند. در مطالعه حاضر، کاهش آنتالپی ذوب با افزایش غلظت امولسیون آب در روغن را می توان به وجود قطرات آب به عنوان نقص در شبکه بلوری و ایجاد یک لایه مایع از امولسیفایر در سطح مشترک آب و روغن نسبت داد که باعث

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر غلظت امولسیون بر ویژگی های مورد

فرآورده کاکائویی

کالری سنجی یک روش اولیه برای اندازه گیری ویژگی های حرارتی مواد به منظور برقراری ارتباط بین دما و خصوصیات فیزیکی مواد بوده و تنها روش برای تعیین مستقیم آنتالپی مرتبط با فرآیند مورد نظر می باشد [۲۳]. یافته ها نشان داد که با افزایش غلظت امولسیون، مقدار آنتالپی نمونه ها کاهش یافت (شکل ۳a). علت کاهش آنتالپی با افزایش غلظت امولسیون آب در روغن را می توان به افزایش تعداد قطرات آب به عنوان نقص در شبکه بلوری و ایجاد یک لایه مایع از امولسیفایر در سطح مشترک آب و روغن نسبت داد که باعث

ممکن است به تشکیل فرم‌های بلوری با انرژی کمتر منجر شده باشد، نسبت داد [۸].

همانطور که در شکل ۳b آورده شده است با افزایش غلظت امولسیون در فرمولاسیون فراورده نهایی در ابتدا تغییرات طول افزایش و سپس کاهش یافت. در غلظت‌های پایین امولسیون، قطرات آب یا چربی امولسیون شده احتمالا به‌عنوان ناخالصی در شبکه بلوری کره کائو عمل می‌کنند. این قطرات، ساختار یکپارچه بلورها را دچار اختلال کرده و از تشکیل شبکه پیوسته و محکم جلوگیری می‌کنند. در نتیجه، محصول نرم‌تر شده و در برابر تنش‌های مکانیکی یا حرارتی، تغییرات طول (تغییر شکل) بیشتری از خود نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، امولسیون در این غلظت‌ها مانند یک ماده مزاحم در شبکه بلوری عمل کرده و استحکام را کاهش می‌دهد. اما در غلظت‌های بالا، تراکم قطرات امولسیون منجر به تشکیل شبکه فیزیکی مکمل و افزایش ویسکوزیته کلی سامانه شده که در نتیجه، مقاومت در برابر تغییر شکل افزایش یافته و تغییرات طول کاهش می‌یابد [۱۶]. Wan Aidah و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که افزودن امولسیون کره کائو به شکلات، اگرچه منجر به حفظ شکل نمونه‌ها تا دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود، اما این پایداری حرارتی با بافتی نرم‌تر همراه است که نشان‌دهنده کاهش استحکام ساختاری در این دما می‌باشد [۲۵]. Norton و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که افزایش غلظت امولسیون تا ۶۰ درصد، تغییر قابل توجهی در ویژگی‌های فراورده کاکائویی ایجاد نمی‌کند. این اختلاف در یافته‌ها احتمالا به تفاوت در نوع فرمولاسیون (مانند ترکیب چربی‌ها، نوع امولسیفایرها و نسبت فازهای آبی و روغنی) مربوط می‌شود [۲۶].

بافت یک محصول غذایی خاص اهمیت زیادی در درک حسی از کیفیت کلی آن دارد. در مورد شکلات، سفتی نه تنها برای ارزیابی بصری (مانند ظاهر سطح)، بلکه برای درک حسی از ذوب‌شدن شکلات در دهان نیز نقش مهمی ایفا می‌کند. این ویژگی تحت تأثیر عوامل متعددی قرار می‌گیرد که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به ترکیب شکلات (به‌ویژه

محتوای چربی)، اندازه و توزیع ذرات جامد و همچنین دمای نگهداری اشاره کرد [۲۷]. شکل ۳c مشخص نمود که با افزایش غلظت امولسیون در فرمولاسیون فراورده کاکائویی در ابتدا میزان سفتی کاهش و سپس افزایش یافت. این الگو دقیقاً معکوس تغییرات طول می‌باشد. کاهش اولیه سفتی در غلظت‌های پایین امولسیون ناشی از اختلال در شبکه بلوری توسط قطرات پراکنده است، در حالی که افزایش مجدد سفتی در غلظت‌های بالا به تشکیل شبکه فیزیکی مکمل و افزایش ویسکوزیته کلی سامانه نسبت داده می‌شود. این رفتار غیرخطی با یافته‌های You و همکاران (۲۰۲۳) که کاهش سفتی را در شکلات‌های با چربی کاهش‌یافته حاوی امولسیون‌های آب‌در روغن در نسبت‌های بالای آب به روغن گزارش کردند، تا حدی همخوانی دارد با این حال، افزایش مجدد سفتی در غلظت‌های بالای امولسیون در مطالعه آنها مشاهده نشد [۷]. در مطالعه‌ای دیگر، Prosapio و Norton (۲۰۱۹) دریافتند که افزایش محتوای قند در فاز آبی منجر به افزایش سفتی شکلات با چربی کاهش‌یافته حاوی امولسیون می‌شود، اما آنها تأثیر مستقیم محتوای امولسیون بر ویژگی‌های بافتی را بررسی نکردند. این تناقضات نشان می‌دهد که رفتار سفتی تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله نوع فرمولاسیون، نسبت آب به روغن و ساختار امولسیون قرار دارد [۸].

کروما به‌عنوان یک شاخص عددی عینی برای سنجش شدت و خلوص رنگ قهوه‌ای شکلات، به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا فرایند شکوفه چربی را به‌صورت کمی و غیروابسته به قضاوت انسانی پایش کنند و آن را با سایر ویژگی‌های کیفی مرتبط سازند [۲۸]. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت امولسیون در فرمولاسیون فرآورده‌های کاکائویی شاخص کروما کاهش یافت (شکل ۳d). با افزایش غلظت امولسیون آب در روغن، تعداد قطرات آب پراکنده در ماتریس چربی افزایش یافته و این قطرات به عنوان مراکز پراکندگی نور عمل می‌کنند. بر اساس نظریه McClements (۲۰۰۲)، افزایش غلظت فاز پراکنده باعث افزایش ضریب پراکندگی نور

به حرارت تهیه شده با امولسیون قندهای الکلی، افزایش فعالیت آبی را در نمونه‌های حاوی مقادیر بالاتر امولسیون گزارش کردند که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد [۳۲].

ویسکوزیته پلاستیک مقدار انرژی مورد نیاز برای ادامه حرکت یک مایع غیرنیوتنی مانند شکلات مذاب پس از شروع حرکت است و نشان‌دهنده اصطکاک بین لایه‌های مختلف سیال در حین جریان می‌باشد. ویسکوزیته نقش کلیدی در فرآیندپذیری شکلات دارد و بر قالب‌گیری، پوشش‌دهی و احساس دهان مصرف‌کننده تأثیر مستقیم می‌گذارد. عواملی مانند توزیع اندازه ذرات، میزان چربی، رطوبت و نوع امولسیفایرهای مصرفی بر ویسکوزیته پلاستیک تأثیرگذار هستند [۳۳]. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت امولسیون در فرمولاسیون فرآورده‌های کاکائویی ویسکوزیته پلاستیک نمونه‌ها افزایش یافت (شکل ۳f). افزایش ویسکوزیته را می‌توان به افزایش نسبت آب به روغن و حضور مواد هیدروکلوئیدی در فاز آبی نسبت داد که با ایجاد ساختار مقاوم در برابر جریان، ویسکوزیته ظاهری نمونه‌ها را افزایش می‌دهند [۳۴]. نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های You و همکاران (۲۰۲۳) همسو است. این محققین نشان دادند که جایگزینی کره کاکائو با امولسیون‌های آب در روغن منجر به افزایش ویسکوزیته نمونه‌های شکلات می‌شود. به‌طوری‌که با افزایش سطح جانشینی امولسیون از ۲۵ درصد به ۷۵ درصد و همچنین افزایش نسبت آب به روغن ویسکوزیته نمونه‌ها به تدریج افزایش یافت. آنان این پدیده را به افزودن فاز آب به سیستم شکلات و حضور مواد هیدروکلوئیدی (صمغ عربی و شربت فروکتوز) در فاز آبی نسبت دادند که باعث افزایش مقاومت در برابر جریان می‌شوند [۷].

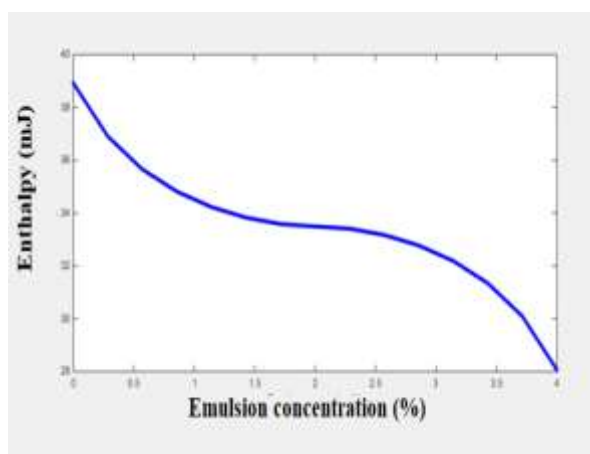
شکل ۳g نشان داد که با افزایش غلظت امولسیون آب در روغن در فرمولاسیون فرآورده‌های کاکائویی میزان امتیازات کسب شده برای پذیرش کلی از دید ارزیابان کاهش یافت. این کاهش را می‌توان به کاهش کروما و افزایش ویسکوزیته

می‌شود که به نوبه خود منجر به کاهش خلوص رنگ (شاخص کروما) می‌گردد. بنابراین، افزایش امولسیون آب در روغن با غلبه پراکندگی نور بر جذب انتخابی توسط رنگدانه‌های کاکائو، رنگ محصول را کمرنگ‌تر و مات‌تر نشان می‌دهد که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد [۲۹]. Chanamai و McClements (۲۰۰۱) نیز گزارش کردند که افزایش تعداد قطرات باعث کاهش عبور نور از امولسیون شده و رنگ نمونه کمتر اشباع و کدرتر به نظر می‌رسد. بنابراین، ویژگی‌های رنگی امولسیون به شدت تحت تأثیر غلظت و اندازه قطرات فاز پراکنده قرار دارد [۳۰]. کاهش کروما در غلظت‌های بالای امولسیون احتمالاً می‌تواند هشدار برای آغاز فرایند شکوفه چربی و افت کیفیت ظاهری محصول باشد [۱۶، ۳۱].

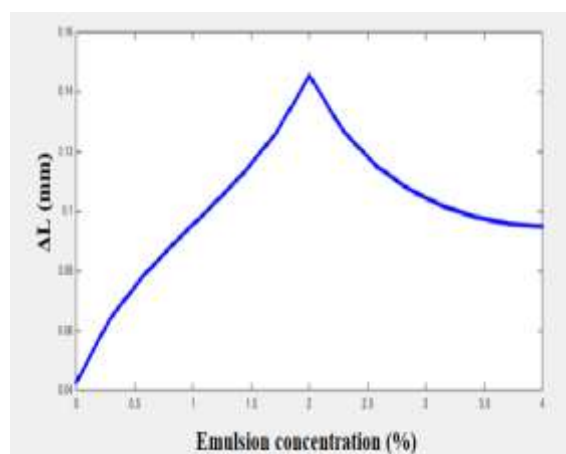
شکل ۳e نشان داد که با افزایش غلظت امولسیون آب در روغن در فرمولاسیون فرآورده‌های کاکائویی میزان فعالیت آبی نمونه‌ها افزایش یافت. این پدیده را می‌توان به افزایش محتوای آب ورودی به سیستم نسبت داد. با افزایش غلظت امولسیون، آب بیشتری به شکل قطرات ریز در ماتریس چربی وارد می‌شود. اگرچه امولسیفایرهایی مانند لستین و PGPR می‌توانند تا حدی آب را جذب کنند، اما ظرفیت آنها محدود است و با افزایش بیش از حد غلظت امولسیون، آب اضافی به صورت آب آزاد در سیستم باقی می‌ماند. یافته‌های این پژوهش با نتایج Prospatio و Norton (۲۰۱۹) همسو است. به‌طوری‌که آنان نیز افزایش فعالیت آبی را در شکلات‌های حاوی امولسیون نسبت به نمونه شاهد گزارش کردند [۸]. با این حال، در مطالعه Asghar و همکاران (۲۰۱۷) روند متفاوتی مشاهده شد. به‌گونه‌ای که بیشترین فعالیت آبی در نمونه شاهد و کمترین مقدار آن در نمونه حاوی بالاترین غلظت امولسیون مبتنی بر CBS گزارش گردید. این پژوهشگران کاهش فعالیت آبی را به محدود شدن آب آزاد در ساختار امولسیون و نقش امولسیفایر PGPR در به‌دام‌اندازی مولکول‌های آب نسبت دادند [۱۶]. Esmali و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی شکلات‌های مقاوم

قرار دهد [۱۶]. از سوی دیگر، Biswas و همکاران (۲۰۱۷) مقبولیت حسی پایین‌تر، به‌ویژه از نظر طعم، را در شکلات‌های تلخ تهیه‌شده با CBS در مقایسه با شکلات‌های تهیه‌شده با کره کاکائوی خالص گزارش کردند. این یافته‌ها با نتایج مطالعه حاضر مطابقت داشته و نشان می‌دهد که افزایش میزان امولسیون، اگرچه می‌تواند در بهبود برخی ویژگی‌های عملکردی محصول مؤثر باشد، اما در سطوح بالاتر ممکن است منجر به کاهش کیفیت حسی و پذیرش مصرف‌کننده گردد [۱۷].

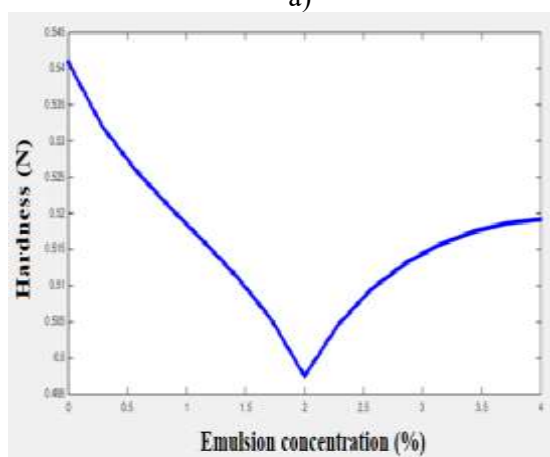
نمونه‌ها نسبت داد. نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های Wan Aidah و همکاران (۲۰۱۴) همخوانی دارد. این پژوهشگران با استفاده از امولسیون آب در کره کاکائو برای تولید شکلات شیری مقاوم به حرارت، گزارش کردند که جایگزینی بخشی از کره کاکائو با امولسیون موجب کاهش براقیت سطحی شکلات شده و با افزایش غلظت امولسیون، پذیرش کلی نمونه‌ها نیز کاهش می‌یابد [۲۵]. همچنین Asghar و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی فرآورده‌های کاکائویی تلخ تهیه‌شده با امولسیون CBS، کاهش براقیت را در اثر افزایش غلظت امولسیون گزارش کردند. آنان این پدیده را به افزایش میزان آب در فرمولاسیون و در نتیجه تشدید کریستالیزاسیون قند نسبت دادند که می‌تواند ظاهر محصول را تحت تأثیر



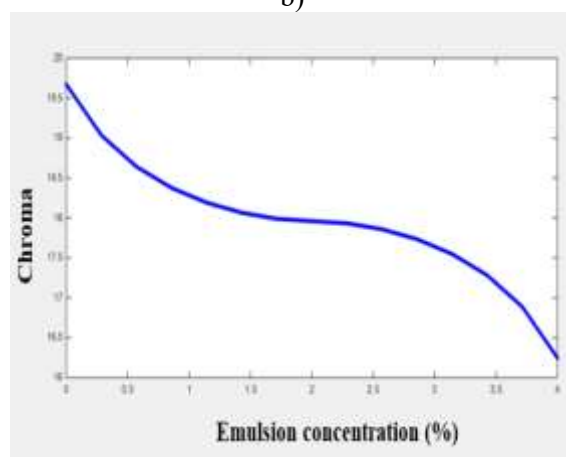
a)



b)



c)



d)

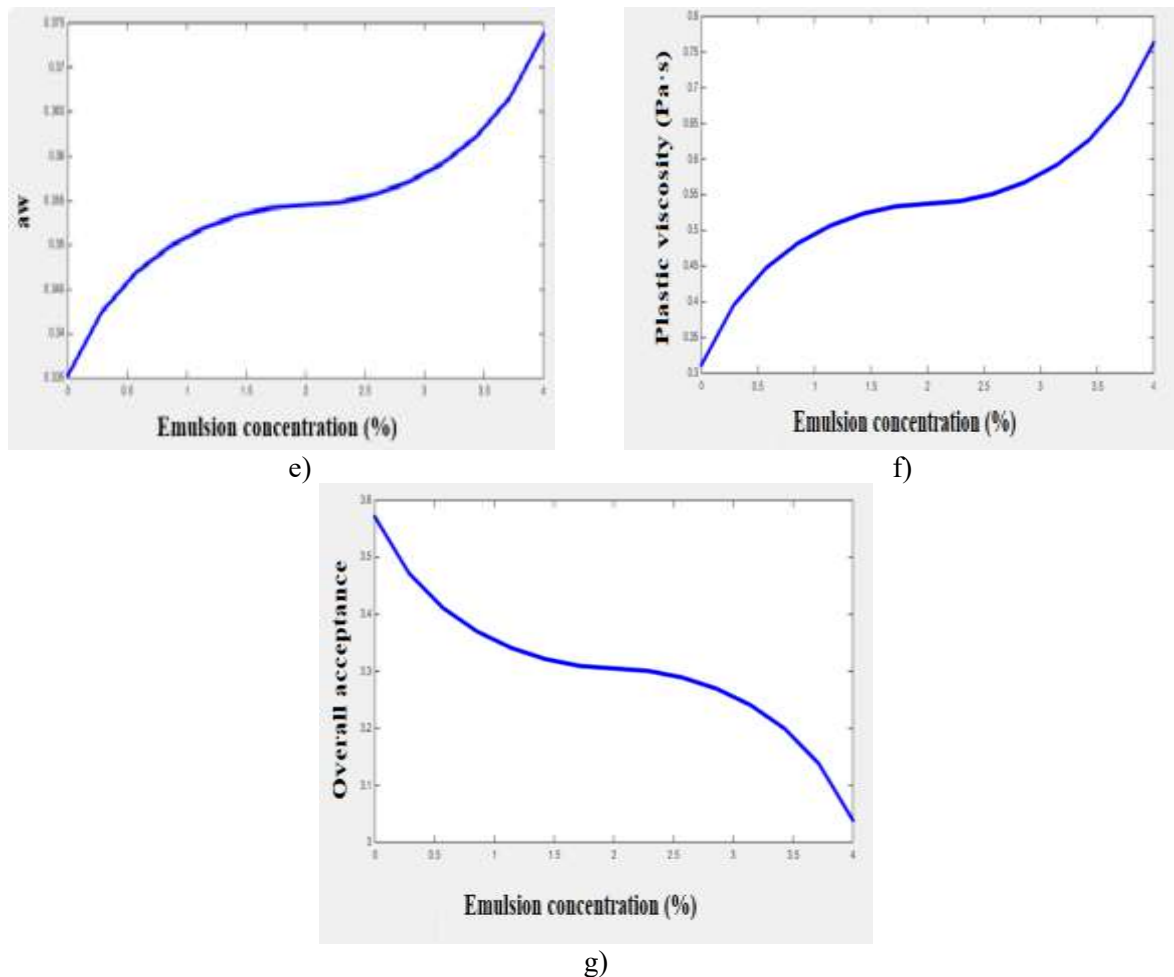


Figure 3 - Effect of emulsion concentration on a) enthalpy, b) ΔL , c) hardness, d) chroma, e) water activity, f) plastic viscosity, and g) overall acceptance

۲-۳- ارزیابی میزان دقت مدل فازی

به یک قاعده در سیستم فازی است. ردیف چهارم، ستون‌های دوم تا هشتم، مربوط به تجمیع تصمیم‌های وزن‌دار شده خروجی‌های سیستم می‌باشد که مقدار نهایی وزن‌دار شده هر متغیر را نشان می‌دهد. در این سامانه جامع، با وارد کردن غلظت‌های مختلف امولسیون، می‌توان بلافاصله تمام مقادیر خروجی را به‌دست آورد.

شکل ۴، خروجی سیستم فازی را برای غلظت ۱ درصد امولسیون آب در روغن در فرمولاسیون فرآورده کاکائویی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هر ستون از ستون‌های دوم تا هشتم مربوط به یک متغیر خروجی می‌باشد که عبارتند از: آنتالپی، تغییرات طول، سفتی، کروما، فعالیت آبی، ویسکوزیته پلاستیک و پذیرش کلی. هر سطر نیز مربوط

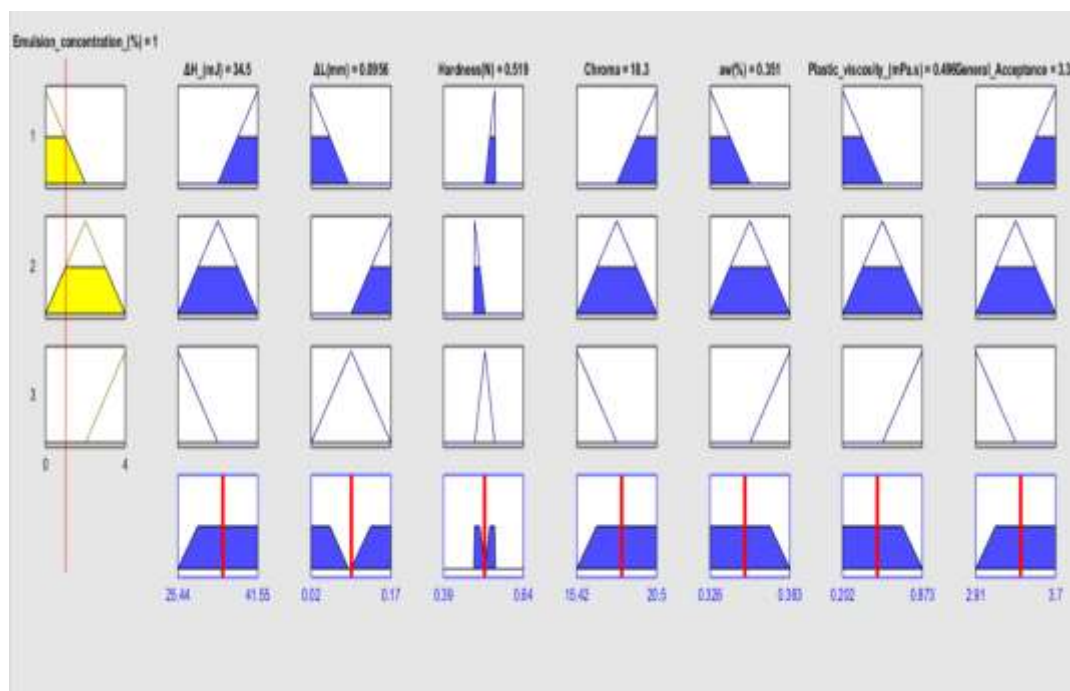
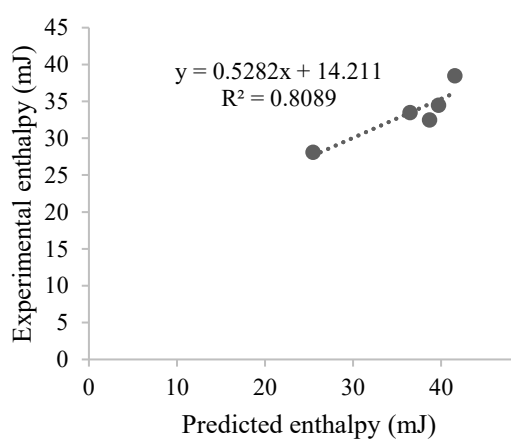


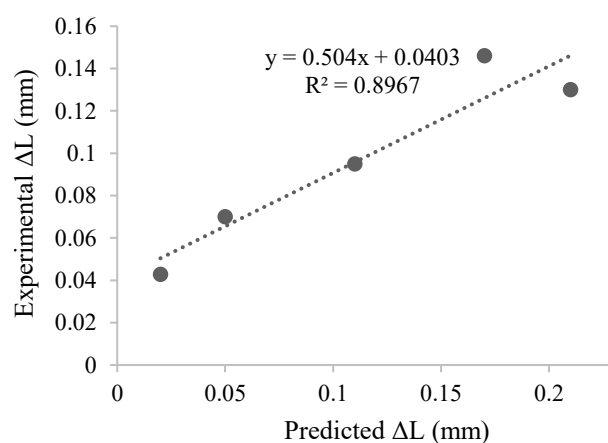
Figure 4- The output of the proposed fuzzy logic system

سیستم دانست. از طرفی مشخص گردید که مدل‌های طراحی شده بیشترین و کمترین دقت را به ترتیب برای پیش‌بینی داده‌های حاصل از فعالیت آبی ($R^2=0.915$) و سفتی ($R^2=0.753$) داشتند.

همچنین شکل ۵ که میزان بالای ضرایب همبستگی (بیش از ۰/۷۵۳) مقادیر پیش‌بینی شده توسط سامانه منطق فازی در مقابل داده‌های آزمایشگاهی را برای متغیرهای خروجی هفت‌گانه نشان می‌دهد را می‌توان دلیلی بر دقت بالای این



a)



b)

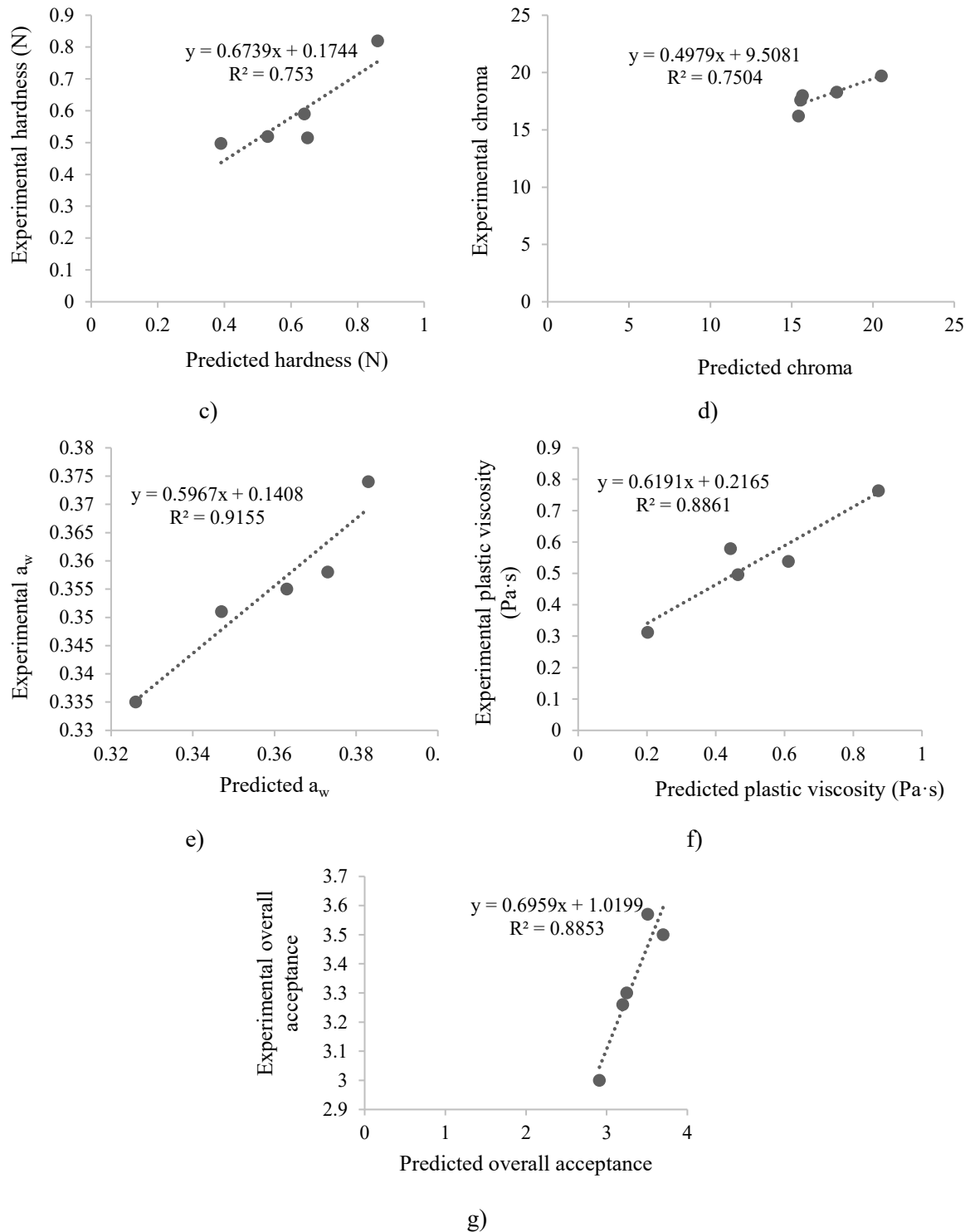


Figure 5 - Comparison of experimental and predicted values by fuzzy logic model for a) enthalpy, b) ΔL , c) hardness, d) chroma, e) water activity, f) plastic viscosity, and g) overall acceptance

نتایج آنان نشان داد که روش فازی نسبت به روش کلاسیک از حساسیت بیشتری در شناسایی تغییرات فرآیند برخوردار بوده و انحرافات کیفی را با دقت بالاتری تشخیص می‌دهد [۱۳]. در پژوهش دیگری از منطق فازی برای طبقه‌بندی

Azarmizad و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای با استفاده از روش کنترل فرآیند آماری فازی در شرکت داداش برادر صنعت، هفت نوع عیب شکلات (شامل رنگ، طعم، اسیدیته، شکوفه قند، عوامل بافتی و مواد خارجی) را بررسی کردند.

فازی-عصبی تطبیقی و شبکه‌های عصبی عمیق مورد بررسی قرار گیرد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی که از یافته‌های این مطالعه پشتیبانی می‌کنند، بنا به درخواست، از طریق نویسنده مسئول در دسترس خواهند بود.

تضاد منافع

نویسندگان اظهار می‌دارند که هیچ تعارض منافعی در ارتباط با این پژوهش وجود ندارد.

بیانیه تامین مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی از هیچ سازمان، نهاد یا مؤسسه‌ای دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

آذر حقیقت آسیاب: اجرای آزمایشات، جمع‌آوری داده‌ها و نوشتن پیش نویس مقاله، بابک قنبرزاده و لیلا روفه‌گری نژاد: طراحی و سرپرستی (راهنمایی) پروژه و ویرایش نسخه نهایی مقاله و مهدی قره‌خانی: اعتبارسنجی و بازبینی مقاله.

بیانیه هوش مصنوعی

نویسندگان اعلام می‌کنند که در نگارش، تحلیل، تفسیر داده‌ها یا تهیه این مقاله از هیچ ابزار هوش مصنوعی مولد استفاده نکرده‌اند.

۵-منابع

- [1] Balcázar-Zumaeta, C.R., et al., *Advances in cocoa butter and alternative fats: composition and crystallization dynamics in chocolate production*. European Food Research and Technology, 2026. **252**(3): p. 107.
- [2] Konar, N., et al., *Comprehensive life cycle assessment of cocoa and chocolate supply chains: Environmental sustainability*

میوه‌های کاکائو بر اساس ویژگی‌های فیزیکی مانند طول، عرض، وزن و تعداد دانه استفاده شد و دقت ۷۱/۷ درصدی این مدل‌ها، نشان‌دهنده کارایی این روش در افزایش عینیت و سرعت تصمیم‌گیری است. این پژوهش نشان داد که رویکرد فازی می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد در صنایع مرتبط با کاکائو، از مرحله باغ تا فرآوری، مورد استفاده قرار گیرد [۳۵].

۴- نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، تأثیر غلظت‌های مختلف امولسیون آب در روغن بر ویژگی‌های کیفی فرآورده‌های کاکائویی مورد بررسی قرار گرفت و سپس با استفاده از سیستم استنتاج فازی ممدانی، مدلی برای پیش‌بینی این ویژگی‌ها طراحی و ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که افزایش غلظت امولسیون منجر به کاهش آنتالپی ذوب، شاخص کروما و پذیرش کلی گردید ولی میزان فعالیت آبی و ویسکوزیته پلاستیک را افزایش داد. مدل منطق فازی طراحی شده با ضرایب همبستگی بین ۰/۷۵۳ تا ۰/۹۱۵، دقت بالایی در پیش‌بینی تمامی ویژگی‌های کیفی نشان داد. در مجموع، سیستم فازی توسعه‌یافته در این پژوهش، ابزاری کارآمد، سریع و قابل اطمینان برای پیش‌بینی ویژگی‌های کیفی فرآورده‌های کاکائویی حاوی امولسیون ارائه می‌دهد که می‌تواند به عنوان یک سامانه کمکی تصمیم‌گیری در کنترل کیفیت و بهینه‌سازی فرمولاسیون در صنعت شکلات مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، تأثیر نوع و غلظت امولسیفایرهای مختلف، نسبت‌های متفاوت آب به روغن و همچنین شرایط فرآوری بر ویژگی‌های کیفی و رفتار حرارتی فرآورده‌های کاکائویی با استفاده از رویکردهای هوشمند مانند سیستم‌های

perspectives. Trends in Food Science & Technology, 2026. **169**: p. 105543.

- [3] Soares, T.F. and M.B.P. Oliveira, *Cocoa by-products: characterization of bioactive compounds and beneficial health effects*. Molecules, 2022. **27**(5): p. 1625.
- [4] Asiedu, B.K., et al., *Effect of roasting and mechanical depulping on the techno-functional properties of Cocoa liquor*. Translational Food Sciences, 2026. **2**: p. vxag002.

- [5] Lander, T.A., et al., *Global chocolate supply is limited by low pollination and high temperatures*. Communications Earth & Environment, 2025. **6**(1): p. 97.
- [6] Yang, X., et al., *Walnut oil-based emulsion-templated Oleogels stabilized by whey protein concentrate and xanthan gum as cocoa butter substitutes: Enhancing thermal stability and bloom resistance in chocolate*. Food Chemistry, 2025: p. 146410.
- [7] You, S., Q. Huang, and X. Lu, *Development of fat-reduced 3D printed chocolate by substituting cocoa butter with water-in-oil emulsions*. Food Hydrocolloids, 2023. **135**: p. 108114.
- [8] Prosapio, V. and I. Norton, *Development of fat-reduced chocolate by using water-in-cocoa butter emulsions*. Journal of Food Engineering, 2019. **261**: p. 165-170.
- [9] Alvarado, M.C., P.D.C. Sanchez, and S.G.N. Polongasa, *Emerging rapid and non-destructive techniques for quality and safety evaluation of cacao: recent advances, challenges, and future trends*. Food Production, Processing and Nutrition, 2023. **5**(1): p. 40.
- [10] Farzaneh, V., et al., *Modelling of the selected physical properties of the Fava bean with various moisture contents Using Fuzzy logic design*. Journal of Food Process Engineering, 2017. **40**(2): p. e12366.
- [11] Fernando, W.M., et al., *A fuzzy logic-driven risk assessment framework for enhancing sustainable policy impact in smallholder Agri-food supply chains*. Cleaner Logistics and Supply Chain, 2026: p. 100350.
- [12] Kettle, T., et al., *Fuzzy logic in respiratory medicine: a systematic review of predictive and diagnostic applications*. International Journal of Medical Informatics, 2026. **212**: p. 106347.
- [13] Azarmizad, B., et al., *Designing an applied model of statistical process control (SPC) by fuzzy mode and middle fuzzy and comparing its results with classical method case study: Dadash Baradar Ind. Co*. Journal of Decisions and Operations Research, 2022. **7**(1): p. 111-128.
- [14] Zhang, Y., et al., *Modified SPI improves the emulsion properties and oxidative stability of fish oil microcapsules*. Food Hydrocolloids, 2015. **51**: p. 108-117.
- [15] Lapčiková, B., et al., *Dark chocolates: Effects of emulsifier types and concentrations on physico-mechanical properties*. LWT, 2026: p. 119206.
- [16] Asghar, A., et al., *Improving heat stability along with quality of compound dark chocolate by adding optimized cocoa butter substitute (hydrogenated palm kernel stearin) emulsion*. Lwt, 2017. **80**: p. 531-536.
- [17] Biswas, N., et al., *Physical, rheological and sensorial properties, and bloom formation of dark chocolate made with cocoa butter substitute (CBS)*. LWT-Food Science and Technology, 2017. **82**: p. 420-428.
- [18] Nazoori, F., E. ZamaniBahramabadi, and S.H. Mirdehghan, *Effect of sulfur pesticide on the quality of fresh pistachios in cold storage*. International Journal of Horticultural Science and Technology, 2022. **9**(4): p. 453-462.
- [19] Seyedahmadi, S., et al., *Enhancing the quality of rice-based gluten-free bread using sourdoughs fermented with Lactobacillus fermentum and Lactobacillus plantarum*. Scientific Reports, 2025. **15**(1): p. 26543.
- [20] Halim, H.S.a.A., et al., *Sensory preference and bloom stability of chocolate containing cocoa butter substitute from coconut oil*. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2019. **18**(4): p. 443-448.
- [21] Galavani, A., et al., *Evaluation of the quality characteristics of a non-dairy probiotic beverage containing sprouted wheat, sprouted oats, and almonds during storage*. Food and Humanity, 2026. **7**: p. 101280.
- [22] Ebrahimi, M., et al., *Development of an expert system to determine the measured characteristics of grape fruit stored in cold storage using fuzzy logic*. Journal of food science and technology (Iran), 2024. **21**(147): p. 70-83.
- [23] Gill, P., T.T. Moghadam, and B. Ranjbar, *Differential scanning calorimetry techniques: applications in biology and nanoscience*. Journal of biomolecular techniques: JBT, 2010. **21**(4): p. 167.
- [24] Di Bari, V., et al., *Crystallisation in water-in-cocoa butter emulsions: Role of the dispersed phase on fat crystallisation and polymorphic transition*. Food structure, 2017. **12**: p. 82-93.
- [25] Wan Aidah, W., et al., *Development and characterisation of thermo-resistant milk chocolate containing cocoa butter emulsion*. 2014.
- [26] Norton, J., et al., *Development and characterisation of tempered cocoa butter emulsions containing up to 60% water*. Journal of Food engineering, 2009. **95**(1): p. 172-178.
- [27] Žuljević, S.O., L. Muhović, and A. Oras. *The Effect of Storage Temperature on Chocolate Texture*. in *Proceedings*. 2024. MDPI.
- [28] Briones, V. and J.M. Aguilera, *Image analysis of changes in surface color of chocolate*. Food research international, 2005. **38**(1): p. 87-94.
- [29] McClements, D.J., *Theoretical prediction of emulsion color*. Advances in colloid and interface science, 2002. **97**(1-3): p. 63-89.
- [30] Chanamai, R. and D. McClements, *Prediction of emulsion color from droplet characteristics*:

- dilute monodisperse oil-in-water emulsions*. Food Hydrocolloids, 2001. **15**(1): p. 83-91.
- [31] Mexis, S., et al., *Effect of active and modified atmosphere packaging on quality retention of dark chocolate with hazelnuts*. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010. **11**(1): p. 177-186.
- [32] Esmali, A., N. Asefi, and S. Yeganehzad, *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, 2019. **8**(2): p. 165-176.
- [33] Afoakwa, E.O., A. Paterson, and M. Fowler, *Factors influencing rheological and textural qualities in chocolate—a review*. Trends in Food Science & Technology, 2007. **18**(6): p. 290-298.
- [34] Skelhon, T.S., et al., *High internal phase agar hydrogel dispersions in cocoa butter and chocolate as a route towards reducing fat content*. Food & Function, 2013. **4**(9): p. 1314-1321.
- [35] Hakim, M., H. Ma'we, and M.J. Hadi, *CLASSIFICATION OF SUPERIOR COCOA FRUITS USING FUZZY LOGIC METHOD BASED ON PHYSICAL PARAMETERS*. Bulletin of Network Engineer and Informatics, 2025. **3**(2): p. 70-85.



Scientific Research

Development of a Fuzzy Intelligent System for Determining the Quality Characteristics of Cocoa Products Containing Water-in-Oil Emulsion

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article History: Received: 2026/07/02 Review: 2026/07/27 Accepted: 2026/08/02 Keywords: Cocoa product, Water-in-oil emulsion, Quality control, Fuzzy logic DOI: 10.48311/fsct.2026.121738.83270 *Corresponding Author E-	Water-in-oil emulsions as a partial substitute for cocoa butter are considered a novel approach for producing reduced-calorie cocoa products, however, the evaluation of quality characteristics of these products using traditional methods is time-consuming and dependent on human judgment. Therefore, this study aimed to investigate the effect of different concentrations of water-in-oil emulsion (0, 2, and 4% w/w) on the quality characteristics of cocoa products including enthalpy, length changes, hardness, chroma index, water activity, plastic viscosity, and overall acceptance, as well as designing an intelligent model based on fuzzy logic to predict these characteristics. The results showed that increasing emulsion concentration decreased melting enthalpy, chroma index, and overall acceptance, while water activity and plastic viscosity increased, and the lowest hardness was observed in the sample containing 2% emulsion. The designed fuzzy model showed the highest accuracy in predicting water activity (with a correlation coefficient of 0.915) and the lowest accuracy in predicting hardness (with a correlation coefficient of 0.753), and for other characteristics, the correlation coefficients were within an acceptable range, indicating the appropriate efficiency of this system in predicting the quality characteristics of cocoa products. Finally, it can be stated that the fuzzy logic system developed in this study provides an efficient, rapid, and reliable tool for predicting the quality characteristics of cocoa products, which can be used as a decision support system in quality control and formulation optimization in the chocolate industry.