

مقاله پژوهشی

تأثیر صمغ‌ها بر رئولوژی دینامیک ماست فوری شتر: بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب

مرتضی کاشانی نژاد^۱، سید محمد علی رضوی^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری، علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
 ۲. استاد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: ۹۷/۲/۱۹، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۷/۴/۹، تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۱)

چکیده

در این مقاله، اثر صمغ‌های کربوکسی متیل سلولز، صمغ کنجاک و صمغ دانه مرو و مخلوط آن‌ها بر خصوصیات رئولوژیکی دینامیک ماست فوری شتر مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس این خصوصیات با استفاده از مدل‌های به‌دست آمده از طرح مخلوط با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب بهینه گردید. نتایج آزمون تنش متغیر برای نمونه‌های مختلف نشان داد که مدول الاستیک G' بیش‌تر از مدول ویسکوز G'' بود که مبین رفتار جامد گونه نمونه‌ها بود. نتایج اثر سینرژیستی این سه صمغ به‌ویژه اثر سینرژیستی صمغ دانه مرو و کربوکسی متیل سلولز بر روی کرنش بحرانی و تنش تسلیم تیمارهای فرمولاسیون ماست فوری شتر را نشان داد. صمغ دانه مرو نیز بیش‌ترین تأثیر را بر روی افزایش k' ، k'' و k^* داشت که البته ترکیب با کربوکسی متیل سلولز و صمغ کنجاک نیز می‌توانست این تأثیر را بهبود دهد. از طرفی کلیه اثرات خطی و متقابل صمغ‌های مختلف بر روی n' ، n'' و n^* معنی دار نبود که نشان‌دهنده تأثیر یکسان صمغ‌ها بر روی این پارامترها بود. نتایج بهینه درصد صمغ‌های مختلف برای دستیابی به حداکثر مدول الاستیک در ناحیه خطی G'_{LVE} ، کرنش بحرانی γ_c ، تنش تسلیم τ_y ، n' ، k' ، n'' ، n^* و k^* و حداقل مدول افت در ناحیه خطی G''_{LVE} استفاده از الگوریتم کرم شب تاب در فضای مولفه‌های اصلی نشان داد که مقادیر بهینه به‌دست آمده از صمغ‌های کنجاک و دانه مرو در مجاورت هم قرار گرفته و واریانس بیش‌تری از داده‌های مربوط به پارامترهای رئولوژیکی را به خود اختصاص داده‌اند که نشان‌دهنده تشابه اثر این دو صمغ و نقش موثرتر آن‌ها به‌ویژه صمغ دانه مرو به‌عنوان صمغ بومی ایران بر روی پارامترهای مزبور نسبت به کربوکسی متیل سلولز می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ماست فوری شتر، الگوریتم کرم شب تاب، صمغ دانه مرو، صمغ کنجاک، کربوکسی متیل سلولز، رئولوژی دینامیک.

* نویسنده مسئول: s.razavi@um.ac.ir

۱. مقدمه

تحقیقات گسترده بر روی خواص رئولوژیکی ماست معمولی و همزده با آزمون‌های دینامیکی، مطالعه‌ای بر روی خواص رئولوژیکی ماست فوری شتر همانند بررسی تاثیر سینرژیستی صمغ‌های مختلف در فرمولاسیون این محصول و ارزیابی پارامترهای رئولوژیکی آن وجود ندارد.

شیر شتر محصول مناسبی برای بیماران مبتلا به عدم تحمل لاکتوز می‌باشد [۱۹]. این محصول ضد حساسیت است که نسبت به شیر گاو، میش، بوفالو و انسان، نسبت بالاتری از ایمونوگلوبولین G را دارد ($1/64 \text{ mg.mL}^{-1}$). شیر شتر ضد دیابت، ضد ویروس و ضد میکروب، ضد سرطان و ضد فشار خون بالا است [۲۰]. این محصول کارایی سیستم ایمنی را بهبود می‌بخشد، سرعت متابولیسم و ساخت استخوان و ماهیچه را افزایش می‌دهد. همچنین، برای برخی بیماری‌های خاص مانند هیپاتیت B و اوتیسم و سل مفید است [۲۱]. از طرفی اگرچه تحقیقاتی بر روی تولید ماست شتر همراه با مکمل‌هایی مانند پودر شیر پس چرخ، پروبیوتیک‌ها [۲۲]، پایدارکننده‌ها، ادویه‌های مختلف و ماست-های طعم‌دار [۲۳] انجام گرفته، اما تحقیق منتشر شده‌ای در مورد ماست فوری شتر انجام نشده است.

اغلب مسائل بهینه‌سازی در مهندسی علاوه بر غیرخطی بودن دارای محدودیت‌های زیادی هستند. بنابراین برای یافتن راه‌حل‌های بهینه برای این گونه مسائل غیرخطی به الگوریتم‌های بهینه‌سازی موثر و کارا نیاز می‌باشد. بسیاری از الگوریتم‌های فرا ابتکاری مدرن بر مبنای هوش جمعی و الهام گرفتن از طبیعت گسترش یافته‌اند و امروزه این الگوریتم‌های فرا ابتکاری پیشرفته با توجه به قدرت و کارایی شان در کاربردهای مختلف توسعه یافته‌اند. الگوریتم کرم شب تاب نیز یکی از جدیدترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر هوش دسته جمعی است که اولین بار در سال ۲۰۰۸ توسط فردی به نام یانگ معرفی شد [۲۴]. به‌طور خلاصه نحوه عملکرد الگوریتم کرم شب تاب بدین صورت است که ابتدا تعدادی کرم شب تاب مصنوعی به‌طور تصادفی در دامنه مساله توزیع می‌شوند و سپس هر کرم شب تاب از خود نوری ساطع می‌کند که شدت آن متناسب با میزان بهینگی نقطه‌ای است که آن کرم شب تاب در آن واقع شده است. سپس شدت نور هر کرم شب تاب مرتباً با شدت نور سایر کرم‌های شب تاب مقایسه شده و کرم شب تاب کم نور تر به سوی کرم‌های شب تاب پر نور تر جذب می‌شود. در عین حال پرنورترین کرم

تولید ماست شتر با توجه به منابع محدود شیر شتر، در مناطق خاصی امکان پذیر و امکان توزیع آن در سایر مناطق دشوار است. ولی اصولاً می‌توان با خشک کردن و تهیه پودر، امکان ذخیره کردن ماست به شکل پایدار را بهبود بخشید و باعث تسهیل در قابلیت استفاده شد و هم‌چنین ماندگاری این محصول با ارزش را افزایش داد [۱]. مانند هر فراورده غذایی، خشک کردن ماست و تهیه پودر آن نیز علیرغم برخی معایب، مزایای بسیاری نظیر کاهش حجم و عدم نیاز به سرد نگه‌داشتن، هزینه‌های نگهداری کم‌تر، سهولت در حمل و نقل، مناسب بودن برای مناطق دارای آب و هوای گرم، کاربرد در شرایط بحران‌های غذایی و امکان افزایش سرانه مصرف محصولات لبنی با استفاده از به‌کارگیری پودر ماست در صنایع نانوائی، شکلات و نوشیدنی‌ها را دارا می‌باشد [۲]، اما با توجه به گزارش‌های موجود، ماست بازسازی شده به‌طور معمول فاقد بافت، قوام و ظاهر مناسب و مشابه ماست معمولی است [۳] که این امر یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در رابطه با تولید صنعتی پودر ماست می‌باشد.

بدیهی است که از دیدگاه روش تولید نیز بسیاری از افزودنی‌ها در محصولات پودری جهت تولید ماست استفاده می‌شود که پس از جذب مجدد آب ظاهر و طعم شبیه به ماست را ایجاد کند. نشاسته، مواد مولد طعم، نمک و هیدروکلوئیدهایی که به‌عنوان قوام دهنده، پایدار کننده، عامل ایجاد ژل، بهبود دهنده بافت و غیره اضافه می‌شود از این دسته از مواد افزودنی هستند [۳]. از طرفی خواص رئولوژیکی ماست عمدتاً بستگی به شرایط تخمیر، تنش‌های مکانیکی محصول و میزان و نوع افزودنی‌های ایجادکننده بافت مانند نوع و غلظت هیدروکلوئیدها و برهم‌کنش آن‌ها دارد [۴]. استفاده از ترکیبی از هیدروکلوئیدها به‌علت خواص سینرژیستی آن‌ها در صنایع غذایی نیز بسیار رایج است [۵]. زیرا استفاده ترکیبی از صمغ‌ها می‌تواند باعث بهبود کیفیت محصول شود و از طرفی با کم‌تر کردن غلظت یک صمغ در فرمولاسیون از نظر اقتصادی نیز به صرفه‌تر خواهد بود [۶]. چندین محقق تاثیر سینرژیستی صمغ‌های مختلف را در سیستم‌های غذایی مدل مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۳-۱۷]. از طرفی در پژوهش‌های مختلف به بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی ماست همزده [۱۶-۱۴] و تاثیر آغازگر [۱۴] و شیرهای مختلف [۱۷]، [۱۸] بر خواص ویسکوالاستیک ماست پرداخته شده که علیرغم

مرو از یک عطاری خریداری و استخراج و تهیه پودر صمغ آن طبق روش بستان و همکاران انجام شد [۳۰].

۲.۲. تهیه پودر ماست شتر

ماست تازه شتر به روش دیار تولید شد. شیر شتر ۳/۵٪ چربی، ۱۳/۶۳٪ ماده جامد بدون چربی در دمای ۸۲ °C به مدت ۳۰ min پاستوریزه و سپس تا دمای ۴۵ °C سرد شد. سپس ۰/۰۴٪ باکتری‌های آغازگر در نظر گرفته شده به فرمولاسیون تهیه شده اضافه و تا رسیدن به pH برابر با ۴/۲ در دمای ۴۲ °C گرمخانه گذاری شد. در نهایت نمونه‌ها سرد و در دمای ۴ °C نگهداری گردید.

پودر ماست شتر نیز توسط خشک‌کن پاششی Two-Flow nozzle, Counter-current, ساخت کشور ایران، از ماست تازه شتر تهیه گردید. ماست تازه توسط نازل به درون محفظه عمودی خشک‌کن با جریان هوای غیر همسو اسپری شد. محفظه خشک‌کن به صورت استوانه‌ای، با قسمت تحتانی مخروطی شکل با قطر ۱ m در بخش استوانه‌ای و ارتفاع کل محفظه ۱/۵ m بود. دمای هوای ورودی، دمای هوای خروجی و دمای خوراک ورودی به ترتیب برابر با ۱۷۰، ۷۰ و ۱۰ °C بود. دمای هوای خروجی نیز با کنترل کردن سرعت خوراک ورودی، ظرفیت حداکثر ۲ L/h با فشار ۱ bar کنترل گردید. پودر تولید شده نمونه‌های مختلف درون ظروف شیشه‌ای در دمای ۴ °C تا زمان انجام آزمایش‌ها نگهداری شدند.

۲.۳. آماده سازی ماست فوری شتر

۵۰g از پودر ماست شتر و ۰/۰۵g نمک با ۱٪ صمغ، تیمارهای طرح مخلوط شامل نسبت‌های مختلفی از کربوکسی متیل سلولز، صمغ کنجاک و صمغ دانه مرو مخلوط شد به طوری که تعداد کل نمونه‌های نهایی پروژه مطابق جدول (۱) برابر با ۱۴ شد. برای آب‌دهی مجدد نمونه‌های ماست فوری، ۵۰ ml آب مقطر تا دمای ۳۰ °C گرم و مخلوط پودری به آرامی جهت جلوگیری از کلوخه-ای شدن به آن اضافه گردید و تحت محیط بسته به منظور جلوگیری از تبخیر توسط همزن به طور مداوم در دمای ۳۰ °C و برای ۲ min هم زده و سپس نمونه به مدت ۱ h در یخچال نگهداری شد [۳۱].

شب تاب نیز با هدف افزایش شانس یافتن جواب بهینه سراسری به طور تصادفی در دامنه مسئله حرکت می‌کند. این الگوریتم که برای پیدا کردن نقطه بهینه عمومی در برخی کاربردها مورد از موند قرار گرفته از کارایی بالاتری برخوردار بوده است [۲۴]. یاماس طی تحقیقی پارامترهای بهینه فرایند خشک شدن اسمزی قارچ‌ها را با استفاده از این الگوریتم تعیین نمود [۲۵].

مرو یکی از دانه‌های بومی ایران است که صمغ حاصل از آن می‌تواند به عنوان یک هیدروکلئید غذایی جدید معرفی شود، زیرا دارای خصوصیات عملکردی فوق‌العاده‌ای هم‌چون پایدار کنندگی، قوام دهنده‌گی و عامل تشکیل دهنده ژل می‌باشد [۲۶]. هم‌چنین صمغ کنجاک، KG، پلی ساکاریدی خنثی است که از گیاهی پایا و چند ساله متعلق به خانواده *Araceae* و گونه *Amorphophalus Konjac* مشتق شده و در کشورهای شرقی کاملاً شناخته شده است [۲۷]. قابلیت نگهداری آب و کاهش کلسترول و گلوکز خون باعث مورد توجه قرار گرفتن این صمغ برای مصرف کننده شده است [۲۸]. بیوپلیمر مورد توجه دیگر کربوکسی متیل سلولز CMC، یک مشتق آنیونی از سلولز است. این صمغ به عنوان یک عامل قوام دهنده و پایدارکننده در محصولات غذایی به ویژه ماست استفاده می‌شود [۲۹]. با این وجود، مطالعه‌ای در مورد استفاده از طرح مخلوط برای شناسایی برهم‌کنش بین این صمغ‌ها و یا بهینه‌کردن مخلوط صمغ‌ها در فرمولاسیون ماست فوری شتر وجود ندارد. از این رو هدف این تحقیق، بررسی و بهینه‌سازی تاثیر کربوکسی متیل سلولز، صمغ کنجاک، صمغ دانه مرو SSG و برهم‌کنش آن‌ها بر روی ویژگی‌های رئولوژیکی دینامیک ماست فوری شتر با استفاده از طرح مخلوط و الگوریتم کرم شب تاب می‌باشد به طوری که از لحاظ اقتصادی تولید ماست فوری شتر با تعیین ترکیب بهینه صمغ‌ها نیز مقرون به صرفه باشد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. انتخاب مواد اولیه

شیر شتر مورد استفاده در این تحقیق از فروشگاه‌های محلی سطح مشهد تهیه شد. استارتر SACCO Y170 F freeze-dried yogurt culture، کربوکسی متیل سلولز و صمغ کنجاک از شرکت فود کم، شیراز، ایران تهیه شد. برای تهیه صمغ دانه مرو نیز دانه

جدول (۱) تیمارهای آزمایش بر اساس متغیرهای فرمول در طرح مخلوط مرکز ثقل ساده.

Table 1 Test treatments used in the formulation based on a simplex centroid mixture design.

تیمار Treatment	نسب اجزاء Components proportion			کربوکسی متیل سلولوز (%) Carboxyl methyl cellulose (%)	صمغ کنجاک (%) Konjac gum (%)	صمغ دانه مرو (%) Sage seed gum (%)
	(X3)	(X2)	(X1)			
1	0	1	0	0	100	0
2	0	1	0	0	100	0
3	0.5	0.5	0.5	33	33	33
4	0.33	0.33	0.66	66	16	16
5	0	1	0	0	100	0
6	0.66	0.33	0.33	16	16	66
7	0	0	1	100	0	0
8	0.5	0.5	0	0	50	50
9	0.33	0.66	0.33	16	66	16
10	1	0	0	0	0	100
11	0	0.5	0.5	50	50	0
12	0.5	0	0.5	50	0	50
13	0	0.5	0.5	50	50	0
14	0	0	0	0	0	100

۴.۲. آزمون‌های رئولوژیکی دینامیکی

اندازه‌گیری پارامترهای رئولوژیکی دینامیک با استفاده از رئومتر پارفیزیکا انجام پذیرفت. این رئومتر مجهز به هندسه دو صفحه موازی با قطر ۵۰ mm و فاصله دو صفحه ۱ mm می‌باشد. هم‌چنین از نرم افزار Rheoplus/32, version V3.40 جهت تعیین پارامترهای رئولوژیکی مختلف G' ، G'' و η^* استفاده شد. دمای صفحه پایینی نیز با به‌کارگیری سیستم پلتیر کنترل و برای حفظ یکنواخت دما در حالت فعال در طی آزمون نمونه‌ها با یک هود اختصاصی دستگاه محافظت شدند.

۴.۲.۱. آزمون تنش متغیر

آزمون تنش متغیر در محدوده ۱ تا ۱۰۰ Pa و فرکانس ۱ Hz و دمای ۲۰ °C برای تعیین مدول الاستیک در ناحیه خطی G'_{LVE} ، مدول افت در ناحیه خطی G''_{LVE} ، کرنش بحرانی γ_c ، تنش تسلیم τ_y ، تانژانت اتلاف در ناحیه خطی $\tan \delta_{LVE}$ انجام گرفت [۳۲].

۴.۲.۲. آزمون فرکانس متغیر

بعد از تعیین پارامترهای آزمون تنش متغیر، طیف مکانیکی و ویژگی‌های ویسکوالاستیک ماست فوری شتر با به‌کارگیری آزمون فرکانس متغیر در محدوده فرکانس زاویه‌ای ۰/۱ تا ۱۰۰ Hz در دمای ۲۰ °C و کرنش ثابت ۰/۱٪ ناحیه خطی صورت گرفت.

۵.۲. طراحی آزمایش و آنالیز آماری

در این تحقیق، طرح مخلوط مرکز ثقل ساده Simplex centroid mixture design به منظور مشاهده تاثیرات صمغ‌های کربوکسی متیل سلولوز X1، صمغ کنجاک X2 و صمغ دانه مرو X3 بر ویژگی‌های رئولوژیکی ماست فوری شتر به‌کار گرفته شد. در طرح آزمایش مخلوط، میزان کل صمغ به مقدار ۱٪ ثابت نگه داشته می‌شود و با تغییر در نسبت صمغ ویژگی‌های مورد ارزیابی تغییر می‌کند. از این رو هدف از این روش مشخص کردن چگونگی تغییر ویژگی‌های مورد نظر با تغییر ترکیب صمغ در مخلوط است [۳۳]. ترکیب چندگانه از این متغیرها با در نظر گرفتن نسبت صمغ‌ها در محدوده ۰-۱ و ۰-۱۰۰٪ منجر به یک طرح آزمایشی با ۱۴ تیمار گردید (جدول ۱). برای طراحی آزمایش و تجزیه و تحلیل نتایج، از نرم افزار Design Expert نسخه ۱-۰-۱۰ استفاده شد. به این منظور از معادلات مناسب برای نشان دادن رابطه هر یک از متغیرهای وابسته در مدل رگرسیون با متغیرهای مستقل استفاده و نمودارهای کانتور مخلوط آن‌ها به‌وسیله این نرم افزار ترسیم شدند. در این نمودارها سه متغیر فرمولاسیون در سه ضلع مثلث مشخص شده و مقادیر به‌دست آمده برای هر پاسخ روی اضلاع مثلث نشان داده می‌شوند، به این ترتیب که رنگ قرمز بیش‌ترین مقادیر و رنگ آبی کم‌ترین مقادیر را نشان می‌دهد. هم‌چنین با استفاده از آنالیز واریانس ANOVA معنی‌دار بودن اثرات خطی،

کرم شب تاب i و کرم شب تاب j تغییر می‌کند. شدت نور با افزایش فاصله از منبع خود کاهش می‌یابد و نور در محیط نیز جذب می‌شود، بنابراین باید اجازه داده شود جذابیت با درجه جذب تغییر کند. در ساده ترین حالت شدت نور $I(r)$ با مسافت r به‌طور پیوسته و نمایی تغییر می‌کند. بیان ریاضی تغییرات شدت نور در رابطه (۱) آمده است [۳۵].

$$I = I_0 e^{-\gamma r} \quad (1)$$

I_0 شدت نور اولیه و γ ضریب جذب نور می‌باشد.

میزان جذب کرم شب تاب با شدت نوری که از کرم‌های شب تاب اطراف ساطع می‌شود، متناسب است. بنابراین مقدار جذابیت یک کرم شب تاب طبق رابطه (۲) تعریف شده است:

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (2)$$

β_0 مقدار جذابیت در مسافت صفر است. شبه کد الگوریتم کرم شب تاب در شکل (۱) نمایش داده شده است.

فاصله بین هر دو کرم شب تاب i و j در X_i و X_j را می‌توان از مختصات کارتزین طبق رابطه (۳) به‌دست آورد.

$$r_{ij} = \|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^n (X_{i,k} - X_{j,k})^2} \quad (3)$$

$X_{i,k}$ جزء k از کرم شب تاب i است.

در این الگوریتم کرم‌های شب تاب به سمت کرم‌های با جذابیت بیشتر حرکت می‌کنند. در هر مرحله میزان جابه‌جایی کرم جذب شده i به سوی کرم شب تاب جذاب‌تر (روشن‌تر) j توسط رابطه (۴) تعیین می‌شود [۳۵].

درجه دوم و متقابل ضرایب مدل رگرسیون برای هر پاسخ در سطوح ۰/۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۰۱ بررسی شد.

۶.۲. بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب

یازگ الگوریتم کرم شب تاب را بر اساس فرضیه‌های زیر فرموله کرده است:

الف- کرم‌های شب تاب فاقد جنسیت می‌باشند، بنابراین یک کرم شب تاب می‌تواند توسط تمامی کرم‌های شب تاب دیگر جذب شود [۳۴].

ب- جذابیت متناسب با نور است و برای هر دو کرم شب تاب، کرم با نور کم‌تر جذب کرم با نور بیشتر می‌شود به سمت آن حرکت می‌کند، با افزایش مسافت کاهش نور کرم شب تاب در نظر گرفته می‌شود.

ج- اگر هیچ کرم شب تاب نورانی تری نباشد، کرم شب تاب به صورت تصادفی حرکت خواهد کرد.

د- روشنایی باید با تابع هدف در ارتباط باشد. بنابراین جذابیت یک کرم شب تاب بر اساس درخشندگی یا شدت نوری تعیین می‌شود که از تابع هدف به‌دست آمده است.

در ساده ترین حالت برای مسائل بهینه‌سازی که در آن مقدار بیشینه تابع هدف به‌دست می‌آید، بیشینه روشنایی، I یک کرم شب تاب در مکان منحصر به فرد X می‌تواند مقدار روشنایی با تابع هدف متناسب شود $I(X) \propto F(X)$. با این حال جذابیت β ، کاملاً نسبی است و باید در چشمان ناظر دیده و یا توسط کرم‌های شب تاب دیگر قضاوت شود. بنابراین جذابیت با مسافت r_{ij} بین

```

Firefly Algorithm
Objective function  $f(x)$ ,  $x = (x_1, \dots, x_d)^T$ 
Initialize a population of fireflies  $x_i$  ( $i = 1, \dots, n$ )
Define light absorption coefficient
while ( $t < \text{Margination}$ )
for  $i = 1 : n$  all  $n$  fireflies
for  $j = 1 : i$  all  $n$  fireflies
Light intensity  $I_j$  at  $x_j$  is determined by  $f(x_j)$ 
If ( $I_j > I_i$ )
Move firefly  $i$  toward  $j$  in all  $d$  dimensions
end if
Attractiveness varies with distance  $r$  via  $\exp[-\beta r]$ 
Evaluate new solutions and update light intensity
end for  $j$ 
end for  $i$ 
Rank the fireflies and find the current best
end while
Post-process results and visualization

```

شکل (۱) شبه کد الگوریتم کرم شب تاب [۳۶]

Fig. 1 Pseudocode of firefly algorithm [36]

یک مدل بیانگر این است که نقاط به خوبی اطراف مدل قرار نگرفته و در نتیجه نمی‌توان از مدل برای پیش‌گویی مقادیر متغیرهای تابع استفاده نمود. طبق جدول (۲)، علاوه بر مقدار F که مشخص‌کننده معنادار بودن همه مدل‌ها است، ضریب تبیین برای کلیه صفات اندازه‌گیری شده بالاتر از ۰/۸ بوده و فاکتور عدم برآزش نیز برای کلیه صفات اندازه‌گیری شده در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار نمی‌باشد. بنابراین بالا بودن ضریب تبیین و معنی‌دار نبودن عدم برآزش برای تمامی پاسخ‌ها و همچنین ضریب تغییرات CV کم‌تر از ۲۲٪ نشان‌دهنده صحت قابل قبول آزمایشات است که تکرارپذیری مدل‌ها را مشخص می‌کند [۳۴].

۳.۱.۲. کرنش بحرانی

کرنش بحرانی، کرنشی که با افزایش آن کاهش شدیدی در G' مشاهده می‌شود، بستگی به ساختار فضایی پلیمر غذایی دارد [۳۷] و به تغییر شکل‌پذیری نمونه‌های ژل مرتبط است [۳۸].

کربوکسی متیل سلولز، ۱۶٪ صمغ کنجاک و ۶۶٪ صمغ دانه مرو حائز بیش‌ترین کرنش بحرانی ۰/۴۱٪ شدند که به دلیل تشکیل شبکه ژلی مستحکم‌تر می‌باشد. کلارک و روز مورفی گزارش کردند که ناحیه خطی در محلول‌های رقیق کم‌تر از محلول‌های غلیظ است و محلول‌های غلیظ کم‌تر از ژل‌ها است [۳۹]. در حالی که این مقدار در ژل‌های کلونیدی به ندرت بیش‌تر از ۰/۱٪ است، ناحیه خطی بزرگ‌تری برابر با ۰/۱٪ و یا بیش‌تر برای ژل‌های بیوپلیمری طبیعی وجود دارد. هلدمن و لوند

$$X_i = X_j + \beta_0 e^{-\beta_1 |x_i - x_j|} + \alpha \epsilon_i \quad (4)$$

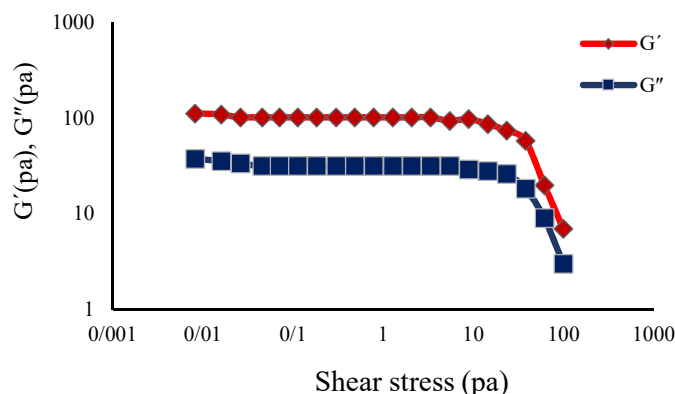
عبارت دوم رابطه فوق با جذب در ارتباط است، در حالی که عبارت سوم، تصادفی و با بردار تصادفی ϵ_i تغییر و از توزیع نرمال تبعیت می‌کند. پارامتر γ تغییر جذابیت را مشخص می‌کند و مقدار آن مشخص‌کننده تعیین سرعت همگرایی و چگونگی رفتار الگوریتم کرم شب تاب است. در نهایت زمانی که $\gamma=0$ ، جذابیت ثابت است $\beta=\beta_0$.

روابط بهینه‌سازی فرمولاسیون با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب توسط نرم افزار متلب ۲۰۱۶ انجام و سپس با استفاده از روش تحلیل مؤلفه اصلی توسط نرم افزار XLSTAT 2014 ارتباط بین داده‌ها و نوع همبستگی بین پاسخ‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. مدل‌سازی

معادلات به‌دست آمده برای پیش‌بینی متغیرهای ماست فوری شتر که توصیف‌کننده رابطه بین پاسخ‌ها (خواص رئولوژیکی) و متغیرهای مستقل (نسبت صمغ‌ها) است، با استفاده از طرح مخلوط مرکز ثقل ساده برای متغیرهای معنی‌دار در جدول (۲) آمده است. همچنین برای بررسی صحت مدل از ضرایب تبیین R^2 و تست عدم برآزش نیز استفاده گردید. برای آن که یک مدل توانایی خوبی برای برآزش اطلاعات داشته باشد لازم است که R^2 بالای ۰/۸ باشد. از طرف دیگر معنی‌دار بودن عدم بردازش برای



شکل (۲) نمودار مدول الاستیک، G' ، و مدول ویسکوز، G'' ، در برابر تنش نمونه ۱۲

(حاوی ۵۰٪ کربوکسی متیل سلولز، ۵۰٪ صمغ دانه مرو و فاقد صمغ کنجاک) در فرکانس ۱ Hz و در دمای ۲۰ °C

Fig. 2 Stress sweep dependency of storage modulus (G') and loss modulus (G'') measured for sample NO 12 (with 50 % CMC and 50% SSG) at 20 °C and $f=1$ Hz

جدول (۲) معادلات به دست آمده برای پیش بینی متغیرهای وابسته با استفاده از طرح مخلوط مرکز ثقل ساده.
Table 2 The obtained equations to predict dependent variables using simplex centroid mixture design.

متغیرهای وابسته Dependent variable	معادله Equation	F Value	p-value Probe > F	R ²	CV	Lack of fit
G ['] _{LVE} (Pa)	Y1 = 1725.99x ₁ +2850.99x ₂ +2320.99x ₃ -1606.06x ₁ x ₂ +2681.82x ₁ x ₃ +3351.82x ₂ x ₃ +70878.03x ₁ ² x ₂ x ₃ -75821.97	1.80	0.0042	0.849	4.54	n.s.
G ^{''} _{LVE} (Pa)	Y2 = 725.99x ₁ +1150.99x ₂ +1300.99x ₃ -806.06x ₁ x ₂ +2001.82x ₁ x ₃ +1251.82x ₂ x ₃ +20878.03x ₁ ² x ₂ x ₃ -45821.97x ₁ x ₂ ² x ₃ -31172.8'	4.87	0.1050	0.814	22.30	n.s.
γ _c (%)	Y3 = 0.029x ₁ +0.010x ₂ +0.020x ₃ + 0.41x ₁ x ₂ +1.33x ₁ x ₃ -0.073x ₂ x ₃ -17.61x ₁ ² x ₂ x ₃ -3.67x ₁ x ₂ ² x ₃ + 29.66x ₁ x ₂ x ₃ ²	21.97	0.0001	0.951	16.30	n.s.
τ _y (Pa)	Y4 = 0.037x ₁ +0.044x ₂ +0.058x ₃ + 0.039x ₁ x ₂ +0.27x ₁ x ₃ -0.026x ₂ x ₃ -4.55x ₁ ² x ₂ x ₃ -2.16x ₁ x ₂ ² x ₃ + 10.14x ₁ x ₂ x ₃ ²	6.25	0.0042	0.849	4.54	n.s.
n'	Y5 = 0.14x ₁ +0.13x ₂ +0.13x ₃ + 0.00039x ₁ x ₂ +0.00027x ₁ x ₃ -0.053x ₂ x ₃ -2.06x ₁ ² x ₂ x ₃ + 0.39x ₁ x ₂ ² x ₃ + 1.25x ₁ x ₂ x ₃ ²	4.87	0.0105	0.814	22.30	n.s.
k' (Pa)	Y6 = 7888.93x ₁ +18586.99x ₂ +8024x ₃ -30367.06x ₁ x ₂ +35234.82x ₁ x ₃ -131.82x ₂ x ₃ -66326.03x ₁ ² x ₂ x ₃ -24151.97x ₁ x ₂ ² x ₃ -0.000089.	21.97	0.0001	0.951	16.30	n.s.
n''	Y7 = 0.083x ₁ +0.092x ₂ +0.13x ₃ + 0.17x ₁ x ₂ +0.0002x ₁ x ₃ + 0.64x ₂ x ₃ -2.28x ₁ ² x ₂ x ₃ - 3.21x ₁ x ₂ ² x ₃ - 3.61x ₁ x ₂ x ₃ ²	6.25	0.0042	0.849	4.54	n.s.
k'' (Pa)	Y8 = 2872.12x ₁ +6863.96x ₂ +2635.81x ₃ -11015.57x ₁ x ₂ +13457.41x ₁ x ₃ -906.53x ₂ x ₃ -3050.66x ₁ ² x ₂ x ₃ + 10729.50x ₁ x ₂ ² x ₃ + 606000x ₁ x ₂ x ₃ ²	4.87	0.0105	0.814	22.30	n.s.
n*	Y9 = -0.85x ₁ -0.87x ₂ -0.85x ₃ - 0.12x ₁ x ₂ -0.029x ₁ x ₃ -0.037x ₂ x ₃ -2.28x ₁ ² x ₂ x ₃ + 0.28x ₁ x ₂ ² x ₃ + 4.20x ₁ x ₂ x ₃ ²	21.97	0.0001	0.951	16.30	n.s.
k* (Pa.s)	Y10 = 8390.14x ₁ +19653.68x ₂ +8446.61x ₃ -31783.25x ₁ x ₂ +37174.71x ₁ x ₃ -1602.89x ₂ x ₃ -24444.73x ₁ ² x ₂ x ₃	30.72	0.0001	0.966	0.05	n.s.

صمغ دانه مرو و کربوکسی متیل سلولز بر روی کرنش بحرانی تیمارهای فرمولاسیون ماست فوری شتر می‌باشد. بنابراین با توجه به این که افزایش کرنش بحرانی نشان‌دهنده زمان بیش‌تر تعاملات ساختار پلیمری در نمونه‌ها است و صمغ دانه مرو بیش‌ترین تاثیر را بر روی افزایش کرنش بحرانی نمونه‌ها داشت لذا می‌توان دریافت که صمغ دانه مرو بیش‌ترین اثر را بر روی تقویت ژل ماست داشت. به‌طوری که با گذشت زمان پیوندهایی جدید جایگزین پیوندهایی می‌شود که با اعمال کرنش خارجی در آزمون تنش برشی با دامنه نوسانی کم شکسته شده‌اند. استف گزارش کرد که ژل‌های قوی در مقایسه با انواع ضعیف زمان بیش‌تری را در حالت خطی باقی می‌مانند [۴۳] هم‌چنین نتایج رئولوژیکی تعیین ناحیه خطی و تخریب ساختاری نشان داد که تقریباً برهم‌کنش‌های یکسانی در طی تشکیل ماست فوری شتر به‌وجود می‌آید.

۳.۲.۲. تنش تسلیم (تنش بحرانی)

نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که تنش تسلیم نمونه‌های مورد آزمون بین ۰/۰۲۸۵ و ۰/۱۸۵ Pa متغیر بوده به‌طوری که نمونه ۱۱ حاوی ۵۰٪ کربوکسی متیل سلولز، ۵۰٪ صمغ کنجاک و فاقد صمغ دانه مرو حائز کم‌ترین تنش تسلیم ۰/۰۲۸۵ Pa و نمونه ۶ حاوی ۱۶٪ کربوکسی متیل سلولز، ۱۶٪ صمغ کنجاک و ۶۶٪ صمغ دانه مرو حائز بیش‌ترین تنش تسلیم ۰/۱۸۵ Pa شدند. شکل (۴) نمودار کانتور تأثیر افزودن کربوکسی متیل سلولز، صمغ کنجاک و صمغ دانه مرو بر روی تنش تسلیم نمونه‌های ماست فوری شتر را با توجه به معادله y4 جدول (۲) نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۴) قابل مشاهده است رنگ قرمز مقادیر بالای تنش تسلیم تقریباً در مرکز مثلث و نزدیک به صمغ دانه مرو و به‌ویژه نزدیک به ضلع‌های AC و BC بیش‌ترین مقادیر و رنگ آبی مقادیر پایین تنش تسلیم در نزدیکی رئوس کربوکسی متیل سلولز و صمغ کنجاک به‌ویژه در راس AB می‌باشد. این نتایج نشان‌دهنده اثر سینرژیستی این سه صمغ به‌ویژه اثر سینرژیستی صمغ دانه مرو و کربوکسی متیل سلولز را نشان می‌دهد. هم‌چنین می‌توان دریافت که صمغ دانه مرو بیش‌ترین تاثیر را بر روی افزایش تنش تسلیم نمونه‌ها دارد. رضوی و همکاران نشان دادند که صمغ دانه مرو علاوه بر تشکیل ژل قوی

جدول (۳) پارامترهای حاصل از آزمون کرنش متغیر نمونه‌های ماست فوری شتر (دمای ۲۰ °C و فرکانس ۱ Hz).

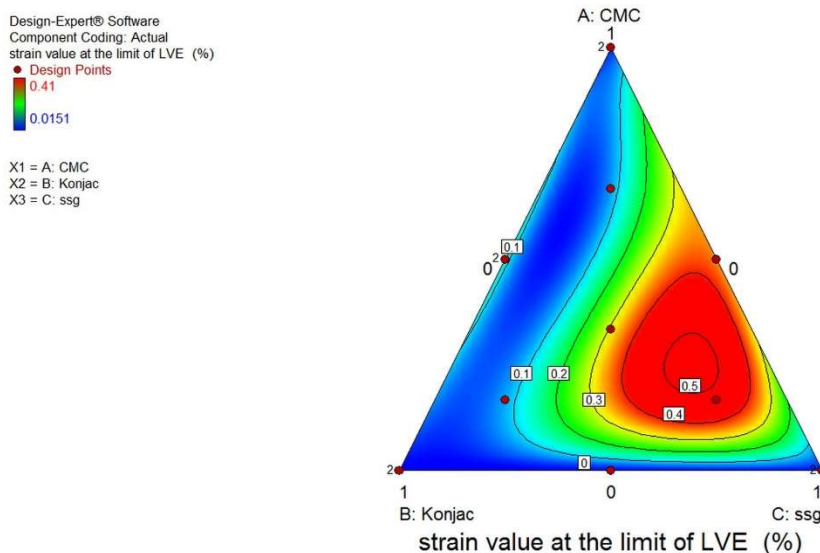
Table 3 Parameters derived from the stress sweep test of instant camel yogurt samples at 20 °C and f=1 Hz.

تیمار Treatment	τ_y (Pa)	γ_e (%)	G''^{LVE} (Pa)	G'^{LVE} (Pa)
1	0.0285	0.00156	7943.28	1330
2	0.044	0.00152	19498.4	2860
3	0.0442	0.00173	7244.36	2560
4	0.0285	0.00156	5754.4	1330
5	0.114	0.000681	16982.4	2730
6	0.0443	0.00128	13489.6	3460
7	0.044	0.0017	13803.8	2590
8	0.0452	0.00202	16595.9	1850
9	0.185	0.00864	8912.51	2140
10	0.119	0.00536	32359.4	2220
11	0.0455	0.00528	7943.28	2140
12	0.044	0.00152	17782.8	2860
13	0.0715	0.00335	8912.51	2100
14	0.0719	0.0025	5754.4	2480

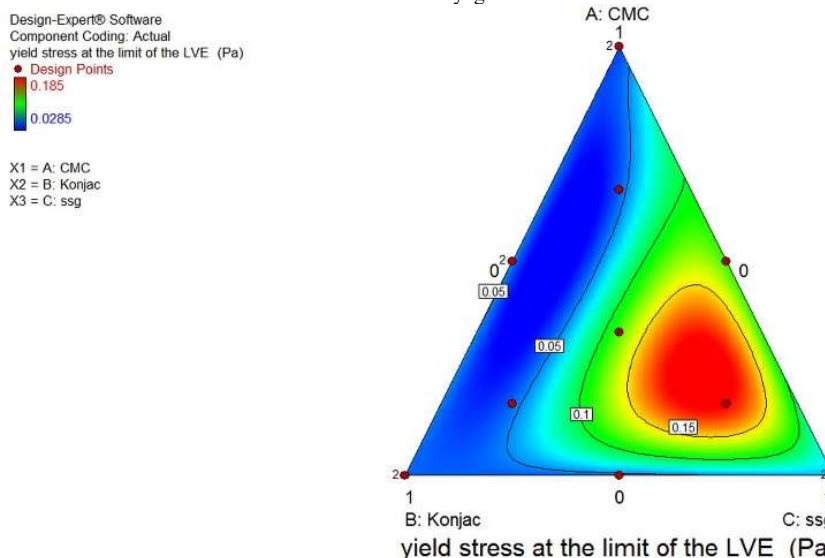
هم‌چنین گزارش کردند که ناحیه ویسکوالاستیک خطی برای بیش‌تر مواد غذایی جامد نرم در بازه ۲-۰/۱٪ است [۴۰]. از این رو، با در نظر گرفتن کرنش بحرانی نمونه‌ها ماست فوری شتر ژل نسبتاً ضعیفی را ایجاد می‌کند. اوزر و همکاران نشان دادند که کرنش بحرانی ویسکوالاستیک برای ماست چکیده لبه ۰/۰۲٪ بود [۴۱]. پولسون و دجمرک دامنه کرنش ۰/۰۱٪ در فرکانس ۱ Hz را به‌عنوان کرنش بحرانی جهت بررسی تشکیل ژل حرارتی بتالاکتوگلوبولین در نظر گرفتند [۴۲]. بیش‌تر تحقیقات بر روی محصولات لبنی ژل مانند با استفاده از دامنه کرنش کم‌تر از ۰/۰۵٪ در فرکانس ۱ Hz انجام شده، از این رو در این تحقیق نیز کرنش ۰/۰۱٪ در آزمون فرکانس متغیر در نظر گرفته شد تا همه نمونه‌ها برای انجام آزمون فرکانس متغیر کاملاً در ناحیه خطی قرار قرار داشته باشند.

شکل (۳) نمودار کانتور تأثیر افزودن کربوکسی متیل سلولز، صمغ کنجاک و صمغ دانه مرو بر روی کرنش بحرانی نمونه‌های ماست فوری شتر را با توجه به معادله y3 جدول (۲) نشان می‌دهد.

همان‌طور که در نمودار کانتور مخلوط کرنش بحرانی تیمارهای فرمولاسیون ماست فوری شتر قابل مشاهده است رنگ قرمز مقادیر بالای کرنش بحرانی تقریباً در مرکز مثلث و نزدیک به صمغ دانه مرو و به‌ویژه نزدیک به ضلع AC می‌باشد و رنگ آبی مقادیر پایین کرنش بحرانی در نزدیکی رئوس کربوکسی متیل سلولز و صمغ کنجاک به‌ویژه در راس AB می‌باشد. این نتایج نشان‌دهنده اثر سینرژیستی این سه صمغ به‌ویژه اثر سینرژیستی



شکل (۳) نمودار کانتور تأثیر افزودن کربوکسی متیل سلولز، صمغ کنجاک و صمغ دانه مرو بر کرنش بحرانی γ_c ، نمونه‌های ماست فوری شتر
Fig 3 Mixture triangular contour plot of the effects of the different gums on the critical strain value at the limit of the LVE region (γ_c) of the model instant camel yogurt



شکل (۴) نمودار کانتور تأثیر افزودن کربوکسی متیل سلولز، صمغ کنجاک و صمغ دانه مرو بر تنش تسلیم، τ_y ، نمونه‌های ماست فوری شتر
Fig 4 Mixture triangular contour plot of the effects of the different gums on the yield stress (τ_y) of the model instant camel yogurt

نشان می‌دهد که نمونه، ژل واقعی نبوده و ساختمان آن بین ژل فیزیکی و ژل واقعی است [۴۵]. تانژانت اتلاف نمونه‌ها بین ۰/۳۲ و ۰/۳۸ متغیر بود که با توجه به این که کم‌تر از یک و بزرگ‌تر از ۰/۱ بودند نشان از حضور ساختار الاستیک در ژل ضعیف بیوپلیمری داشت. هم‌چنین با توجه به این که هیچ یک از نمونه‌ها ژل واقعی نبودند، درگیری رشته‌ها و ارتباطات ماکرومولکول‌ها موقتی بوده و می‌توانند در درجه برش‌های بالا از هم گسیخته شوند [۴۶]. هم‌چنین نتایج بررسی‌ها نشان داد که

دارای اثرات سینرژیستی منحصر به فرد در حضور سایر صمغ‌ها از جمله زانتان می‌باشد [۴۴].

۳.۲.۳. تانژانت اتلاف

تانژانت اتلاف، $\tan \delta = G''/G'$ ، یک عدد مشخصه برای توصیف رفتار ویسکوالاستیک مواد می‌باشد، اعداد کوچک‌تر از یک نشان‌دهنده رفتار الاستیک غالب و تانژانت اتلاف بزرگ‌تر از یک بیانگر رفتار ویسکوز غالب است. تانژانت اتلاف بزرگ‌تر از ۰/۱

کننده ویژگی‌های ژل ضعیف در تمامی نمونه‌های ماست فوری شتر است [۴۸]. این رفتار رئولوژیکی رفتاری متداول در ژل‌های ضعیف مانند ماست می‌باشد [۴۹]. بر طبق نتایج کوکینی و پلاتچاک برای ژل هیدروکلوئیدها شبکه‌ای در هم پیچیده از ماکرومولکول‌ها G' ، به‌علت محدود شدن حرکت در اثر اتصالات شبکه‌ای، بیش‌تر از G'' است [۵۰]. رواف و همکاران مشخص کردند که در ژل کازئین، مدول‌های مکانیکی عمدتاً بستگی به تعداد و قدرت پیوندهای بین ذرات کازئین و توزیع فضایی این رشته‌ها دارد به‌طوری که تانژانت اتلاف عمدتاً تابعی از رفتار رهایش بین مولکول‌های کازئین و ذرات دیگر است [۵۱].

داده‌های G' و G'' در برابر فرکانس زاویه‌ای نمونه‌ها در دمای 20°C با معادله قانون توان پیشنهاد شده توسط نولان و همکاران مورد برازش قرار گرفت [۵۲]. جدول (۴) نشان‌دهنده شیب n' و n'' و n^* عرض از مبدا k' و k'' و k^* و R^2 معادلات زیر می‌باشد:

$$G' = k'(\omega)^{n'} \quad (5)$$

$$G'' = k''(\omega)^{n''} \quad (6)$$

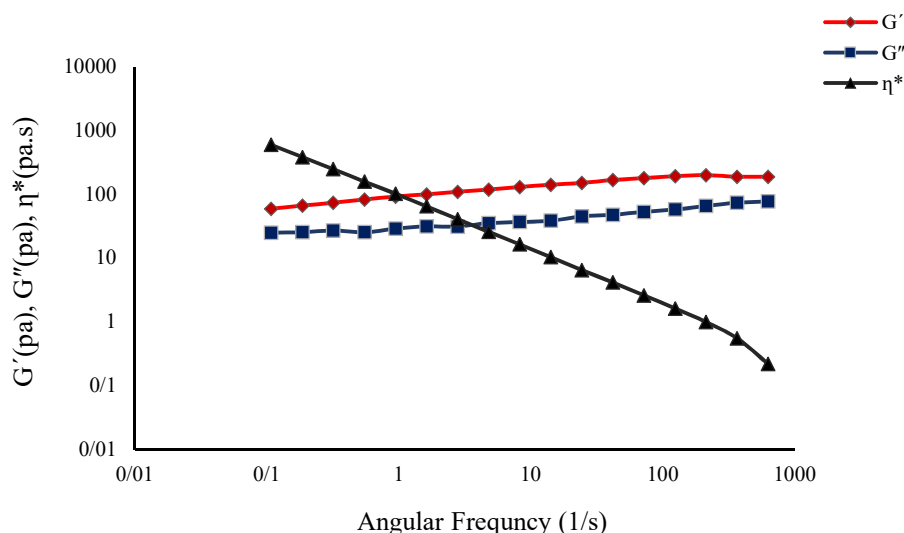
$$\eta^* = k^*(\omega)^{n^*} \quad (7)$$

برای ژل‌های واقعی کووالانت، $n' = 0$ است در حالی که برای ژل‌های فیزیکی $n' > 0$ می‌باشد. مقادیر کم n' نزدیک به صفر مشخصه ژل‌های الاستیک است در حالی که مقادیر نزدیک به ۱

هیچ کدام از اثرات خطی و درجه دوم و متقابل اثرات کربوکسی متیل سلولز، صمغ کنجاک و صمغ دانه مرو بر روی تنش تسلیم نمونه‌های ماست فوری شتر معنی‌دار نبود که مشخص کننده یکسان بودن طبیعت و نوع نیروها و برهم‌کنش بین نمونه‌ها است [۴۱].

۴.۲.۳. آزمون فرکانس متغیر

آزمون فرکانس متغیر جهت طبقه بندی مواد حاوی ذرات پراکنده در محیط مورد استفاده قرار می‌گیرد. محلول‌های رقیق، سیستم‌های شبکه‌ای در هم تنیده یا محلول‌های غلیظ، ژل‌های ضعیف و ژل‌های قوی چهار گروه متداول در این تقسیم بندی هستند [۳۹، ۴۷]. شکل (۴) تغییرات G' ، G'' و η^* را به‌عنوان تابعی از فرکانس F برای نمونه ۱۲ حاوی ۵۰٪ کربوکسی متیل سلولز و ۵۰٪ صمغ دانه مرو در دمای 20°C را نشان می‌دهد. با افزایش فرکانس مقدار η^* به شدت کاهش پیدا کرد اما G' و G'' وابستگی کم‌تری را به فرکانس نشان دادند به‌طوری که این دو پارامتر با افزایش فرکانس کمی افزایش پیدا کردند. به علاوه، مقدار G' در همه فرکانس‌ها بیش‌تر از G'' بود. در فرکانس‌های پایین، G' و G'' وابستگی کم‌تری به فرکانس داشتند که با افزایش فرکانس این وابستگی بیش‌تر شد لذا تمام این نتایج مشخص



شکل (۵) نمودار مدول الاستیک، G' ، و مدول ویسکوز، G'' ، و ویسکوزیته کمپلکس، η^* ، در برابر فرکانس نمونه ۱۲ (حاوی ۵۰٪ کربوکسی متیل سلولز و ۵۰٪ صمغ دانه مرو) در کرنش ۰/۰۱٪ و در دمای 20°C

Fig. 5 Storage modulus, G' , loss modulus, G'' , and complex viscosity, η^* , versus angular frequency of sample NO 12 (50% KG and 50% SSG) at 20°C and $\gamma=0.01\%$

جدول (۴) پارامترهای معادلات قانون توان برای مدول الاستیک (G') و مدول ویسکوز (G'') و ویسکوزیته (در فرکانس ۱ Hz و در دمای 20°C).

Table 4 Parameters of power law equations for the storage modulus (G'), loss modulus (G'') and complex viscosity (η^*) at 20°C and $f=1$ Hz.

NO.	$G' = k'(\omega)^{n'}$			$G'' = k''(\omega)^{n''}$			$\eta^* = k^*(\omega)^{n^*}$		
	n'	k'	R^2	n''	k''	R^2	n^*	k^*	R^2
1	0.148	7943.28	0.96	0.93	2884.03	0.7	-0.85	8511.38	0.99
2	0.132	19498.4	0.97	0.091	7585.78	0.78	-0.872	20893	0.99
3	0.169	7244.36	0.99	0.129	2344.23	0.91	-0.834	7585.78	0.99
4	0.147	5754.4	0.94	0.13	2137.96	0.82	-0.89	6309.57	0.99
5	0.147	16982.4	0.99	0.109	6165.95	0.86	-0.857	18197	0.99
6	0.121	13489.6	0.82	0.129	4570.88	0.94	-0.869	14125.4	0.99
7	0.148	13803.8	0.86	0.109	5128.61	0.71	-0.857	14125.4	0.99
8	0.148	16595.9	0.98	0.109	6309.57	0.77	-0.857	14125.4	0.99
9	0.148	32359.4	0.92	0.109	11749	0.72	-0.857	34673.7	0.99
10	0.161	32359.4	0.99	0.106	11749	0.92	-0.844	34673.7	1
11	0.148	7943.28	0.96	0.083	2884.03	0.7	-0.85	8511.38	0.99
12	0.136	17782.8	0.99	0.093	6165.95	0.93	-0.868	18620.9	0.99
13	0.125	8912.51	0.78	0.139	2951.21	0.96	-0.87	9549.93	0.99
14	0.147	5754.4	0.94	0.13	2137.96	0.82	-0.89	6309.57	0.99

۵۰٪ کربوکسی متیل سلولز، ۵۰٪ صمغ کنجاک و فاقد صمغ دانه مرو بود در حالی که نمونه ۶ حاوی ۱۶٪ کربوکسی متیل سلولز، ۱۶٪ صمغ کنجاک و ۶۶٪ صمغ دانه مرو بیشترین میزان k' ، k'' و k^* را نشان داد. این امر می‌تواند به علت تأثیر سینرژیستی این سه صمغ باشد. شکل‌ها نشان می‌دهند که صمغ دانه مرو بیشترین تأثیر را بر روی افزایش k' ، k'' و k^* دارد. بنابراین می‌توان بیان کرد که افزایش نسبت صمغ دانه مرو رابطه‌ای مثبت با k' دارد و البته ترکیب کربوکسی متیل سلولز، صمغ کنجاک و صمغ دانه مرو می‌تواند این تأثیر را بهبود دهد. مقدار بالاتر k' نشان‌دهنده برهم‌کنش قوی‌تر بین ذرات و مقاومت ساختار نمونه-ها است [۵۳، ۵۴]. همانند k' ، تأثیر هر کدام از صمغ‌ها بر روی k^* نیز بسیار به هم نزدیک بود به طوری که ترکیب این سه صمغ منجر به بهبود پارامتر k^* می‌شود. به طور کلی نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای صمغ دانه مرو به عنوان قوام‌دهنده و پایدارکننده با افزایش قوام در سیستم‌های غذایی است.

۳.۳. بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب

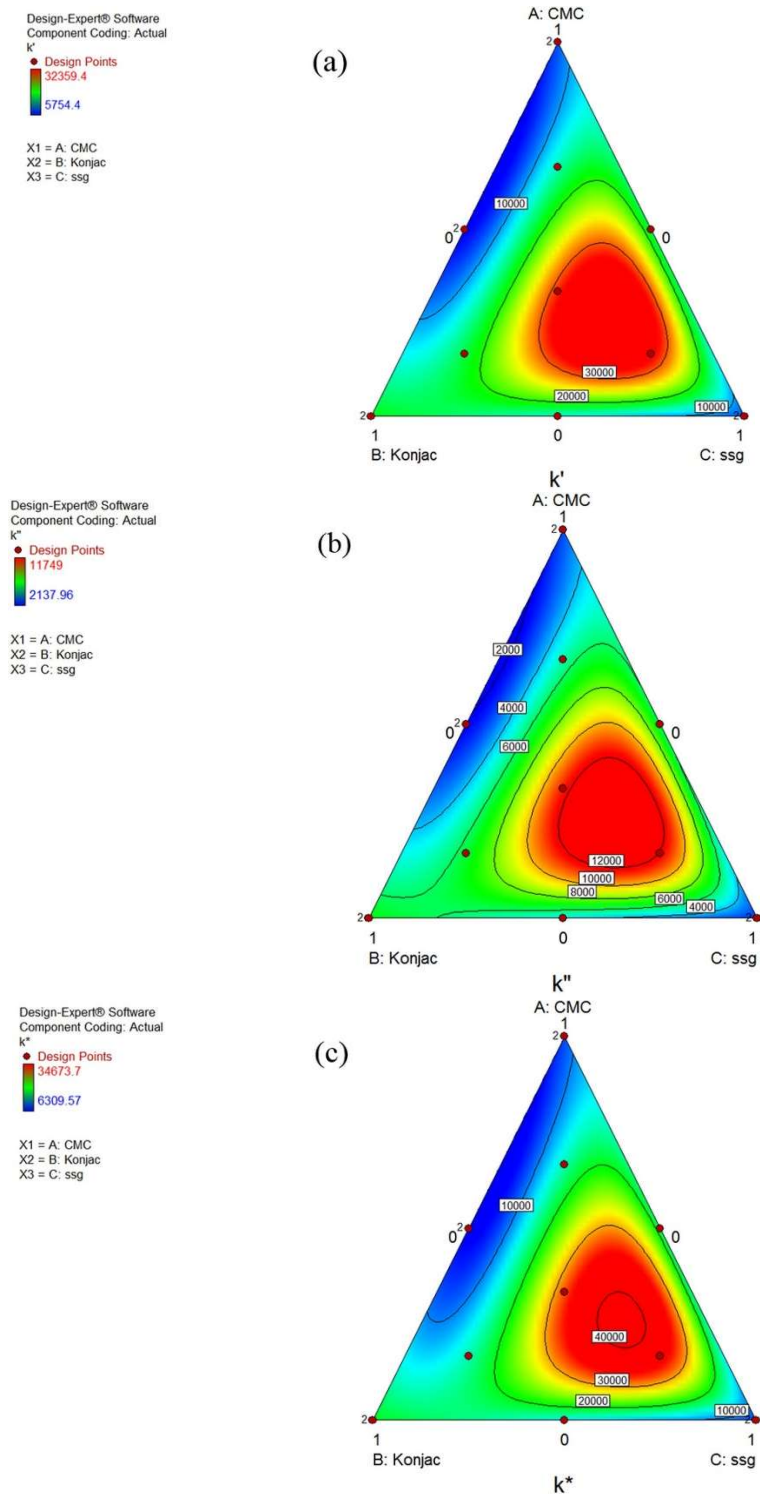
در این پژوهش به منظور بهینه‌سازی خصوصیات رئولوژیکی ماست فوری شتر با استفاده از صمغ‌های کربوکسی متیل سلولز،

مربوط به ژل‌های ویسکوز می‌باشد. در مقادیر n' نزدیک به صفر، G' با تغییرات فرکانس تغییر نمی‌کند. با توجه به داده‌های رئولوژیکی دینامیک، ماست فوری شتر، رفتار ویسکولاستیک شبه جامد را از خود نشان می‌دهد زیرا مقادیر $K' = 2/81 - 0/2$ بالاتر از مقادیر $K'' = 0/83 - 0/02$ بوده و وابستگی اندکی به فرکانس داشتند $n'' = 0/09 - 0/12$ ، $n' = 0/06 - 0/17$. با توجه به گفته کوکینی و پلات چاک در ژل هیدروکلوئیدی شبکه به هم بافته از ماکرومولکول‌ها؛ G' بر G'' غالب است، زیرا نیروهای پیوندی شبکه از حرکت و جابه‌جایی جلوگیری می‌کند [۵۰].

نتایج بررسی‌ها نشان داد که هیچ کدام از اثرات خطی و درجه دوم و متقابل اثرات کربوکسی متیل سلولز، صمغ کنجاک و صمغ دانه مرو بر روی n' ، n'' و n^* نمونه‌های ماست فوری شتر معنی‌دار نبود $p < 0.01$ و مشاهده شد که هر سه صمغ تأثیر یکسانی بر روی n' ، n'' و n^* داشت.

شکل (۶) نمودار کانتور تأثیر افزودن کربوکسی متیل سلولز، صمغ کنجاک و صمغ دانه مرو را به ترتیب بر روی k' ، k'' و k^* شکل‌های a، b و c نمونه‌های ماست فوری شتر را با توجه به معادلات Y6، Y8 و Y10 جدول ۲ نشان می‌دهد.

کم‌ترین مقدار k' ، k'' و k^* در نمونه ۱۱ مشاهده شد که حاوی



شکل (۶) نمودار کانتور تأثیر افزودن کربوکسی متیل سلولز، صمغ کنجاک و صمغ دانه مرو بر k' ، k'' و k^* ، شکل‌های a، b و c، نمونه‌های ماست فوری شتر

Fig. 6 Mixture triangular contour plot of the effects of the different gums on the k' (a), k'' (b) and k^* (c) of the model instant camel yogurt

صمغ کنجاک و صمغ دانه مرو تلاش بر این بود که برای بهبود خصوصیات رئولوژیکی ماست فوری تا حد امکان G'_{LVE} ، η_C ، τ_y ، n' ، k' ، n'' ، k'' ، n^* ، k^* به‌عنوان توابع هدف افزایش و G''_{LVE} کاهش یابند. داده‌های اولیه داده شده به الگوریتم کرم شب تاب

کرم شب تاب نیز به‌عنوان تعداد کرم شب تاب در الگوریتم تعیین شد. نتایج بهینه صمغ‌های کربوکسی متیل سلولز، صمغ کنجاک و صمغ دانه مرو به‌دست آمده با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب در جدول (۵) نشان داده شده است.

با توجه به مقادیر بهینه به‌دست آمده از الگوریتم کرم شب تاب برای هر پارامتر رئولوژیکی و در نظر گرفتن اینکه سهم هر یک از این صمغ‌ها نشان‌دهنده میزان اثر آن صمغ بر روی آن پارامتر رئولوژیکی خاص در نمونه‌ها می‌باشد لذا به منظور بررسی رابطه بین سهم هر صمغ و پارامترهای رئولوژیکی ماست فوری شتر، نمودار پراکنش آن‌ها در فضای PC مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که از مجموع ۱۰ مؤلفه که با درجات استقلال متفاوت تعریف شده‌اند دو مؤلفه اول و دومی که دارای درجه استقلال بزرگ‌تر از یک بودند به‌عنوان مؤلفه‌های اصلی اول و دوم در نظر گرفته شدند. بنابراین مؤلفه‌های اصلی PCA داده‌های مربوط به پارامترهای رئولوژیکی ماست فوری شتر با دو مؤلفه اصلی به ترتیب ۹۹ و ۱٪ واریانس محاسبه شده‌اند.

شکل (۷) پراکنش مقادیر بهینه صمغ‌های مختلف را بر مبنای دو مؤلفه اول و دوم نشان می‌دهد. همان طور که از موقعیت مقادیر بهینه صمغ‌ها در فضای PC مشاهده می‌گردد، مقادیر بهینه به‌دست آمده از صمغ کنجاک و صمغ دانه مرو در مجاورت هم قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده اثر تقریباً یکسان این دو صمغ

در حقیقت داده‌های مدل‌های پیش‌بینی شده از طرح مخلوط جدول (۲) هستند. به‌طور کلی ابتدا لازم است مناسب‌ترین مقادیر پارامترهای مرتبط با جذب نور محیط γ و حرکت تصادفی کرم شب تاب α برای بهینه‌سازی توسط الگوریتم شب تاب به‌دست آیند. به این منظور در مرحله اول $\alpha=0.5$ در نظر گرفته شد و با تغییر ضریب جذب نور γ تاثیر آن در مقادیر بهینه بررسی و ضریب جذب نور مناسب انتخاب شد. برای تنظیم مقادیر γ در بازه ۵ و ۰ مقادیر بهینه تابع هدف به‌دست آمد و مشخص شد که مقادیر بهینه در این مسئله چندان تحت تاثیر تغییرات γ قرار نمی‌گیرد، بنابراین ضریب جذب نور ۱ منظور شد.

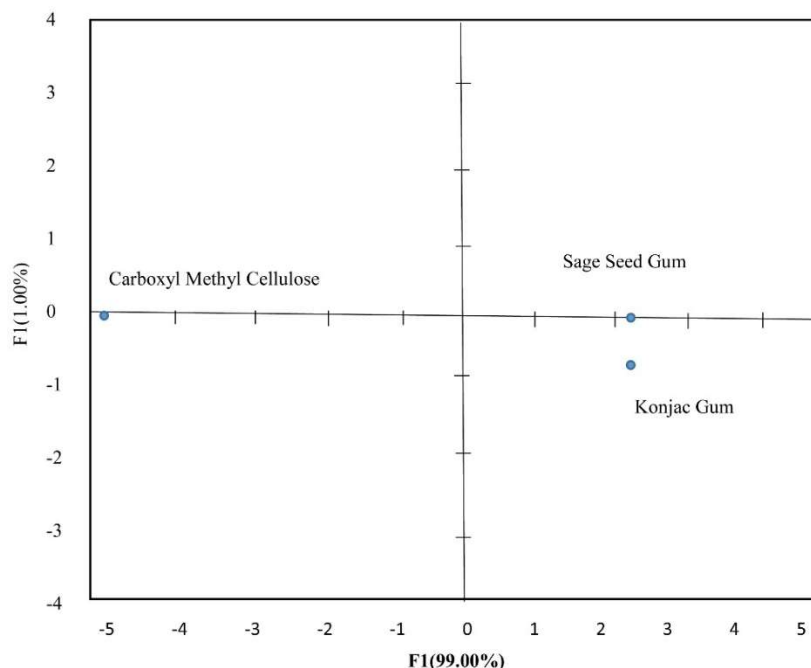
عبارت سوم رابطه (۷) باعث حرکت تصادفی کرم‌های شب تاب در فضا می‌شود. پارامتر بردار تصادفی ایجاد می‌کند که از توزیع نرمال تبعیت می‌کند و تاثیر این بردار در حرکت کرم شب تاب به کمک پارامتر α تعیین می‌شود $\alpha \in [0,1]$. در صورت صفر اختیار کردن این پارامتر قسمت تصادفی این رابطه γ کاملاً حذف خواهد شد.

در الگوریتم کرم شب تاب، تمام کرم‌ها به سمت نقطه یا نقاط بهینه حرکت می‌کنند، بنابراین هر چه تعداد کرم بیشتر باشد احتمال دست یافتن به بهینه عمومی افزایش می‌یابد. لذا در این مساله با توجه به این که مقادیر بهینه با افزایش تعداد کرم شب تاب بیش‌تر از ۱۵۰۰ تغییرات چندان پیدا نمی‌کردند این تعداد

جدول (۵) نتایج بهینه درصد صمغ‌های کربوکسی متیل سلولز، صمغ کنجاک و صمغ دانه مرو برای دستیابی به حداکثر G_{LVE} ، γ_c ، τ_y ، n' ، n'' ، k' ، k'' ، n^* و k^* و حداقل G_{LVE}'' با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب ($\alpha=0.5$ ، $\gamma=1$ و تعداد کرم شب تاب=۱۵۰۰).

Table 5 The optimum results of the percentage of carboxy methyl cellulose, Konjac gum and sage seed gum for achieving the maximum G_{LVE} , γ_c , τ_y , n' , n'' , k' , k'' , n^* , k^* and minimum G_{LVE}'' using the firefly algorithm ($\alpha = 0.5$, $\gamma = 1$ and number of fireflies = 1500).

نوع صمغ Gum type			پارامترهای رئولوژیکی Rheological parameters
صمغ دانه مرو (%) Sage seed gum (%)	صمغ کنجاک (%) Konjac gum (%)	کربوکسی متیل سلولز (%) Carboxyl methyl cellulose (%)	
0.413	0.412	0.175	G'_{LVE} (Pa)
0.41	0.41	0.18	G''_{LVE} (Pa)
0.499	0.499	0.002	γ_c (%)
0.017	0.017	0.964	τ_y (Pa)
0.499	0.499	0.002	n'
0.144	0.144	0.711	k' (Pa)
0.377	0.377	0.244	n''
0.377	0.377	0.244	k'' (Pa)
0.416	0.416	0.166	n^*
0.5	0.5	0	k^* (Pa.s)



شکل (۷) سهم مقادیر بهینه صمغ‌های مختلف در دو مولفه اصلی اول و دوم

Fig. 7 The share of optimal amounts of different gums on the first and second principal components

کنجاک و صمغ دانه مرو و مخلوط صمغ‌ها بر خصوصیات رئولوژیکی دینامیک ماست فوری شتر با استفاده از مدل‌های به‌دست آمده از طرح مخلوط و با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب به خوبی بهینه گردید. نتایج اثر سینرژیستی این سه صمغ به‌ویژه اثر سینرژیستی صمغ دانه مرو و کربوکسی متیل سلولز بر روی کرنش بحرانی و تنش تسلیم تیمارهای فرمولاسیون ماست فوری شتر را نشان داد. همچنین صمغ دانه مرو نیز بیش‌ترین تاثیر را بر روی افزایش k' ، k'' و k^* داشت که البته ترکیب با کربوکسی متیل سلولز و صمغ کنجاک نیز می‌توانست این تاثیر را بهبود دهد. به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که صمغ دانه مرو به‌عنوان یک هیدروکلوئید جدید، بسیار مناسب بوده و خواص مطلوب را در ماست فوری شتر ایجاد می‌کند.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از حمایت‌های مالی (گرنه شماره ۹۶۰۱۵۵۴۰) "صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور" در اجرای طرح پژوهشی "تاثیر برخی صمغ‌های بومی بر خصوصیات ماست فوری شتر" و استخراج این مقاله تقدیر و تشکر می‌شود.

بر روی پارامترهای رئولوژیکی ماست فوری شتر می‌باشد که در حقیقت نشان‌دهنده تشابه اثر این دو صمغ بر روی پارامترهای مذکور است. همچنین با توجه به این که این دو صمغ واریانس بیش‌تری از داده‌های مربوط به پارامترهای رئولوژیکی را به خود اختصاص داده‌اند نقش موثرتر این دو صمغ به‌ویژه صمغ دانه مرو به‌عنوان صمغ بومی ایران را نسبت به کربوکسی متیل سلولز نشان می‌دهد. رضوی و همکاران بیان کردند که خواص رئولوژیکی صمغ دانه مرو به‌عنوان یک صمغ جدید به خوبی با برخی هیدروکلوئیدهای تجاری در صنعت غذا مانند گوآر و گزانتان قابل مقایسه است [۴۴].

۴. نتیجه گیری

ویژگی‌های رئولوژیکی محصولاتی مانند ماست نقش مهمی در عمل‌آوری و بازارپسندی محصول دارد. در ماست فوری شتر این ویژگی‌ها عمدتاً تحت تاثیر میزان و نوع صمغ به کار رفته در آن‌ها قرار می‌گیرد. تعیین ترکیب بهینه از صمغ‌ها در جهت کاهش میزان مصرف آن‌ها در فرمولاسیون از لحاظ اقتصادی نیز حائز اهمیت است لذا در این تحقیق، اثر کربوکسی متیل سلولز، صمغ

- [16] Sodini, I., Lucas, A., Tisier, J.P., Corrieu, G. (2005). Physical properties and microstructure of yogurts supplemented with milk protein hydrolysates. *Int. Dairy J.*, 15(1), 29–35.
- [17] Biliaderis, C.G., Khan, M.M. Blank, G. (1992). Rheological and sensory properties of yogurt from skim milk and ultrafiltered retentates. *Int. Dairy J.*, 2, 311–323.
- [18] Remeuf, F., Mohammed, S., Sodini, I., Tissier, J.P. (2003). Preliminary observations on the effects of milk fortification and heating on microstructure and physical properties of stirred yogurt. *Int. Dairy J.*, 13(9), 773–782.
- [19] El-Hatmi, H., Girardet, J., Gaillard, J., Yahyaoui, M. H. (2007). Characterisation of whey proteins of camel (*Camelus dromedarius*) milk and colostrum. *Small Rumin. Res.* 70, 267–271.
- [20] El-Agamy, E. I. (2000). Effect of heat treatment on camel milk proteins with respect to antimicrobial factors: a comparison with cows' and buffalo milk proteins. *Food Chem.*, 68, 227–232.
- [21] Al Kanhal, H. (2010). Compositional, technological and nutritional aspects of dromedary camel milk. *Int Dairy J.*, 20(12), 811–821.
- [22] Attia, H., Kherouatou, N., Dhoub, A. (2001). Dromedary milk lactic acid fermentation: microbiological and rheological characteristics. *Ind. Microbiol. Biotechnol.*, 26, 263–270
- [23] Hashim, I.B., Khalil, A.H., Habib, H. (2008). Quality and acceptability of a set type yogurt made from camel milk. *J. Dairy. Sci.*, 92, 857– 862.
- [24] Yang, X-S., Nature-Inspired Metaheuristic Algorithm, *Luniver Press*, 2008.
- [25] Yeomans, J. S. (2015). A parametric testing of the firefly algorithm in the determination of the optimal osmotic drying parameters of mushrooms. *JAISCR*, 4, 4, 257–266.
- [26] Razavi, S.M.A., Taheri, H., Sanchez. R. (2013). Viscoelastic characterization of wild sage (*Salvia macrosiphon*) seed gum, *Int. J. Food. Prop.*, 16, 1604–1619.
- [27] Chua, M., Baldwin, T.C., Hocking, T.J., Chan, K. (2010). Traditional uses and potential health benefits of *Amorphophallus konjac* K. Koch ex NE Br. *J. Ethnopharmacol.*, 128, 268–278.
- [28] Koroskenyi, B., McCarthy, S. P. (2001). Synthesis of acetylated konjac glucomannan and effect of degree of acetylation on water absorbency. *Biomacromolecules*, 2(3), 824–826.
- [29] Belitz, H. D., Grosch, W. Schieberle, P. (2009). *Food Chem.*, 4th edn, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- [30] Bostan, A., Razavi, S. M., Farhoosh, R., (2010). Optimization of hydrocolloid extraction from wild sage seed (*Salvia macrosiphon*) using response surface. *Int. J. Food Prop.*, 13(6), 1380–1392.
- [1] Tamime, Y., Robinson, R. K., Tamime and Robinson's Yoghurt 3rd Edition Science and Technology (2007). *Imprint: Woodhead Publishing*, pp 350.
- [2] Kumar, P., Mishra, H. N. (2004). Yoghurt powder—A review of process technology, storage and utilization. *Food Bioprod Process*, 82(C2), 133–142.
- [3] Dogan, M., Kayacier, A., Ic, E. (2007). Rheological characteristics of some food hydrocolloids processed with gamma irradiation. *Food Hydrocoll.*, 21(3), 392–396.
- [4] Labell, F. 1989. Yogurt cultures offer health benefits. *Food Processing* 10,133–138.
- [5] Kayacier, A., Dogan, M. (2006). Rheological properties of some gums-salep mixed solutions. *J. Food. Eng.*, 72, 261–265.
- [6] Walkenström, P., Kidman, S., Hermansson, A., Rasmussen, P.B., Hoegh, L. (2003). Microstructure and rheological behaviour of xanthan/pectin mixed gels. *Food Hydrocoll.*, 17, 593–603.
- [7] Demirkesen, I., Mert, B., Sumnu, G., Sahin, S. (2010). Rheological properties of gluten-free bread formulations. *J. Food. Eng.*, 96, 295–303.
- [8] Dolz, M., Hernandez Delegido, J., Alfaro, M.C., Munoz, J. (2007). Influence of xanthan gum and locust bean gum upon flow and thixotropic behavior of food emulsions containing modified starch. *J. Food. Eng.*, 81, 179–186.
- [9] Mandala, I., Kapetanakou, A., Kostaropoulos, A. (2008). Physical properties of breads containing hydrocolloids stored at low temperature. II. Effect of freezing. *Food Hydrocoll.*, 22, 1443– 1451.
- [10] Pedersen, J.K. (1980). Carrageenan, pectin and xanthan/locust bean gum gels. Trends in their food use. *Food Chem.*, 6, 77–88.
- [11] Ramirez, J.A., Barrera, M., Morales, O.G., Vázquez. M. (2002). Effect of xanthan and locust bean gums on the gelling properties of myofibrillar protein. *Food Hydrocoll.* 16,11–16.
- [12] Sahin, H., Ozdemir, F. (2004). Effect of some hydrocolloids on the rheological properties of different formulated ketchups. *Food Hydrocoll.* 18, 1015–1022.
- [13] Secouard, S., Malhiac, C., Grisel, M., Decroix, B. (2003). Release of limonene from polysaccharide matrices: Viscosity and synergy effect. *Food Chem.*, 82, 2227–2234.
- [14] Rohm, H. (1992). Viscosity determination of stirred yoghurt. *Lebensmittel-Wissenschaft and Technologie* 25,297–301.
- [15] Lubbers, S., Decourcelle, N., Vallet, N., Guichard, E. (2004). Flavor release and rheology behaviour of strawberry fat-free stirred yogurt during storage. *J. Agric. Food. Chem.*, 52(10), 3077–3082.

- III – Steady and dynamic shear rheology. *Food Hydrocoll.* 67, 243–251
- [47] Steffe, J.F. (1996). Rheological methods in food process engineering (pp. 17e23). East Lansing, MI: Freeman Press.
- [48] Martins, J. T., Cerqueira, M. A., Bourbon, A. I., Pinheiro, A. C., Souza, B. W. S., and Vicente, A. A. (2012). Synergistic effects between k-carrageenan and locust bean gum on physicochemical properties of edible films made thereof. *Food Hydrocoll.* 29, 280-289.
- [49] Ozer, B.H., Stenning, R., Grandison, A.S., and Robinson, R.K. (1999). Rheology and microstructure of labneh (concentrated yoghurt), *J. Dairy Sci.*, 82, 682–689.
- [50] Cocero, A.M., Kokini, J.L. (1991). The Study of the Glass Transition of Glutenin Using Small Amplitude Oscillatory Rheological Measurements and Differential Scanning Calorimetry. *J Rheol.* 35, 257–270.
- [51] Roefs, S.P.F.M., van Vliet, T., van den Bijgaart, H.J.C.M., de Groot-Mostert, A.E.A., Walstra. P. (1990) Structure of casein gels made by combined acidification and rennet action. *Neth. Milk Dairy J.* 44, 159–188.
- [52] Nolan, E.J., Holsinger, V.H., Shieh, J.J. (1989). Dynamic rheological properties of natural and imitation mozzarella cheese. *J. Texture Stud.*, 20, 179–189.
- [53] Carreau, P. J., Cotton, F., Citerne, G.P., Moan. M. (2002). Rheological properties of concentrated suspensions: Application to foodstuffs. In J Welte-Chanes G V. Barbosa-Canovas, J. M. Aguilera (Eds.), *Engineering and food for the 21st century* (pp. 327–346). Boca Raton: CRC.
- [54] Hirashima, M., Takasashi, R., Nishinari, K. (2004). Effects of citric acid on the viscoelasticity of corn starch pastes. *J. Agric. Food. Chem.*, 52, 2929–2933.
- [31] Mishra, H. N., Kumar, P. (2004). Yoghurt Powder-A Review of process technology, storage and utilization. *Institution of Chemical Engineers*, 82, 133-142.
- [32] Balaghi, S., Mohammadifar, M. A., Zargaraan, A., Ahmadi Gavlighi, H., and Mohammadi, M. (2011). Compositional analysis and rheological characterization of gum tragacanth exudates from six species of Iranian Astragalus. *Food Hydrocoll.* 25, 1775-1784.
- [33] Nardi, J.V., Acchar, W., Hotza, D. (2004). Enhancing the properties of ceramic products through mixture design and response surface analysis. *Eur. Ceram. Soc.* 24, 375
- [34] Yang, X-S., “Firefly Algorithms for Multimodal Optimization, in, Stochastic Algorithms”, Foundations and Applications, SAGA, Lecture Notes in Computer Sciences, Cambridge, UK, 5792, 2009, pp. 169-178.
- [35] Yang, X-S., “Firefly Algorithm, Stochastic Test Functions and Design Optimization”, INT J Bio-Inspir Com, Vol. 2, No. 2, 2010, pp. 78-84.
- [36] Pai, V.B., Khan, S.A. (2002). Gelation and Rheology of xanthan/ enzyme-modified guar blends. *Carbohydr Polym.*, 49, 207–216.
- [37] Heldman, D.R., Lund, D.B. (2007). Handbook of Food Engineering, 2nd edn. Pp. 12–15, 25–30, 36–40, New York, NY, USA, CRC Press.
- [38] Farahnaky, A., Askari, H., Majzoobi, M., Mesbahi, G. (2010). The impact of concentration, temperature and pH on dynamic rheology of psyllium gels. *J. Food. Eng.*, 100, 294–301.
- [39] Clark, A.H., Ross-Murphy, S.B. (1987). Structural and mechanical properties of biopolymer gels. *Adv. Polym. Sci.*, 83, 57–192.
- [40] Heldman, D.R., Lund, D.B. (2007). Handbook of Food Engineering, 2nd edn. Pp. 12–15, 25–30, 36–40, New York, NY, USA, CRC Press.
- [41] Ozer, B.H., Robinson, R.K., Grandison, A.S., Bell, A.E. (1997). Comparison of Techniques for Measuring the Rheological Properties of Labneh (Concentrated Yogurt). *Int. J. Dairy Technol.*, 50, 129–134.
- [42] Paulsson, M., Dejmek, P. (1990). Rheological Properties of Heat-Induced -lactoglobulin gels. *J. Dairy Sci.*, 73, 45–53.
- [43] Steffe, J.F. (1996). Rheological methods in food process engineering (pp. 17e23). East Lansing, MI, Freeman Press.
- [44] Razavi, S.M.A., HasanAbadi, M., Ghadiri, G.R., Salehi, E. A. (2013). Rheological interaction of sage seed gum with xanthan in dilute solution. *Food Res. Int.*, 20(6), 3111–3116.
- [45] Mandala, I., Savvas, T., and Kostaropoulos, A. (2004). Xanthan and locust bean gum influence on the rheology and structure of a white model-sauce. *J. Food Eng.*, 64, 335-342.
- [46] Naji-Tabasi, S., and Razavi, S. M. A. (2016). New studies on basil (*Ocimum bacilicum* L.) seed gum: Part

Research Article
**Effect of gums on dynamic rheology of instant camel yogurt:
Optimization using Firefly Algorithm**

Morteza Kashaninejad¹, Seyed Mohammad Ali Razavi^{2*}

1. PhD Student, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran.
2. Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran.

Abstract

In this paper, the effect of carboxyl methyl cellulose (CMC), konjac gum (KG) and sage seed gum (SSG) and their mixtures on dynamic rheological properties of the instant camel yogurt samples were investigated. Then, these properties were optimized using mixture design models and firefly algorithm. The results of the stress sweep tests for different samples showed that the elastic modulus (G') values were greater than viscous modulus (G'') indicating behavior essentially like that of solids. Results showed the synergistic effect of these three gums, especially the synergistic effect of SSG and CMC on the critical strain and the yield stress of instant camel yogurt samples. Frequency sweep test results showed that samples had a typical weak gel-like structure behavior at any given frequency and complex viscosity (η^*) had a linear correlation with frequency. SSG had the most positive effect on k' , k'' and k^* but the combination with CMC and KG could also improve this effect. All the linear terms in the predicted models for the n' , n'' and n^* parameters were insignificant ($p < 0.01$) and it was observed that each gum had an identical effect on these parameters. The optimal results of different gum percentages to achieve maximum γ_c , n' , k' , n'' , n^* , k^* and minimum G''_{LVE} using the firefly algorithm in PC space, it has been shown that the optimum amounts of KG and SSG were close to each other and had more variance of the data which shows the similarity of the effect of these two gums on the rheological parameters. Promising result of this study also showed that SSG as a novel source of hydrocolloid could act very capable and produce desirable properties in instant camel yogurt.

Keywords: Instant camel yogurt, Firefly algorithm, Sage seed gum, Konjac gum Carboxy methyl cellulose, Dynamic rheology.

* Corresponding author: s.razavi@um.ac.ir