https://journals.rifst.ac.ir
ISSN: 2252-0937(print), 2538-2357(online)
نشریه پژوهش و نوآوری در علوم و صنایع غذایی
سال ۱۴۰۱، جلد ۱۱، شماره ۲، صفحات ۱۴۰-۱۲۳
https://dx.doi.org/10.22101/JRIFST.2021.296541.1261

JRIFST
مقالۀ کامل پژوهشی

بهینه‌یابی سیستم‌های حجم‌دهندۀ روغن بر پایۀ اینولین، صمغ فارسی و آلژینات با روش سطح پاسخ

بیتا محمدعلی[۱]، اکرم آریان‌فر[۱*]، علی محمدی ثانی[۱]، سارا ناجی طبسی[۲]

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران
* نویسندۀ مسئول (a_aria_1443@yahoo.com)
۲- گروه نانوفناوری مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۹
تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۰/۱۰/۰۷

واژه‌های کلیدی
چربی کاهش‌یافته
روش اکستروژن پس‌رو
سیستم دوفازی ساختاریافته
عامل‌های حجم‌دهندۀ روغنی

OPEN ACCESS
CC BY

چکیده

امروزه صنعت تولید غذا در جستجوی روش‌های نوین برای کاهش سطح اسیدهای چرب اشباع و ترانس مواد غذایی فراوری‌شده و تولید جایگزین مناسب چربی برای محصولات پرچرب است که ضمن تأمین تمام یا برخی از خواص کاربردی چربی‌ها فواید سلامتی‌بخش نیز داشته باشد. در این تحقیق از روغن‌کنجد در ماتریس‌های ژل‌مانند جهت تولید عامل‌های روغنی حجم‌دهنده بر پایۀ اینولین در سه سطح (۰/۵ تا ۱/۵ درصد)، صمغ فارسی (۱ تا ۲/۵ درصد) و آلژینات نیز در سه سطح (۰/۵ تا ۱ درصد) به‌عنوان راهکار جدیدی برای بهبود محتوای چربی محصولات غذایی عمل‌گرا استفاده شد. درصد مهاجرت روغن، پایداری حرارتی، پارامترهای رنگ از قبیل L^*، a^* و b^* و همچنین ویژگی‌های رئولوژیکی از قبیل سختی، چسبندگی، قوام و نیروی چسبندگی ماتریس‌های حجیم روغنی تولیدشده بررسی گردید. سیستم ساختاریافتۀ دوفازی به روش سطح پاسخ با پاسخ‌های سه متغیر در بیشترین پایداری حرارتی، کمترین درصد مهاجرت روغن، بهترین رنگ و ویژگی‌های بافتی مطلوب بهینه‌سازی شد و مقادیر بهینه در غلظت‌های درصدی (۱/۳۲) از صمغ فارسی، (۱/۵) اینولین و (۰/۹۶) آلژینات سدیم به‌دست‌آمد. در بررسی مدل رگرسیونی، سختی، قوام، روشنایی و زردی رنگ با ضریب تبیین بالای ۸۵ درصد برازش خوبی از مدل نسبت به داده‌های آزمایشی نشان دادند.

مقدمه

امروزه مصرف‌کنندگان موادغذایی به میزان قابل‌توجهی نگران بیماری‌های قلبی-عروقی و دیگر اثرات نامطلوب ناشی از رژیم غذایی حاوی چربی بالا هستند و سعی در کاهش میزان چربی در رژیم خود دارند (Limpimwong *et al.*, 2017; Mert & Demirkesen, 2016a). ازطرفی نتایج نامطلوب استفاده از چربی‌ها ازنظر سلامتی و بهداشت، سازمان‌های نظارتی را واداشت تا با ایجاد قوانینی تولید چربی‌های ترانس برای استفاده در موارد صنعتی را به حداقل رساننده و در مدت زمان محدود تعیین‌شده، حذف این مواد را در غذاهای فراوری‌شده در دستور کار خود قرار دهند (O'Sullivan *et al.*, 2016; Pehlivanoglu *et al.*, 2018). این قوانین به‌صورت یک نیروی محرکه در صنعت غذا منجربه طغیان یک روند روبه‌رشدی جهت تولید محصولات جدید و سالم شد که نتیجۀ آن کشف روش‌های نوین برای کاهش سطح اسیدهای چرب اشباع و ترانس در مواد غذایی و جایگزینی روغن در غذاهای فراوری با چربی زیاد بود (Kim *et al.*, 2017; Pehlivanoğlu *et al.*, 2018). به‌همین‌منظور تاکنون مطالعه‌هایی روی جایگزین‌های چربی[1] با ساختارهای مختلف ازجمله کربوهیدرات،

[1] Fat replacer

پروتئین و چربی صورت‌گرفته است (Bemiller, 2010; Stortz *et al.*, 2012; Martins *et al.*, 2017). این جایگزین‌ها ترکیباتی هستند که تأمین‌کنندهٔ تمام یا برخی از خواص چربی‌ها هستند درحالی‌که کالری کمتری از چربی ایجاد می‌کنند (Tan *et al.*, 2017) و موردتأیید سازمان غذا و داروی آمریکا (FDA[1]) نیز می‌باشد. تهیهٔ امولسیون‌های ساختاریافته از ارگانوژل‌ها، راهکار جدیدی برای بهبود محتوای چربی و تولید محصولات کم‌چرب است. ارگانوژل‌ها شبکهٔ ژلی حاوی مولکول‌های ایجادکنندهٔ ژل هستند که حلال‌های آلی مانند بنزن، هگزان یا روغن‌های مایع خوراکی را ازطریق واکنش‌های بین‌زنجیری مانند پیوندهای هیدروژنی و واندروالسی درون‌شبکه به‌دام‌می‌اندازند (Cerqueira *et al.*, 2017; Martins *et al.*, 2016; Panagiotopoulou *et al.*, 2016). در صنعت غذا به روغن‌های ساختاریافته، اولئوژل گفته می‌شود (Dassanayake *et al.*, 2011). در سال‌های اخیر باتوجه‌به افزایش کاربرد روغن‌های ساختاریافته، سیستم‌های منحصربه‌فرد ساختاردهی روغن نیز توسعه یافته‌اند. این استراتژی‌های جدید به‌طور گسترده‌ای براساس الزام‌های فرایندی به ۴ گروه اصلی پراکندگی مستقیم[2]، ساختاریافتهٔ غیرمستقیم[3]، جذب روغن[4] و سیستم‌های دوفازی[5] طبقه‌بندی می‌شوند. اولئوژلاتورهای پخش مستقیم اولین سیستم‌های ساختاریافتهٔ روغن بودند که بررسی شدند. همان‌طوری‌که از نام آنها پیداست، می‌توانند به صورت‌مستقیم در فاز روغن گنجانده شوند (Patel & Dewettinck, 2016). تهیهٔ روغن‌های ساختاریافته به روش مستقیم، نیازمند درجه‌حرارت بالاست که باتوجه‌به ژل‌سازهای کاربردی حرارت‌دهی متفاوت خواهد بود (BaratianGhorghi *et al.*, 2022). حرارت به‌کاررفته باعث اکسیداسیون و ازبین‌رفتن یا کاهش مواد مغذی موجود در روغن می‌شود. به‌این‌علت محققان به‌دنبال روش‌هایی هستند تا مرحلهٔ حرارت‌دهی حذف و کیفیت روغن حفظ شود تا بتوان از این روغن ژل‌شده بدون محدودیت در فرمولاسیون مواد غذایی مختلف استفاده کرد (Patel, 2014; Cludts, *et al.*, 2014). سیستم‌های دوفازی ساختاریافته که طیف وسیع‌تری را شامل می‌شوند خود به سه گروه امولسیون‌های ساختاریافته[6]، امولسیون‌های ژله‌ای[7] و سیستم‌های حجم‌دهندهٔ روغن[8] طبقه‌بندی می‌شوند (Patel & Dewettinck, 2016). سیستم‌های حجم‌دهندهٔ روغن روش جایگزین دیگری برای ایجاد یک سیستم دوفازی ساختاریافته مبتنی بر حجم‌دهی روغن است. این روش پراکنده‌کردن و به‌دام‌انداختن قطره‌های روغن در یک ماتریس هیدروژل (فاز آبی ژل‌شده با استفاده از هیدروکلوئیدها) است که منجربه تشکیل عامل‌های حجم‌دهندهٔ روغن[9] می‌شود (Patel & Dewettinck, 2016). هیدروکلوئیدهایی از قبیل گلوکومانان کنجاک[10] و آلژینات‌ها در ترکیب با اینولین و دکسترین برای سیستم‌های ساختاریافته حاوی روغن‌های سالم مانند ماهی، دانهٔ کتان و روغن‌زیتون آزمایش شده‌اند. این فناوری شامل پراکندگی روغن مایع در فاز آبی و به‌دنبال آن ژل‌شدن فاز پیوستهٔ آبی است. سیستم‌های حجم‌دهندهٔ روغن با امولسیون معمولی آب متفاوت هستند زیرا هیچ امولسیفایری برای تهیهٔ آنها استفاده نمی‌شود. ثبات سیستم به‌طورکامل به‌دلیل به‌دام‌افتادن فیزیکی فاز روغن در ماتریس ژله‌ای فاز آبی است. در واقع در این سیستم‌ها، قطره‌های پراکندهٔ روغن در ماتریس فاز آبی ژل‌شده با استفاده از شبکهٔ پلیمرها جاسازی شده‌اند (Patel & Dewettinck, 2016). درنهایت عامل‌های حجم‌دهندهٔ روغن تولیدشده می‌توانند به‌عنوان جایگزین چربی در محصولات غذایی عمل‌گرا به‌کار روند (Herrero *et al.*, 2014; Ruiz-Capillas *et al.*, 2013). باتوجه‌به مزایای این سیستم‌های ساختاریافته ازلحاظ بهبود خواص تغذیه‌ای و کاهش میزان اسیدهای چرب اشباع، امروزه کاربرد روغن‌های ساختاریافته به‌عنوان جایگزین چربی در فرمولاسیون محصولات گوناگون افزایش یافته است (Patel & Dewettinck, 2016). درمورد سیستم‌های مختلف تهیهٔ

[1] Food and drug administration
[2] Direct dispersion
[3] Indirect structuring
[4] Oil sorption
[5] Biphasic system
[6] Structured emulsions
[7] Gelled emulsions
[8] Oil bulking systems
[9] Oil bulking agents
[10] Konjac glucomannan

روغن‌های ساختاریافته در فرمولاسیون و تثبیت فراورده‌های گوشتی تازه، پخته‌شده و سوسیس (Zetzl *et al.*, 2012)، سس‌ها، شکلات و خمیر شکلات (Patel, Rajarethinem, *et al.*, 2014)، اسپرید و مارگارین (Patel, Rajarethinem, *et al.*, 2014; Yılmaz & Öğütcü, 2015)، نان، محصولات خمیری و فراورده‌های پختی (Jang *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2017; Mert & Demirkesen, 2016a, 2016b; Patel, Rajarethinem, *et al.*, 2014)، پنیر خامه‌ای (Bemer *et al.*, 2016)، بستنی (Zulim Botega *et al.*, 2013) و خامه (Naji-Tabasi *et al.*, 2020) تحقیق‌های گسترده‌ای انجام شده است. در سیستم‌های ساختاریافتۀ مورد استفاده در صنعت غذا به ترکیبات ژل‌کننده‌ای نیاز است که توانایی ایجاد شبکۀ سه‌بُعدی برای به‌دام‌انداختن روغن‌های خوراکی را داشته باشند. هیدروکلوئیدها یا صمغ‌ها می‌توانند این نقش را ایفا کنند (Asgari Verjan *et al.*, 2018; Souhan Agini *et al.*, 2017). آنها بیوپلیمرهای هیدروفیلیک با وزن مولکولی بالا می‌باشند (Golkar *et al.*, 2016; Jabbari Izadi & Motamedzadegan, 2013). دردسترس‌بودن، دارابودن درجۀ غذایی و خصوصیات حرارتی برگشت‌پذیر[1] در غلظت‌های پایین ازجمله امتیازهای هیدروکلوئیدهاست (Leal-Calderon *et al.*, 2007). ایران ازجملۀ تولیدکنندگان برخی صمغ‌های گیاهی مانند صمغ کتیرا و صمغ فارسی در جهان است. کاربرد صمغ فارسی به‌دلیل طبیعی‌بودن، اطمینان از بازار تأمین، توجیه اقتصادی و بومی‌بودن در صنایع غذایی امکان‌پذیر است. ازاین‌رو، بررسی ویژگی‌های امولسیون‌کنندگی این صمغ در محدودۀ وسیعی از سیستم‌های امولسیون غذایی توصیه می‌شود (Golkar *et al.*, 2016; Rahimi & Abbasi, 2014).

صمغ فارسی، صمغی ترشحی شفافی است که از درخت بادامک، گونه‌ای از بادام‌کوهی با نام علمی *آمیگدالوس اسکوپاریا*[2] به‌دست می‌آید و به آن صمغ زدو[3]، صمغ شیرازی یا صمغ آنگوم[4] می‌گویند که کاربردهای تغذیه‌ای تغذیه‌ای و دارویی همچون محرک اشتها، خردکنندۀ سنگ مثانه دارد (Mozafari *et al.*, 2015; Rahimi & Abbasi, 2014). پلی‌ساکاریدها به‌صورت جداگانه یا در ترکیب با هم می‌توانند برای ایجاد ساختارهای ژلی گوناگون که مناسب به‌دام‌انداختن قطره‌های روغن هستند، استفاده شوند و به‌عنوان عامل‌های حجم‌دهندۀ روغن عمل نمایند (Ruiz-Capillas *et al.*, 2013). خواص پلی‌ساکاریدهایی که به‌عنوان عامل‌های حجم‌دهنده در سیستم‌های ساختاریافته به‌کار می‌روند با مخلوط‌کردن آنها با سایر بیوپلیمرها بهبود می‌یابد. اینولین به‌عنوان یک پلی‌ساکارید دارای فواید سلامتی‌بخش و خواص تکنولوژیکی بسیار جالب مانند شیرین‌کنندۀ کم‌کالری، عامل حجم‌دهنده و جایگزین چربی، توانایی برهمکنش با آب و جذب‌کنندۀ آب، پایدارکنندۀ کف و امولسیون و همچنین احساس دهانی چرب در محصولات جایگزین چربی می‌باشد که به‌عنوان عامل بافت‌دهنده به‌کار می‌رود. برخی محققان گزارش نمودند که ژل اینولین شبیه بافت چربی‌های جامد است و می‌تواند به‌عنوان مقلدهای چربی در محصولات غذایی مورد استفاده قرار گیرد (Bot *et al.*, 2004). پلی‌ساکاریدهایی همچون آلژینات، صمغ‌ها، دکسترین، الیگوساکاریدها[5]، آگار، نشاسته و موم‌ها نیز می‌توانند به‌عنوان عامل‌های حجم‌دهنده در تولید ژل به‌کار روند. خواص این ماتریس‌ها به روغنی که ژل‌های پلی‌ساکاریدی آن را دربرگرفته و تعامل‌های پیچیدۀ بین آنها بستگی دارد (Herrero *et al.*, 2014).

به‌طورکلی هدف از این پژوهش تولید ماتریس‌های حجم‌دهندۀ روغن بر پایۀ پلی‌ساکاریدهای اینولین، صمغ فارسی و آلژینات سدیم و حاوی روغن‌کنجد و ارزیابی ماتریس‌های حجیم روغن تولیدشده ازلحاظ درصد مهاجرت روغن، پایداری حرارتی، رنگ و تعیین پارامترهای بافت از قبیل سختی، قوام، چسبندگی، نیروی چسبندگی، ارائۀ مدل رگرسیونی مناسب و درنهایت انتخاب نمونۀ بهینه که دارای بیشترین پایداری حرارتی، کمترین نشت روغن، رنگ و خواص بافتی قابل‌قبول باشد چراکه اینها دلایلی هستند که می‌توان

[1] Thermoriversible
[2] *Amygdalus scoparia*
[3] Zedo gum
[4] Angum gum
[5] Oligosaccharides

ماتریس حجیم روغنی بهینه را به‌عنوان جایگزین چربی در محصولات عمل‌گرا استفاده کرد.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه

پودر سدیم آلژینات خوراکی از شرکت بازرگانی امید (تهران، ساخت ایران)، اینولین از شرکت حلمی نمایندگی Beneo (تهران، ساخت ایران)، صمغ فارسی از شرکت دانش بنیان طعم و رنگ فریر (اصفهان، ساخت ایران) و روغن‌کنجد پیک (شرکت صنایع غذایی گلدانه ماهدشت کرج، ساخت ایران) از هایپر مارکت خریداری شدند. سایر مواد شیمیایی موردنیاز پژوهش از شرکت سیگما آلدریچ و مرک با درجهٔ آزمایشگاهی تهیه شد.

جدول ۱- متغیرهای مستقل فرایند و مقادیر آنها

متغیرهای مستقل	نماد ریاضی	سطوح متغیرها		
		+۱	۰	-۱
درصد صمغ فارسی	X_1	۲/۵	۱/۷۵	۱
درصد اینولین	X_2	۱/۵	۱	۰/۵
درصد آلژینات	X_3	۱	۰/۷۵	۰/۵

درصد متغیرهای مستقل در حجم کل محلول می‌باشد.

آماده‌سازی مخلوط‌های پلی‌ساکاریدی

برای تهیهٔ ۵۰ گرم نمونهٔ ژل از روش Herrero و همکاران (۲۰۱۴)، درصدهای موردنظر اینولین مطابق با جدول (۱) توزین و در داخل بشر به آب دیونیزهٔ موردنیاز اضافه شدند. بشر داخل حمام آبی قرار داده شد تا دمای محلول به ۱±۴۵ درجهٔ سانتی‌گراد رسانده‌شده و محلول شفافی به‌دست آید. آنگاه محلول روی همزن مغناطیسی هیتردار (مدل IKA، ساخت آلمان) قرار داده شد تا اینولین به‌طورکامل حل گردد. مقدار موردنظر از صمغ فارسی و آلژینات سدیم مطابق با جدول (۱) توزین و با هم مخلوط گردید و به آرامی روی همزن به محلول اینولین افزوده شد. به‌منظور آب‌گیری کامل محلول حدود ۲ ساعت به‌طور یکنواخت و به آرامی روی همزن در دمای محیط (۲۶ درجهٔ سانتی‌گراد) هم‌زده شد. به‌منظور تکمیل فرایند آب‌گیری تمام محلول‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای یخچال نگهداری شدند. بعد از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از یخچال خارج شدند. نمک کلسیم و سدیم پیرو فسفات به میزان ۰/۱ درصد برای تکمیل فرایند تولید ژل به آنها افزوده شد. مخلوط با ۱۵۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۲۰ ثانیه همگن شد. سپس روغن‌کنجد به میزان ۴۰ درصد به‌تدریج به این مخلوط درحین‌کار هموژنایزر (اولتراتوراکس تی ۲۵، شرکت IKA، ساخت آلمان) با ۱۵۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۲ دقیقه افزوده شد. ژل‌های آماده در قالب‌های ۱۰۰ گرمی ریخته شدند و برای جلوگیری از تشکیل حباب‌های هوا، گوی‌های فلزی کوچکی روی سطح آنها قرار گرفتند. نمونه‌های آماده‌شده به مدت ۲۴ ساعت در یخچال و در دمای ۱±۳ درجهٔ سانتی‌گراد قرار گرفتند تا آزمایش‌های مربوطه روی آنها انجام پذیرد (Herrero *et al.*, 2014).

بهینه‌سازی

به‌منظور تهیهٔ عوامل حجم‌دهندهٔ روغن بر پایهٔ اینولین، صمغ فارسی و آلژینات، روغن‌کنجد در درصد ثابت ۴۰ و اینولین، صمغ فارسی و آلژینات در سه سطح مطابق جدول (۱) با نرم‌افزار مینی‌تب[1] نسخهٔ ۱۸ و با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM[2]) طراحی شدند. با استفاده از طراحی سطح پاسخ نرم‌افزار مینی‌تب، ۲۰ تیمار مختلف براساس سطوح متغیرهای موردبررسی مطابق جدول (۲) مشخص شدند. پس از انجام آزمون‌های موردنظر روی نمونه‌های تولیدشده به‌منظور دستیابی به سطوحی از متغیرهای مستقل که درنتیجهٔ به‌کارگیری آنها بهترین فرمولاسیون ازلحاظ بیشترین پایداری حرارتی، ثبات امولسیون و بهترین رنگ و بافت به‌عنوان پاسخ، بهینه‌سازی انجام شد. شرایط بهینهٔ متغیرهای مستقل براساس هدف بیشینه یا کمینه مقدار متغیر پاسخ تعیین شد.

[1] Minitab
[2] Response surface methodology

جدول ۲- طراحی آزمایش‌ها

	Stdorder	Runorder	PtType	Blocks	X_1	X_2	X_3
۱	۴	۱	۱	۱	۲/۵۰	۱/۵	۰/۵۰
۲	۲	۲	۱	۱	۲/۵۰	۰/۵	۰/۵۰
۳	۱۹	۳	۰	۱	۱/۷۵	۱/۰	۰/۷۵
۴	۹	۴	-۱	۱	۱/۰۰	۱/۰	۰/۷۵
۵	۶	۵	۱	۱	۲/۵۰	۰/۵	۱/۰۰
۶	۷	۶	۱	۱	۱/۰۰	۱/۵	۱/۰۰
۷	۳	۷	۱	۱	۱/۰۰	۱/۵	۰/۵۰
۸	۵	۸	۱	۱	۱/۰۰	۰/۵	۱/۰۰
۹	۱۷	۹	۰	۱	۱/۷۵	۱/۰	۰/۷۵
۱۰	۱۶	۱۰	۰	۱	۱/۷۵	۱/۰	۰/۷۵
۱۱	۱۴	۱۱	-۱	۱	۱/۷۵	۱/۰	۱/۰۰
۱۲	۲۰	۱۲	۰	۱	۱/۷۵	۱/۰	۰/۷۵
۱۳	۱۲	۱۳	-۱	۱	۱/۷۵	۱/۵	۰/۷۵
۱۴	۱۰	۱۴	-۱	۱	۲/۵۰	۱/۰	۰/۷۵
۱۵	۱۳	۱۵	-۱	۱	۱/۷۵	۱/۰	۰/۵۰
۱۶	۸	۱۶	۱	۱	۲/۵۰	۱/۵	۱/۰۰
۱۷	۱۸	۱۷	۰	۱	۱/۷۵	۱/۰	۰/۷۵
۱۸	۱۵	۱۸	۰	۱	۱/۷۵	۱/۰	۰/۷۵
۱۹	۱۱	۱۹	-۱	۱	۱/۷۵	۰/۵	۰/۷۵
۲۰	۱	۲۰	۱	۱	۱/۰۰	۰/۵	۰/۵۰

Stdorder: ترتیب تصادفی آزمایش‌ها، Runorder: ترتیب انجام آزمایش‌ها، PtType: نوع نقطه در طرح آزمایش‌ها؛ نقاط مرکزی با صفر، نقاط گوشه‌ای با ۱+ و نقاط محوری با ۱-، Blocks: بلوک‌های آزمایش، و X_1، X_2 و X_3 به‌ترتیب درصدهای صمغ فارسی، اینولین و آلژینات در کل محلول می‌باشند.

ارزیابی ماتریس‌های حجم‌دهندهٔ روغن

تعیین درصد مهاجرت روغن

به‌منظور ارزیابی ژل‌های تولیدشده، پایداری سیستم دوفازی ساختاریافته بایستی موردبررسی قرار گیرد. به‌این‌منظور مطابق روش Yılmaz و Öğütcü (۲۰۱۴) حدود ۱۵ گرم از هر نمونه در لوله‌های فالکون (با وزن a) ریخته شد و حدود ۱ ساعت در دمای محیط ۱±۲۴ درجهٔ سانتی‌گراد قرار داده شد و دوباره توزین گردید (b). آنگاه به مدت ۲۰ دقیقه در سانتریفیوژ (مدل Digicon21، شرکت Orto Alresa، ساخت اسپانیا) با ۶۰۰۰ دور بر دقیقه قرار داده شد و بعد از ۵۰ دقیقه استراحت‌دادن به نمونه‌ها، روغن جداشده از ماتریس به داخل ظرف منتقل و مجدد لوله به‌همراه نمونه توزین گردید (c). درصد مهاجرت روغن از رابطهٔ (۱) به‌دست‌آمد:

رابطهٔ (۱)

$$\text{روغن خارج‌شده} = [(b - a) - (c - a)]/(b - a) \times 100$$

تعیین پایداری حرارتی

پایداری حرارتی مطابق روش Herrero و همکاران (۲۰۱۴) تعیین شد. به‌این‌صورت‌که حدود ۱۰ گرم نمونه در داخل لوله‌های فالکون توزین گردید. سپس لوله‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۸۰ درجهٔ سانتی‌گراد در داخل بن‌ماری قرار داده شدند. آنگاه به مدت ۲۰ دقیقه در سانتریفیوژ با ۶۰۰۰ دور بر دقیقه قرار داده شدند و بعد از ۵۰ دقیقه استراحت‌دادن به نمونه‌ها، روغن آنها جداشده و بعد از توزین مجدد، پایداری ماتریس‌های تولیدی برحسب درصد وزن نمونهٔ اولیه بیان گردید (Herrero *et al.*, 2014).

رنگ

رنگ یکی از شاخص‌های مهم در کیفیت، کنترل سریع طی فرایند و زمان نگهداری نمونه‌های تولیدشده می‌باشد. رنگ عوامل حجم‌دهندهٔ روغنی تولیدشده، با دستگاه رنگ‌سنج (مدل WF-30، شرکت IWAVE، ساخت چین) ارزیابی شد. برای بررسی میزان تغییرات ایجادشده در ویژگی‌های رنگی، از اصطلاح پارامترها یا شاخص‌های رنگی استفاده می‌شود. در این سیستم شاخص L^* که نشان‌دهندهٔ روشنایی (سفیدی یا سیاهی) و بین صفر تا ۱۰۰ متغیر است، a^* (از سبز تا قرمز) و b^* درجهٔ آبی یا زردبودن را نشان می‌دهند و بین ۱۲۰- تا ۱۲۰+ متغیر هستند و c شاخص کروما[1] و زاویهٔ هیو[2] که از پارامترهای رنگی فوق به‌دست می‌آیند، اندازه‌گیری شدند. شاخص کروما نشان‌دهندهٔ میزان اشباع‌شدگی و یا شدت رنگ است که براساس رابطهٔ (۲) به‌دست می‌آید:

رابطهٔ (۲)

$$\text{شاخص کروما} = (a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}}$$

همچنین زاویهٔ هیو شاخصی از رنگ مادهٔ غذایی است که زاویهٔ صفر یا ۳۶۰ درجه نمایانگر رنگ قرمز و زاویه‌های ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ رنگ‌های زرد، سبز و آبی می‌باشد (رابطهٔ ۳).

[1] Choroma
[2] Hue angel

رابطهٔ (۳)

$زاویهٔ هیو=\tan^{-1}[b/a]$

تعیین پارامترهای بافت‌سنجی

سفتی نمونه‌های تولیدشده با دستگاه آنالیز بافت (مدل PA-xt-plus، Stable-Microsyst، ساخت انگلستان) و با پروب صفحه‌ای با قطر ۴۰ میلی‌متری انجام شد. ازآنجاکه تست اکستروژن پس‌رو[1] برای ارزیابی بافت غذاهای نیمه‌جامد مناسب است (Giacintucci *et al.*, 2018) از این آزمون برای مقایسهٔ بافت نمونه‌ها استفاده گردید. در این آزمایش نمونه‌های تولیدشده که در یخچال نگهداری شدند برای مدت کوتاهی جهت هم‌دمایی با محیط (دمای آزمایشگاه ۱±۲۴ درجهٔ سانتی‌گراد) خارج از یخچال قرار داده شد و سپس در ظروف استوانه‌ای شیشه‌ای مشابه، مخصوص دستگاه با ارتفاع ۷۵ میلی‌متر و قطر ۴۵ میلی‌متر تا ارتفاع یکسان ریخته شدند. پروب با سرعت ۱ میلی‌متر بر ثانیه حرکت کرد و تا ۵۰ درصد ارتفاع نمونه مسیر را پیمود. قوام[2] (گرم×ثانیه)، سختی[3] (گرم)، نیروی چسبندگی[4] (گرم)، چسبندگی[5] (گرم×ثانیه) از نتایج آزمون به‌دست‌آمد. قوام، شاخصی برای تعیین پایداری ژل‌ها طی نگهداری که سطح زیر منحنی نیرو-زمان در ناحیهٔ مثبت نمودار می‌باشد. سختی، بالاترین نقطه در نمودار نیرو-زمان می‌باشد که می‌تواند برحسب نیوتن بر گرم بیان شود. نیروی چسبندگی، نیروی لازم برای جداشدن پروب از نمونه و یا بیشترین نیروی منفی تولیدشده در طول برگشت و خارج‌شدن پروب از ظرف اندازه‌گیری می‌باشد (نقطهٔ حداقل نمودار). چسبندگی مساحت ناحیهٔ منفی نمودار نمادی از انسجام بافت محصول است (Bourne, 1978; Trinh & Glasgow, 2012).

آنالیز آماری

در این پژوهش آنالیز آماری و تجزیه‌وتحلیل داده‌های مربوطه با استفاده از روش سطح پاسخ براساس طرح مرکب مرکزی[6] با کمک نرم‌افزار مینی‌تب صورت گرفت. ۶ تکرار نقطهٔ مرکزی برای تخمین خطای آزمایش و محاسبهٔ تکرارپذیری استفاده شدند. براساس آنالیزها برای هرکدام از پاسخ‌های موردارزیابی نیز یک مدل چندمتغیره برای پیش‌بینی اثر متغیرها تعریف شد. به‌منظور ارزیابی صحت مدل‌های برازش‌یافته، آزمون ضعف برازش، مقدار ضریب تغییرات، ضرایب تبیین و ارزش P در سطح معنی‌داری ۵ درصد تعیین شدند. آزمون F نیز جهت تأیید واریانس به‌دست‌آمده از مدل رگرسیونی با ارزیابی معنی‌داری آن در سطح ۵ درصد نسبت به واریانس باقی‌مانده و همچنین برای تعیین عدم برازش مدل (خطای مدل) مورد استفاده قرار گرفت. رابطهٔ مدل و تعیین شرایط عملیاتی بهینه به‌وسیلهٔ نمودارهای سطح پاسخ انجام پذیرفت. درنهایت شرایط عملیاتی بهینه با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی عددی جستجو شد. با استفاده از تکنیک ذکرشده فضای پاسخ با استفاده از مدل‌های ایجادشده به‌منظور یافتن بهترین شرایطی که اهداف بهینه‌سازی موردنظر را برآورده کند، جستجو شد.

نتایج و بحث

درصد مهاجرت روغن

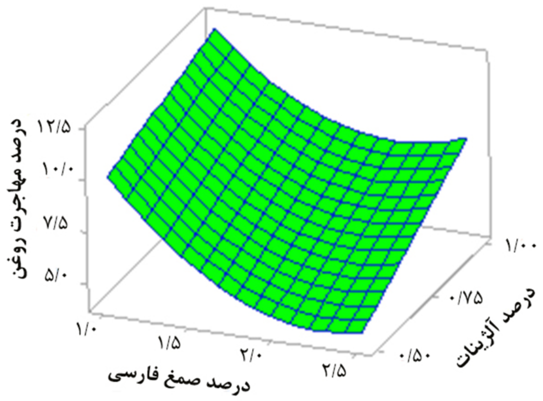
درصد مهاجرت روغن یا نشت روغن[7] یکی از پارامترهای فیزیکوشیمیایی مهم در اولئوژل‌هاست. شکل (۱)، تأثیر غلظت پلی‌ساکاریدها را بر نشت روغن در شرایطی که اینولین در نقطهٔ مرکزی ۱ درصد ثابت نگه‌داشته شده است، نشان می‌دهد. به‌صورت یک روند عمومی در تمامی غلظت‌های آلژینات سدیم با افزایش مقدار صمغ فارسی از ۱ تا ۲/۵ درصد وزنی-وزنی میزان نشت روغن کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که کمترین درصد مهاجرت روغن مربوط به نمونه‌ای با بیشترین درصد صمغ فارسی و کمترن مقدار آلژینات است. در تولید عامل‌های حجم‌دهندهٔ روغن، ذرات کوچک روغن در داخل ساختار نهایی این عوامل پراکنده‌شده و به روغن ساختاریافتهٔ جامد تبدیل شدند. هرچه ساختار شبکه دارای استحکام بیشتری باشد، روغن در داخل این شبکه پایدارتر خواهد بود و نشت کمتری خواهد داشت. در غلظت‌های بیشتری از صمغ فارسی، فضای بیشتری بین قطره‌های روغن‌مایع توسط صمغ اشغال شد و ویسکوزیتهٔ فاز آبی (فاز

---

[1] Back-Extrusion
[2] Consistency
[3] Firmness
[4] Adhesive Force
[5] Cohesiveness (g.s)
[6] Central composit design(CCD)

[7] Oil loss (%)

پیوسته) افزایش یافت که باعث محدودیت حرکت قطره‌های روغن و عدم پیوستگی آن شد.



شکل ۱- نمودار سطح پاسخ درصد مهاجرت روغن

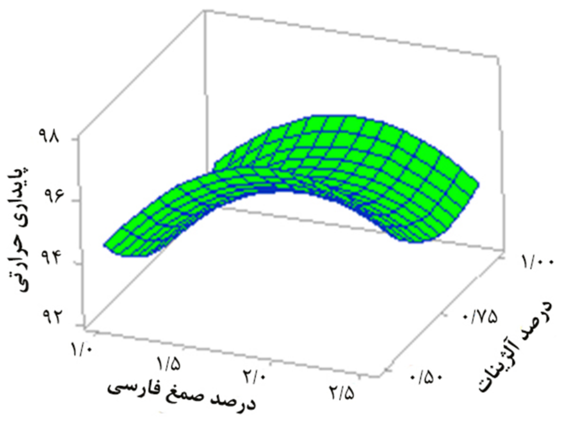
Meng و همکاران (۲۰۱۸a) در مطالعه‌ای بر تشکیل روغن‌های ساختاریافته بر پایۀ سیستم امولسیونی بیان کردند که افزایش غلظت هیدروکسی‌پروپیل متیل‌سلولز (HPMC[1])، باعث افزایش میزان نگهداری روغن در ساختار اولئوژل شد به‌طوری‌که بیشترین نشت روغن در اولئوژل با حداقل غلظت HPMC (۰/۲ درصد وزنی)، حدود ۱۸ درصد گزارش شد، درحالی‌که نشت روغن در اولئوژل با ۱ درصد وزنی HPMC حدود ۸ درصد بود (Meng *et al.*, 2018a). آنها در مطالعۀ دیگری که اثر ویسکوزیته‌های مختلف HPMC و MC[2] بر میزان نشت روغن را بررسی می‌کردند، نتیجه گرفتند اولئوژل‌های حاصل از ویسکوزیتۀ بیشتر HPMC و MC توانایی بیشتری در نگهداری روغن داشتند چرا که با افزایش ویسکوزیتۀ فاز پیوسته، حرکت قطره‌های روغن محدودشده و پدیدۀ پیوستگی در امولسیون سپس اولئوژل تولیدی رخ نداد (Meng *et al.*, 2018b). این مورد را می‌توان از نتایج قوام و سختی ساختار در آزمون اکستروژن پس‌رو نیز تعریف کرد (به نتایج ویژگی‌های بافت شکل‌های ۶ الی ۹ در همین مقاله مراجعه شود). تیماری که سختی و قوام بیشتر یا استحکام بیشتری داشت میزان نشت روغن کمتری نیز داشت. نمونه با ۲/۵ درصد وزنی-وزنی صمغ فارسی و ۰/۵ درصد وزنی-وزنی آلژینات سدیم به‌دلیل ساختار قوی عوامل حجم‌دهندۀ روغن ایجادشده، توانایی بیشتری در به‌دام‌انداختن روغن درون شبکۀ سه‌بُعدی و در واقع بهترین ظرفیت اتصال روغن‌مایع را داشت. باتوجه‌به نتایج می‌توان دریافت که با افزایش صمغ فارسی از ۱ به ۲/۵ درصد وزنی-وزنی میزان نشت روغن (درصد مهاجرت روغن) کاهش می‌یابد. همچنین حضور صمغ فارسی در نسبت مناسب با آلژینات سدیم باعث ایجاد امولسیون با ثبات‌تر و با استحکام مکانیکی بالاترشده و ساختارهایی با شبکۀ فشرده‌تر ایجاد می‌کند. استحکام مکانیکی عوامل حجم‌دهندۀ تولیدشده به ظرفیت اتصال روغن در نمونه مرتبط است و مقاومت مکانیکی بالاتر منجربه ظرفیت اتصال روغن بهتر است. کمترین پایداری و بیشترین میزان نشت روغن (درصد مهاجرت روغن) در نمونه‌ای با کمترین میزان صمغ فارسی به‌دست‌آمد.

پایداری حرارتی

شکل (۲) تأثیر غلظت پلی‌ساکاریدها را بر پایداری حرارتی در شرایطی که اینولین در نقطۀ مرکزی ۱ درصد ثابت نگه‌داشته شده است، نشان می‌دهد. به‌صورت یک روند عمومی در تمامی غلظت‌های آلژینات سدیم با افزایش مقدار صمغ فارسی از ۱ تا حدود ۲ درصد وزنی-وزنی میزان پایداری حرارتی روند افزایشی و از ۲ تا ۲/۵ درصد وزنی-وزنی صمغ فارسی این روند کاهشی بود. باتوجه‌به نتایج با اعمال حرارت ۸۰ درجۀ سانتی‌گراد، درصد مهاجرت روغن (نشت روغن) نیز افزایش پیدا کرد. افزایش دما و شوک حرارتی می‌تواند منجربه شکستن ساختاری مولکول‌ها، افزایش آزادی و تحرک مولکول‌ها، جاری‌شدن آنها و درنتیجه کاهش گرانروی و متعاقب آن کاهش پایداری امولسیون شود که با این کاهش پایداری، درصد نشت روغن نیز افزایش یافت (Marangoni & Edmund Daniel, 2012). ازآنجاکه توانایی تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین پلی‌ساکاریدها به شدت تحت‌تأثیر شرایط دمایی مورد استفاده طی ۲۴ ساعت ابتدایی تشکیل ژل است (Davidovich-Pinhas *et al.*, 2015; Soltanizadeh & Goli, 2019) و باتوجه‌به اینکه در طی ۲۴ ساعت ابتدایی تشکیل ژل شرایط در تمام نمونه‌ها یکسان بود، بنابراین با اعمال حرارت بعد از تشکیل ژل برخی از پیوندهای هیدروژنی از هم گسسته شده و با کاهش قدرت شبکۀ ژلی باعث به جریان

---
[1] Hydroxypropyl methylcellulose
[2] Methylcellulose

درآمدن ماتریس‌ها شدند. البته تفاوت بین تیمارها معنی‌دار نبود ($P≥۰/۰۵$).

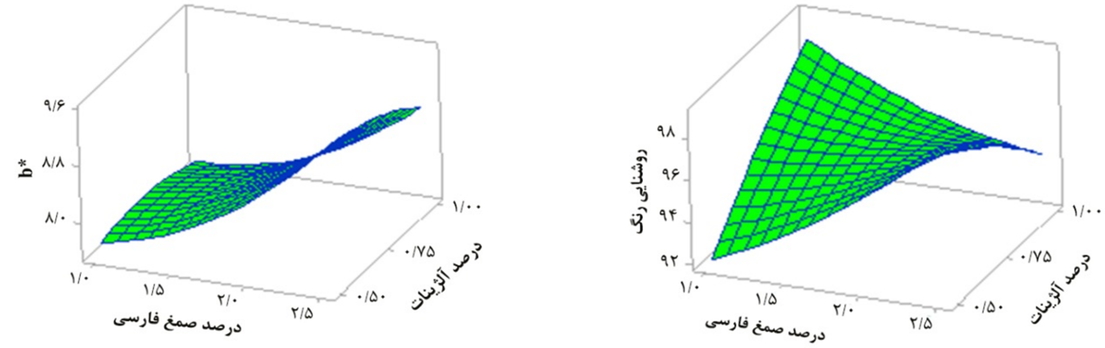


شکل ۲- نمودار سطح پاسخ متغیر پایداری حرارتی

در بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی صمغ فارسی که توسط Khalesi و همکاران (۲۰۱۶) انجام شد با افزایش غلظت صمغ، پایداری امولسیون افزایش یافت. افزایش دما از ۳۰ به ۹۰ درجهٔ سانتی‌گراد، منجربه‌کاهش برهم‌کنش بین‌زنجیره‌ای شد درحالی‌که قابلیت جذب آب صمغ با تغییرات دما تقریباً ثابت باقی‌مانده بود. بعد از اتمام عمل حرارت‌دهی، طی سردشدن، ویسکوزیتهٔ محلول تقریباً به حالت اولیهٔ خود بازگشت که نشان‌دهندهٔ عدم تخریب ساختار مولکولی صمغ در اثر اعمال حرارت است. همچنین اندازهٔ قطره‌های امولسیون پس از حرارت‌دهی در حضور صمغ فارسی در حداقل مقدار باقی‌ماند (Khalesi *et al.*, 2016). بااین‌ترتیب تأثیر مثبت بخش محلول صمغ فارسی در جلوگیری از افزایش اندازهٔ قطره‌ها در حین اعمال حرارت، ثابت ماندن قابلیت جذب آب توسط صمغ با تغییرات دما، افزایش ویسکوزیتهٔ ظاهری با افزایش غلظت صمغ و عدم تخریب ساختار مولکولی برای توجیه بیشترین پایداری در نمونه‌ای با بیشترین غلظت صمغ فارسی دلایل موجهی محسوب می‌شوند.

رنگ

باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده و شکل (۳) روغن‌کنجد با دارابودن مقادیر شاخص‌های *L (۸۷/۷۶) و *b (۲۵/۳۷) به‌ترتیب رنگ زرد شفافی از خود نشان داد. درحالی‌که بعد از تبدیل آن به روغن ساختاریافته در ماتریس‌های تولیدشده در بهترین حالت ممکن روشنایی محصول به ۶۲/۷۷ و زردی محصول به ۹/۷۸ کاهش یافتند. بیشترین روشنایی مربوط به نمونهٔ حاوی کمترین مقدار درصد صمغ فارسی و بیشترین درصد اینولین و آلژینات سدیم بود و نمونهٔ حاوی بیشترین درصد صمغ فارسی و اینولین و کمترین درصد آلژینات دارای بالاترین مقدار زردی رنگ بود. بنابراین رنگ نمونه‌ها درنتیجهٔ پراکندگی نور منعکس‌شده به‌وسیلهٔ گلبول‌های چربی و ذرات کلوئیدی ایجاد می‌شود. کاروتن نیز به‌عنوان یک ترکیب داخل گیاه روی رنگ تأثیرگذار است. معمولاً با کاهش اندازهٔ ذرات امولسیون رنگ آن روشن‌تر می‌شود که به‌دلیل افزایش پراکنش نور است (Golkar *et al.*, 2016). درحالی‌که بالاترین روشنایی رنگ مربوط به نمونهٔ حاوی کمترین مقدار صمغ فارسی و بیشترین درصد اینولین و آلژینات سدیم بود، همین نمونه، شاخص *a و *b کمتری را نشان داد. حال آنکه بیشترین مقادیر *a، *b و c مربوط به نمونه‌ای با بیشترین درصد صمغ فارسی بود که ممکن است به‌دلیل ذرات چربی بزرگ‌تر نمونه‌ها باشد چرا که قطره‌های چربی در ساختار ژل قوی‌تری به‌دام‌افتادند. البته رنگ ممکن است تحت‌تأثیر رنگ صمغ فارسی استفاده‌شده نیز باشد ازآنجاکه صمغ فارسی مورد استفاده رنگ‌بری‌نشده و با حداقل فراوری مصرف‌شده، روی رنگ نمونه‌های تولیدی تأثیرگذار بوده است. اینولین روی رنگ نمونه تأثیری نداشته است. باتوجه‌به مقادیر به‌دست‌آمده برای زاویهٔ هیو، تمامی نمونه‌ها رنگی متمایل به زرد داشتند. این نتایج تأثیر حضور صمغ فارسی بر شاخص‌های رنگ را بیان می‌کند، به‌طوری‌که ممکن است کاهش شدت روشنایی و زردی به ساختار غیرشفاف و سفیدرنگ ماتریس‌های تولیدشده از آلژینات و صمغ فارسی مرتبط باشد. Abdollahi و همکاران (۲۰۱۹) نیز در تحقیق خود مشاهده کردند حضور صمغ زانتان و ژلاتین در ساختمان اولئوژل روغن کانولا (در مقایسه با روغن تنها) *L و *b را کاهش داده اما اثر معنی‌داری بر *a ندارد.



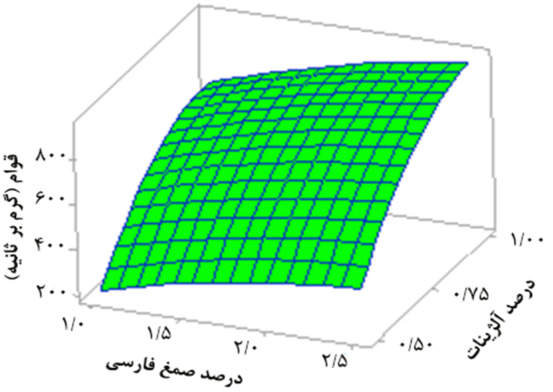
شکل ۳- نمودارهای سطح پاسخ متغیر روشنایی و زردی رنگ

ویژگی‌های بافتی نمونه‌های تولیدشده

ساختار ژل‌مانند ماتریس‌های حجم‌دهندۀ روغن درنتیجۀ به‌دام‌افتادن روغن‌کنجد (روغن‌مایع گیاهی) در یک شبکۀ ساختاریافته‌ای از زیست‌پلیمرهای به‌کاررفته حاصل شد. بنابراین رفتار بافتی این ماتریس‌های پلی‌ساکاریدی با روغن‌کنجد بسته به غلظت پلی‌ساکاریدهای به‌کاررفته در فرمولاسیون آنها متفاوت بود. در ادامه نتایج مربوط به ۴ پارامتر قوام، سختی، نیروی چسبندگی و چسبندگی نمونه‌ها مشاهده می‌شود. البته در بررسی وضعیت ظاهری ماتریس‌های حجم‌دهندۀ روغن تولیدشده با افزایش غلظت صمغ فارسی از ۱ درصد وزنی-وزنی به ۱/۷۵ و ۲/۵ درصد وزنی-وزنی افزایش استحکام و سفت‌شدن ماتریس‌ها به‌طورکامل مشهود بود.

قوام

در اکستروژن پس‌رو، نمونه در حد فاصل بین پروب و دیوارۀ ظرف تحت فشار قرار گرفت تا به جریان درآید. در واقع قوام شاخصی برای تعیین پایداری ژل‌ها طی نگهداری است. باتوجه‌به نتایج آنالیز بافت نمونه‌های تولیدشده به روش اکستروژن پس‌رو، بیشترین ضریب قوام در نمونه با بالاترین حد صمغ فارسی و آلژینات به‌دست‌آمد و کمترین مقدار قوام مربوط به نمونه‌ای حاوی کمترین مقادیر صمغ فارسی و آلژینات بود (شکل ۴). افزایش قوام ماتریس‌های حجم‌دهندۀ روغن مربوط به اتصال قوی قطره‌های امولسیونی در حضور صمغ فارسی است. افزایش درصد صمغ فارسی و آلژینات سدیم در فرمولاسیون نمونه‌ها نسبت بین فاز جامد به فاز غیرجامد (روغن) را افزایش داد، در این حالت بسته‌ای متراکم‌تر از قطره‌های روغن تشکیل‌شده و پس از تبدیل به ماتریس‌های حجم‌دهندۀ روغن، ضمن تشکیل ساختار ژلی پایدارتر، قوام بالاتری ایجاد کرد. البته باتوجه‌به بررسی‌های رئولوژیکی ماتریس‌های حجم‌دهندۀ روغن، در واقع این رفتار قابل پیش‌بینی بود چرا که افزایش مقدار آلژینات سدیم باعث تشکیل لایه‌ای قوی‌تر با ضخامت بیشتر در اطراف قطره‌های روغن شده که حرکت آنها را محدود می‌کند (Moradabbasi *et al.*, 2021). همچنین افزایش ویسکوزیتۀ فاز پیوسته در اثر افزایش غلظت صمغ فارسی، همانند اثر امولسیفایر باعث محدودشدن حرکت قطره‌های روغن و تشکیل شبکۀ قوی‌تر در فاز آبی (پیوسته) امولسیون می‌شود که در پایداری شبکه مؤثر است.



شکل ۴- نمودار سطح پاسخ متغیر قوام

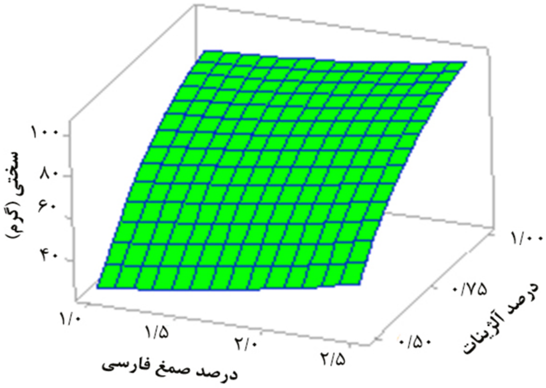
سختی

سختی ماتریس‌های حجم‌دهندۀ روغن، میزان مقاومت ژل و میزان فشردگی ساختار شبکۀ ژل را نشان می‌دهد. باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده و شکل (۵)، میزان سختی نمونۀ حاوی بیشترین مقدار صمغ فارسی و آلژینات سدیم بیشتر از نمونه‌های دیگر و معنی‌دار بود ($P\leq ۰/۰۵$). در واقع نمونۀ دارای سختی بیشتر، ساختار شبکۀ مستحکم‌تر در مقایسه با سایر نمونه‌ها داشت که این افزایش سختی بافت می‌تواند مربوط به تشکیل یک لایۀ سطحی ضخیم‌تر در اطراف حفره‌ها در حضور صمغ فارسی باشد. در عامل‌های حجم‌دهندۀ روغنی، ساختار ژل‌مانند نمونه‌ها درنتیجۀ به‌دام‌افتادن روغن‌کنجد در یک شبکۀ ساختاریافته‌ای از

زیست‌پلیمرهاست، بنابراین با افزایش غلظت زیست‌پلیمرهایی چون صمغ فارسی و آلژینات سدیم، مجموع غلظت کل نیز افزایش یافت که درنهایت منجربه‌افزایش قدرت مکانیکی ژل و سختی بافت گردید. درحالی‌که ماتریس‌های تولیدشده با غلظت‌های کمتری از زیست‌پلیمرها توانایی تحمل تنش‌های کمتری را داشتند. پژوهشگران پیوند هیدروژنی ناشی از زیست‌پلیمرها را در تشکیل شبکهٔ ژلی ساختاریافته مؤثر می‌دانند (Abdollahi *et al.*, 2019). برای تشکیل و توسعهٔ پیوندهای هیدروژنی فرصت کافی موردنیاز است تا زمان مناسب برای تکمیل برهم‌کنش‌های بین مواد تشکیل‌دهندهٔ ماتریس‌ها تأمین گردد (Davidovich-Pinhas *et al.*, 2015). درحقیقت می‌توان گفت تعادل بین برهم‌کنش‌های پلیمر-روغن و پلیمر-پلیمر در ساختار شبکه‌ای ژل نقش اساسی دارد. ماتریس‌های تولیدشده توسط پیوند هیدروژنی بین گروه‌های کربنیل روغن و مولکول‌های آب و یا کربوهیدرات تثبیت می‌شوند. تفاوت در رفتار ساختاری هرکدام از پلی‌ساکاریدها ازنظر پیوند هیدروژنی با آب، ممکن است تفاوت خصوصیات ساختاری ماتریس‌ها را توضیح دهد (Herrero *et al.*, 2014). به نظر می‌رسد افزایش میزان غلظت دو زیست‌پلیمر آلژینات سدیم و صمغ فارسی عاملی برای تقویت زنجیره‌های داخلی پلیمر به‌دلیل تعداد بیشتر پیوندهای هیدروژنی باشد که ایجاد نقاط اتصال به هنگام تشکیل ژل را افزایش‌داده و شبکهٔ ژلی قوی‌تر تشکیل می‌دهند (Soltanizadeh & Goli, 2019). افزایش ویسکوزیتهٔ محیط نیز سبب محدودیت حرکت قطره‌های روغن شده و به پایداری امولسیون کمک می‌کند. وجود صمغ فارسی و افزایش غلظت آن به‌واسطهٔ افزایش مادهٔ جامد کل، عامل مهمی در افزایش ویسکوزیته و سفتی بافت است. علت افزایش سختی بافت ماتریس‌ها با افزایش درصد صمغ فارسی را می‌توان به افزایش ویسکوزیته ازطریق باندشدن آب و نیز برهم‌کنش بین گلبول چربی با شبکهٔ ژلی به‌وسیلهٔ صمغ نیز نسبت داد (Davidovich-Pinhas *et al.*, 2016; Moradabbasi *et al.*, 2021; Shariati *et al.*, 2020). در واقع مقاومت ژل نسبت به نفوذ پروب دستگاه بافت‌سنج با افزایش صمغ فارسی و افزایش ویسکوزیته بیشتر شد، درنتیجه سختی بافت نیز افزایش یافت. Yılmaz و Öğütcü (۲۰۱۴) افزایش سختی اولئوژل‌های تولیدشده از موم زنبورعسل را با افزایش غلظت ارگانوژلاتورهای[1] کاربردی خود گزارش کردند.

[1] Organogelators

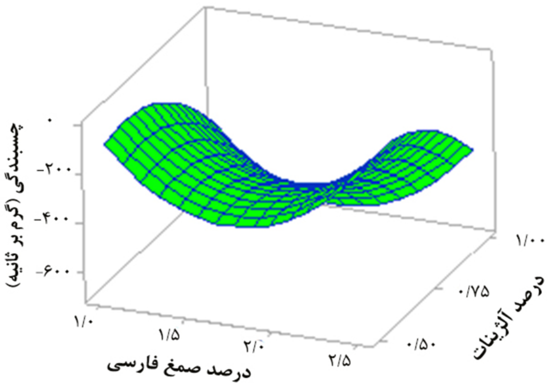
Zetzl و همکاران (۲۰۱۲) افزایش غلظت هیدروکلوئید را عاملی اثرگذار بر سفتی بافت ژل‌های تولیدی دانستند. همچنین Patel، Dumlu و همکاران (۲۰۱۵) و Patel، Rajarethinem و همکاران (۲۰۱۵) دریافتند افزایش غلظت زیست‌پلیمرها باعث افزایش قدرت ژل تولیدی می‌شود.



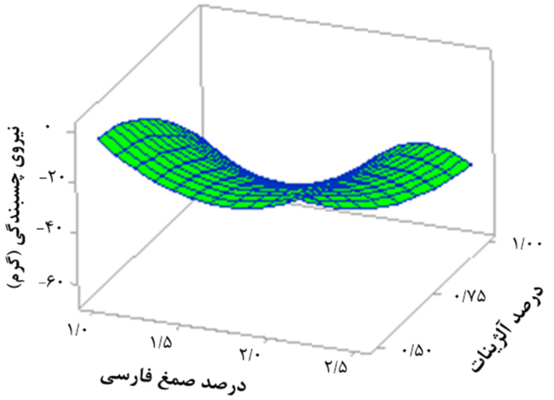
شکل ۵- نمودار سطح پاسخ متغیر سختی

چسبندگی و نیروی چسبندگی

باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده و شکل (۶) میزان چسبندگی در ماتریس تولیدشده با بالاترین حد صمغ فارسی و کمترین میزان آلژینات بیشتر از نمونه‌های دیگر بود، اما معنی‌دار نبود. همچنین مطابق نتایج به‌دست‌آمده (شکل ۷) بیشترین مقدار نیروی چسبندگی نیز به نمونه‌ای با بالاترین حد صمغ فارسی و کمترین میزان آلژینات تعلق دارد. در واقع نتایج پژوهش نشان داد که تغییرات چسبندگی و نیروی چسبندگی نمونه‌ها با تغییرات غلظت پلی‌ساکاریدها تقریباً مشابه یکدیگر است. به‌طوری‌که با افزایش میزان صمغ فارسی تا حدود مقادیر ۱/۵ درصد، در نمونه‌هایی با مقادیر پایین آلژینات چسبندگی و نیروی چسبندگی کاهش و سپس با افزایش درصد صمغ فارسی از حدود ۱/۵ تا ۲/۵ درصد این پارامترها روند افزایشی داشتند. حال آنکه در مقادیر بالای آلژینات، با افزایش میزان صمغ فارسی، چسبندگی و نیروی چسبندگی نمونه‌ها افزایش یافت. دربارهٔ چسبندگی نمونه‌ها می‌توان گفت که نیروی چسبندگی، نیروی لازم جهت غلبه بر نیروی جاذبهٔ سطحی بین ذرات است، لذا هرچه ساختار ژلی عامل‌های روغنی تولیدشده از استحکام بیشتری برخوردار باشند، نیروی چسبندگی نیز بیشتر خواهد بود. علت افزایش را می‌توان به خواص منحصربه‌فرد صمغ فارسی مانند تغلیظ‌کنندگی، حفظ و نگهداری رطوبت در شبکهٔ ژل و کمک به خواص ویسکوالاستیک دانست که با نتایج Meng و همکاران (۲۰۱۸a) نیز قابل توجیه است.



شکل ۶- نمودار سطح پاسخ متغیر چسبندگی



شکل ۷- نمودار سطح پاسخ متغیر نیروی چسبندگی

با افزایش غلظت زیست‌پلیمرها، قطره‌های روغن توسط میزان بیشتری از آلژینات سدیم و صمغ فارسی احاطه‌شده و حرکت آنها محدود می‌شود. علاوه‌بر این افزایش هیدروکلوئیدی مثل صمغ فارسی سبب افزایش ویسکوزیتهٔ فاز پیوسته، تثبیت امولسیون و تشکیل شبکهٔ قوی‌تر و درنهایت مانع از سرعت همبستگی بین ذرات روغن و رفتار شبه‌جامد در امولسیون می‌شود (Meng *et al.*, 2018b). عکس این حالت نیز یعنی کاهش چسبندگی باعث کاهش استحکام شبکهٔ ژلی و افزایش حالت پلاستیکی ژل‌ها خواهد شد (Abdollahi *et al.*, 2019). چسبندگی به‌کار موردنیاز برای غلبه بر نیروهای جاذبه بین سطح مادهٔ غذایی و موادی که در تماس با آنها هستند، اشاره می‌کند (Zameni *et al.*, 2015). این ویژگی بسیار مهم به دو روش چسبندگی به تجهیزات تولید یا چسبیدن به انگشتان دست و دهان قابل مشاهده است. این حالت برای محصولاتی مانند سس سالاد، پودینگ، محصولات قنادی و محصولات نانوایی مناسب و برای محصولاتی مانند ماکارانی، پاستا، مغز نان و برخی محصولات گوشتی یک ویژگی منفی تلقی می‌شود (Zameni *et al.*, 2015). باتوجه‌به هدف بعدی پژوهش در استفاده از عوامل حجم‌دهندهٔ روغن تولیدی، در محصولات قنادی، افزایش چسبندگی نمونهٔ حاوی بیشترین درصد صمغ فارسی حاکی از آن است که می‌توان با انتخاب مقادیر بهینه صمغ فارسی را به‌عنوان اصلاح‌کنندهٔ بافت در محصولاتی که پارامتر چسبندگی برای آنها مهم است استفاده نمود.

مدل رگرسیونی

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و تجربی مفید برای بررسی تأثیر چند متغیر بر عملکرد و کیفیت فرایند یا محصول تحت بررسی با هدف مدل‌سازی و بهینه‌یابی فرایندهای پیچیده است. در این پژوهش تعیین مقدار بهینهٔ هرکدام از پاسخ‌ها با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی مدل رگرسیونی انجام شد. مدل رگرسیونی به‌خوبی قادر است نتایج را تخمین بزند، بنابراین می‌توان اعتبار آن را نتیجه گرفت. در واقع مدل‌های رگرسیونی بازی‌کنندهٔ نقش تابع هدف در فرایند بهینه‌سازی هستند. پس از بررسی صحت مدل‌های ارائه‌شده، متغیرهای خروجی فرایند بر مبنای تغییر در متغیرهای ورودی پیش‌بینی می‌شود. نتایج مدل رگرسیونی برای مقادیر پیش‌بینی‌شدهٔ نشت روغن، پایداری حرارتی، روشنایی و زردی رنگ و متغیرهای پاسخ آزمون اکستروژن پس‌رو ماتریس‌های حجم‌دهندهٔ روغن تولیدشده در جدول (۳) نشان داده شده است. مقادیر ضریب تبیین نیز برای هرکدام درج شده است.

باتوجه‌به جدول (۳)، معمولاً در تحلیل‌های مقادیر ضرایب تبیین، مقادیر بالای ۷۰ درصد رگرسیون خوب، بین ۵۰ تا ۷۰ درصد رگرسیون متوسط، بین ۲۰ تا ۵۰ ضعیف و از ۲۰ به پایین‌تر رگرسیون بسیار ضعیف را نشان خواهند داد. به‌این‌ترتیب مقادیر ضرایب تبیین چسبندگی، پیوستگی به‌ترتیب با مقادیر (R^2=۵۱/۱۷) و (R^2=۵۴/۹۸) برازش متوسط و سایر متغیرهای پاسخ برازش خوب مدل به داده‌های آزمایشی را نشان دادند. البته تفاوت مقادیر R^2 و R^2-adj در جدول (۳) مشهود است. در توجیه این مطلب می‌توان گفت در طرح مرکب مرکزی، اندازهٔ نمونه (n=۲۰) به اندازهٔ کافی بزرگ نیست که بتواند برآورد دقیقی از روابط بین متغیرها ارائه دهد به‌این‌دلیل پارامترهایی از قبیل R^2 و R^2-adj می‌تواند تفاوت زیادی داشته باشد. برای به‌دست‌آوردن برآورد دقیق باید از نمونه‌های بیشتر (به‌طور معمول ۴۰ یا بیشتر) استفاده شود.

جدول ۳- مدل رگرسیونی برای مقادیر پیش‌بینی‌شدهٔ متغیرهای پاسخ ماتریس‌های تولیدشده بر مبنای پلی‌ساکاریدها

منبع	مدل	R^2 (درصد)	R^2-adj (درصد)
پایداری حرارتی	$۰۰/۸۸+۱۵/۵۸x_{۱}-۱۱/۳۳x_{۲}-۳۴/۹x_{۳}-۳/۳۱x_{۱}^{۲}+۶/۳۸x_{۲}^{۲}+۲۳/۲x_{۳}^{۲}-۱/۱۳x_{۱}x_{۲}-۲/۴۵x_{۱}x_{۳}+۰/۶۷x_{۲}x_{۳}$	۸۲/۸۹	۵۲/۰۹
نشت روغن	$۴/۴-۲۱/۳x_{۱}+۳۷/۲x_{۲}+۸/۳x_{۳}+۳/۶۲x_{۱}^{۲}-۱۹/۲۶x_{۲}^{۲}+۰/۰۱x_{۳}^{۲}+۳/۳۲x_{۱}x_{۲}+۳/۰۷x_{۱}x_{۳}-۷/۴x_{۲}x_{۳}$	۷۰/۰۳	۳۰/۲۲
L*	$۳۴/۴+۱۲/۶۰x_{۱}-۱۴/۲x_{۲}+۲۷/۲x_{۳}+۱/۱۰x_{۱}^{۲}+۱۰/۳۷x_{۲}^{۲}-۵/۳x_{۳}^{۲}-۴/۷۵x_{۱}x_{۲}-۱۴/۲۳x_{۱}x_{۳}+۷/۰۰x_{۲}x_{۳}$	۸۵/۴۹	۵۹/۳۷
b*	$۴/۳۱-۱/۰۳x_{۱}+۴/۱۰x_{۲}+۵/۲۶x_{۳}+۰/۵۷۰x_{۱}^{۲}-۱/۷۳۸x_{۲}^{۲}-۲/۱۲x_{۳}^{۲}+۰/۵۴۱x_{۱}x_{۲}-۰/۶۹۱x_{۱}x_{۳}-۱/۶۲۳x_{۲}x_{۳}$	۹۵/۹۳	۸۸/۶۱
سختی	$-۱۱۲+۱۹/۴x_{۱}-۸۸x_{۲}+۴۳۶x_{۳}+۳/۴x_{۱}^{۲}+۵۸/۱x_{۲}^{۲}-۱۸۶x_{۳}^{۲}-۱۳/۱x_{۱}x_{۲}-۹/۳x_{۱}x_{۳}-۱۹/۸x_{۲}x_{۳}$	۸۴/۲۶	۵۵/۹۴
نیروی چسبندگی	$-۸۴۳-۱۷۳۷x_{۱}+۲۵۴۱x_{۲}+۲۳۷۰x_{۳}+۴۹۵x_{۱}^{۲}-۱۲۳۴x_{۲}^{۲}-۲۰۲۰x_{۳}^{۲}+۲۴x_{۱}x_{۲}+۱۴x_{۱}x_{۳}-۴۱x_{۲}x_{۳}$	۵۱/۱۷	۱۴/۲۲
قوام	$-۸۷۸+۳۳۷۸x_{۱}-۱۱۲۹x_{۲}+۳۸۱۷x_{۳}-۵۸x_{۱}^{۲}+۵۸۷x_{۲}^{۲}-۱۹۲۶x_{۳}^{۲}-۷۳x_{۱}x_{۲}+۱۱۴x_{۱}x_{۳}-۱۲۵x_{۲}x_{۳}$	۸۶/۲۸	۶۱/۵۸
چسبندگی	$-۳۳-۱۳۸x_{۱}+۲۰۱x_{۲}+۱۱۳x_{۳}+۳۶/۹x_{۱}^{۲}-۱۰۹/۱x_{۲}^{۲}-۱۴۹x_{۳}^{۲}+۷/۶x_{۱}x_{۲}+۶/۶x_{۱}x_{۳}+۱۵x_{۲}x_{۳}$	۵۴/۹۸	۲۶/۸۸

x_1: صمغ فارسی، x_2: اینولین، x_3: آلژینات، R^2: ضریب تبیین و R^2-adj: ضریب تبیین تعدیل‌شده

آنالیز واریانس فاکتورهای رنگ، سختی و قوام

باتوجه‌به نتایج جدول (۴)، اثرات خطی درصد صمغ فارسی روی *b، درصد آلژینات روی تغییرات سختی و قوام، اثرات درجهٔ دوم اینولین×اینولین روی *b و اثرات متقابل درصد صمغ فارسی×آلژینات روی تغییرات روشنایی رنگ (*L) ماتریس‌های تولیدی معنی‌دار بود ($P\leq۰/۰۵$).

شرایط بهینهٔ تهیهٔ ماتریس‌های حجم‌دهندهٔ روغن

استفاده از تابع مطلوبیت یکی از قدیمی‌ترین تکنیک‌ها در رتبه‌بندی گزینه‌های یک مسئلهٔ تصمیم‌گیری چندشاخصه می‌باشد. با حل مسئله به روش تابع مطلوبیت راه‌حلی با حداکثر رضایت‌بخشی برای تصمیم‌گیرنده حاصل خواهد شد. در روش تابع مطلوبیت (با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب)، ۱۲ راه‌حل برای تعیین شرایط بهینه با مقدار شاخص مطلوبیت ۰/۸۵ برای داده‌های آزمایشی حاصل از آزمایش‌ها روی عوامل حجم‌دهندهٔ روغن ارائه شد. این راه‌حل‌های پیشنهادی با استفاده از تابع مطلوبیت نشان داد که شرایط بهینهٔ تولید ماتریس‌های حجم‌دهندهٔ روغن در ۱/۵ درصد اینولین، ۰/۹۶ درصد آلژینات و ۱/۳۲ درصد صمغ فارسی قابل حصول است. نرم‌افزار شرایط بهینهٔ متغیرهای مستقل را براساس هدف حداکثرسازی یا حداقل‌سازی متغیرهای پاسخ تعیین کرد. در این پژوهش، شرایط بهینه براساس بیشینهٔ مقدار متغیر پاسخ قوام، شاخص ویسکوزیته، چسبندگی، نیروی چسبندگی، پایداری حرارتی و فاکتورهای L^* و b^* مربوط به رنگ و کمینهٔ مقادیر متغیرهای پاسخ سختی، فاکتورهای a^* و c مربوط به رنگ و درصد مهاجرت روغن بود. همچنین برای فاکتور H مربوط به رنگ تابع هدف تعیین شد. در این نقاط بهینه، مقادیر متغیرهای پاسخ نیز به‌دست آمدند. مقادیر پیش‌بینی‌شدهٔ مشخصه‌های عوامل حجم‌دهندهٔ روغن در این شرایط بهینه و نتایج آن در مرحلهٔ بعدی پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. ازآنجایی‌که در بهینه‌سازی تولید عوامل حجم‌دهندهٔ روغن هیچ‌کدام از فاکتورها از اهمیت بیشتری نسبت به سایر متغیرهای پاسخ برخوردار نبود، وزن و اهمیت تمام متغیرها یکسان درنظرگرفته شد. به‌منظور بررسی صحت شرایط بهینهٔ به‌دست‌آمده، تیمار پیشنهادی با شرایط یکسان همانند سایر تیمارها تولید و نتایج حاصل از ارزیابی پارامترهایی که در تحلیل‌های مدل رگرسیونی ضریب تبیین بالای ۸۰ درصد داشتند با نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل مقایسه گردید. برای این کار از آزمون t یک نمونه‌ای در نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شد. مقادیر P-value بزرگ‌تر از ۰/۰۵ و T-value نزدیک به ۱ (جدول ۵) به‌دست‌آمده از این آزمون بیانگر این است که بین مدل‌ها و مشاهده‌های تجربی تفاوت معنی‌داری وجود ندارد و کارایی مدل‌ها را به‌خوبی اثبات می‌کند.

جدول ۴- نتایج آنالیز واریانس مدل سطح پاسخ برای *L، *b، سختی و قوام، پایداری حرارتی و نشت روغن ماتریس‌های حجم‌دهندهٔ تولیدی بر مبنای پلی‌ساکاریدها

منبع تغییرات	L*		b*		سختی		قوام		پایداری حرارتی		نشت روغن	
	F-Value	*P*-Value	*F*-Value	*P*-Value	*F*-Value	*P*-Value	*F*-Value	*P*-Value	*F*-Value	*P*-Value	*F*-Value	*P*-Value
رگرسیون	۳/۲۷	۰/۱۰۲	۱۳/۱۰	۰/۰۰۶	۲/۹۷	۰/۱۲۱	۳/۴۹	۰/۰۹۱	۲/۶۹	۰/۱۴۴	۱/۳۰	۰/۴۰۶
اثرات خطی	۲/۳۹	۰/۱۸۵	۳۱/۶۰	۰/۰۰۱	۸/۱۲	۰/۰۲۳	۹/۴۹	۰/۰۱۷	۳/۳۳	۰/۱۱۴	۱/۸۵	۰/۲۵۵
درصد صمغ فارسی	۱/۱۶	۰/۳۳۱	۸۴/۴۴	۰/۰۰۰	۱/۷۲	۰/۲۴۷	۴/۱۰	۰/۰۹۹	۴/۰۳	۰/۱۰۱	۳/۵۸	۰/۱۱۷
درصد اینولین	۵/۷۸	۰/۰۶۱	۴/۸۱	۰/۰۸۰	۰/۵۲	۰/۵۰۱	۲/۷۰	۰/۱۶۱	۰/۰۰	۰/۹۶۷	۰/۱۹	۰/۶۸۲
درصد آلژینات	۰/۲۴	۰/۶۴۴	۵/۵۴	۰/۰۶۵	۲۲/۱۱	۰/۰۰۵	۲۱/۶۷	۰/۰۰۶	۵/۹۷	۰/۰۵۸	۱/۷۸	۰/۲۳۹
اثرات درجه دوم	۱/۶۶	۰/۲۸۹	۳/۶۲	۰/۱۰۰	۰/۵۹	۰/۶۴۸	۰/۸۵	۰/۵۲۲	۴/۰۴	۰/۰۸۴	۱/۵۳	۰/۳۱۶
صمغ×صمغ	۰/۱۹	۰/۶۷۹	۴/۱۰	۰/۰۹۹	۰/۰۲	۰/۸۸۶	۰/۱۰	۰/۷۷۰	۵/۹۶	۰/۰۵۹	۰/۷۵	۰/۴۲۶
اینولین×اینولین	۳/۳۸	۰/۱۲۵	۷/۵۳	۰/۰۴۱	۱/۳۲	۰/۳۰۳	۱/۹۱	۰/۲۲۶	۴/۳۸	۰/۰۹۰	۴/۲۱	۰/۰۹۶
آلژینات×آلژینات	۰/۰۵	۰/۸۲۵	۰/۷۰	۰/۴۴۰	۰/۸۴	۰/۴۰۱	۱/۲۹	۰/۳۰۸	۳/۶۱	۰/۱۱۶	۰/۰۰	۱/۰۰۰
اثرات متقابل	۵/۷۶	۰/۰۴۴	۴/۱۰	۰/۰۸۱	۰/۲۱	۰/۸۸۲	۰/۱۳	۰/۹۳۶	۰/۷۱	۰/۵۸۸	۰/۵۱	۰/۶۹۰
صمغ×اینولین	۴/۹۶	۰/۰۷۶	۵/۱۱	۰/۰۷۳	۰/۴۷	۰/۵۲۵	۰/۲۱	۰/۶۶۷	۰/۹۶	۰/۳۷۲	۰/۸۸	۰/۳۹۲
صمغ×آلژینات	۱۱/۱۳	۰/۰۲۱	۲/۰۸	۰/۲۰۸	۰/۰۶	۰/۸۱۷	۰/۱۳	۰/۷۳۷	۱/۱۳	۰/۳۳۷	۰/۱۹	۰/۶۸۳
اینولین×آلژینات	۱/۲۰	۰/۳۲۴	۵/۱۱	۰/۰۷۳	۰/۱۲	۰/۷۴۵	۰/۰۷	۰/۸۰۶	۰/۰۴	۰/۸۵۵	۰/۴۸	۰/۵۲۱
باقی‌ماندهٔ خطا	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
کل	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

جدول ۵- مقایسهٔ بین مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌ها و مقادیر واقعی

پارامتر	مقدار پیش‌بینی‌شده	میانگین مقدار واقعی	*P*-value	*T*-value
پایداری حرارتی	۹۶/۵۲۸۹	۹۶/۲۲۴	۰/۴۰۶	-۱/۰۴
L*	۵۸/۸۴۵۹	۵۸/۶۲۲	۰/۷۷۷	-۰/۳۲
b*	۷/۱۲۱۶۲	۷/۳۰۹	۰/۲۳۲	۱/۶۹
سختی	۹۹/۷۱۷۹	۹۸/۹۶۷	۰/۲۶۶	-۱/۵۳
قوام	۸۰۲/۰۰۶	۷۹۹/۹۵۵	۰/۱۶۵	-۲/۱۵

نتیجه‌گیری

در این پژوهش عوامل حجم‌دهندهٔ روغن بر پایهٔ پلی‌ساکاریدهای اینولین، صمغ فارسی و آلژینات هرکدام در سه سطح به‌همراه روغن‌کنجد در درصد ثابت ۴۰ تهیه شدند. از روش دوفازی ساختاریافته برای تولید آنها استفاده شد. اهمیت این روش نه تنها در سادگی و کوتاه‌بودن مراحل تولید است بلکه با بررسی ویژگی‌های ماتریس‌های حجم‌دهندهٔ روغن تولیدشده می‌توان بر قابلیت یا عدم قابلیت تولید ماتریس‌های حجم‌دهندهٔ روغن بر پایهٔ سیستم دوفازی ساختاریافته دست یافت. همچنین عدم حرارت‌دهی و عدم استفاده از امولسیفایرهای صنعتی و استفاده از زیست‌پلیمرهای متنوع در تهیهٔ این ماتریس‌ها از بخش‌های قابل‌توجه این سیستم‌هاست. پاسخ‌های سه متغیر با درصدهای متفاوت با استفاده از روش سطح پاسخ با درنظرگرفتن تابع مطلوبیت بهینه‌سازی شدند. دستیابی به بیشترین پایداری حرارتی، کمترین درصد مهاجرت روغن، بهترین رنگ و ویژگی‌های بافتی مطلوب به‌عنوان پاسخ در بهینه‌سازی درنظرگرفته شد. نتایج نشان داد اثرات خطی درصد صمغ فارسی روی *b، درصد آلژینات روی تغییرات سختی و قوام، اثرات درجهٔ دوم اینولین×اینولین روی *b و اثرات متقابل درصد صمغ فارسی×آلژینات روی تغییرات روشنایی رنگ (*L) ماتریس‌های تولیدی معنی‌دار ($P \leq ۰/۰۵$) بود. سختی، قوام، روشنایی و زردی رنگ با ضرایب تبیین بالای ۸۵ برازش خوبی از مدل نسبت به داده‌های آزمایشی را نشان دادند. نمونهٔ بهینه در غلظت‌های درصدی صمغ فارسی (۱/۳۲)، اینولین (۱/۵) و آلژینات سدیم (۰/۹۶) به‌دست‌آمد.

مشارکت نویسندگان

بیتا محمدعلمی: جمع‌آوری داده، نوشتن پیش‌نویس مقاله،

تجزیه‌وتحلیل و تفسیر داده‌ها، آنالیز داده‌ها؛ **اکرم آریان‌فر**: ارائهٔ ایدهٔ پژوهشی و طراحی مقاله، بازبینی و اصلاح مقاله، تجزیه‌وتحلیل و تفسیر داده‌ها، نظارت بر مطالعه و تأیید نسخهٔ نهایی؛ **علی محمدی‌ثانی**: تجزیه‌وتحلیل و تفسیر داده‌ها، نظارت بر مطالعه و تأیید نسخهٔ نهایی؛ **سارا ناجی طبسی**: ارائهٔ ایدهٔ پژوهشی و طراحی مقاله، بازبینی و اصلاح مقاله، تجزیه‌وتحلیل و تفسیر داده‌ها، نظارت بر مطالعه و تأیید نسخهٔ نهایی.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، هیچ‌گونه تعارض منافعی وجود ندارد.

منابع

Abdollahi, M., Goli, S. A. H., & Soltanizadeh, N. (2019). Investigation of oleogel characteristics in non-thermal process using gelatin and xanthan biopolymers and its fortification with vitamin D. *Journal of food science and technology(Iran)*, *16*(89), 249-261. http://fsct.modares.ac.ir/article-7-31070-en.html (in Persian)

Asgari Verjan, S., Salehifar, M., & Shahriari, S. (2018). Basil seed gum and Oregano essential oil seed gum effect on physicochemical properties and sensory properties of reduced-fat chocolate cake. *Journal of food science and technology(Iran)*, *14*(72), 357-369. http://fsct.modares.ac.ir/article-7-10853-fa.html (in Persian)

BaratianGhorghi, Z., Faezian, A., Yeganehzad, S., & Hesarinejad, M. A. (2022). Changes in Thermal, Textural, Color and Microstructure Properties of Oleogel Made from Beeswax with Grape Seed Oil under the Effect of Cooling Rate and Oleogelator Concentration. *Research and Innovation in Food Science and Technology*, *11*(1), 43-54. https://doi.org/10.22101/JRIFST.2022.283673.1242

Bemer, H. L., Limbaugh, M., Cramer, E. D., Harper, W. J., & Maleky, F. (2016). Vegetable organogels incorporation in cream cheese products. *Food Research International*, *85*, 67-75. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.04.016

Bemiller, J. (2010). Carbohydrate Analysis. In (Vol. 2, pp. 147-177). Springer Science+Business Media, LLC. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1478-1_10

Bot, A., Erle, U., Vreeker, R., & Agterof, W. G. M. (2004). Influence of crystallisation conditions on the large deformation rheology of inulin gels. *Food Hydrocolloids*, *18*(4), 547-556. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2003.09.003

Bourne, M. C. (1978). Texture profile analysis. *Food Technology*, *32*, 62-66.

Cerqueira, M. A., Fasolin, L. H., Picone, C. S. F., Pastrana, L. M., Cunha, R. L., & Vicente, A. A. (2017). Structural and mechanical properties of organogels: Role of oil and gelator molecular structure. *Food Research International*, *96*, 161-170. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.03.021

Dassanayake, L. S. K., Kodali, D. R., & Ueno, S. (2011). Formation of oleogels based on edible lipid materials. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, *16*(5), 432-439. https://doi.org/10.1016/j.cocis.2011.05.005

Davidovich-Pinhas, M., Barbut, S., & Marangoni, A. G. (2015). The gelation of oil using ethyl cellulose. *Carbohydrate Polymers*, *117*, 869-878. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.10.035

Davidovich-Pinhas, M., Barbut, S., & Marangoni, A. G. (2016). Development, Characterization, and Utilization of Food-Grade Polymer Oleogels. *Annual Review of Food Science and Technology*, *7*(1), 65-91. https://doi.org/10.1146/annurev-food-041715-033225

Giacintucci, V., Di Mattia, C. D., Sacchetti, G., Flamminii, F., Gravelle, A. J., Baylis, B., . . . Pittia, P. (2018). Ethylcellulose oleogels with extra virgin olive oil: the role of oil minor components on microstructure and mechanical strength. *Food Hydrocolloids*, *84*, 508-514. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.05.030

Golkar, A., Nasirpour, A., & Keramat, J. (2016). Production of Reduced-fat Mayonnaise Using Electrostatic and Covalent Complexes of β-lactoglobulin and Farsi Gum [Research]. *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology*, *10*(4), 103-114. http://nsft.sbmu.ac.ir/article-1-1695-fa.html (in Persian)

Herrero, A. M., Carmona, P., Jiménez-Colmenero, F., & Ruiz-Capillas, C. (2014). Polysaccharide gels as oil bulking agents: Technological and structural properties. *Food Hydrocolloids*, *36*, 374-381. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.08.008

Jabbari Izadi, A., & Motamedzadegan, A. (2013, October). *Investigating the use of gums as a fat substitute in cakes* 21st National Congress on Food Science and Technology, October 29-30, 2013, https://civilica.com/doc/235660 (in Persian)

Jang, A., Bae, W., Hwang, H.-S., Lee, H. G., & Lee, S. (2015). Evaluation of canola oil oleogels with candelilla wax as an alternative to shortening in baked goods. *Food chemistry*, *187*, 525-529. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.110

Khalesi, H., Kadkhodaee, R., & Emadzadeh, B. (2016). The effect of Persian gum and thermal process on the properties of emulsion stabilized by whey protein concentrate. *Innovative Food Technologies*, *4*(1), 103-119. https://dx.doi.org/10.22104/jift.2016.363 (in Persian)

Kim, J. Y., Lim, J., Lee, J., Hwang, H. S., & Lee, S. (2017). Utilization of Oleogels as a Replacement for Solid Fat in Aerated Baked Goods: Physicochemical, Rheological, and Tomographic Characterization. *Journal of food science*, *82*(2), 445-452. https://doi.org/10.1111/1750-3841.13583

Leal-Calderon, F., Thivilliers, F., & Schmitt, V. (2007). Structured emulsions. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, *12*(4), 206-212. https://doi.org/10.1016/j.cocis.2007.07.003

Limpimwong, W., Kumrungsee, T., Kato, N., Yanaka, N., & Thongngam, M. (2017). Rice bran wax oleogel: A potential margarine replacement and its digestibility effect in rats fed a high-fat diet. *Journal of Functional Foods*, *39*, 250-256. https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.10.035

Marangoni, A. G., & Edmund Daniel, C. (2012). Organogels: An Alternative Edible Oil-Structuring Method. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, *89*(5), 749-780. https://doi.org/10.1007/s11746-012-2049-3

Martins, A. J., Cerqueira, M. A., Cunha, R. L., & Vicente, A. A. (2017). Fortified beeswax oleogels: effect of β-carotene on the gel structure and oxidative stability. *Food & function*, *8*(11), 4241-4250. https://doi.org/10.1039/C7FO00953D

Martins, A. J., Cerqueira, M. A., Fasolin, L. H., Cunha, R. L., & Vicente, A. A. (2016). Beeswax organogels: Influence of gelator concentration and oil type in the gelation process. *Food Research International*, *84*, 170-179. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.03.035

Meng, Z., Qi, K., Guo, Y., Wang, Y., & Liu, Y. (2018a). Effects of thickening agents on the formation and properties of edible oleogels based on hydroxypropyl methyl cellulose. *Food chemistry*, *246*, 137-149. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.154

Meng, Z., Qi, K., Guo, Y., Wang, Y., & Liu, Y. (2018b). Macro-micro structure characterization and molecular properties of emulsion-templated polysaccharide oleogels. *Food Hydrocolloids*, *77*, 17-29. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.09.006

Mert, B., & Demirkesen, I. (2016a). Evaluation of highly unsaturated oleogels as shortening replacer in a short dough product. *LWT - Food Science and Technology*, *68*, 477-484. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.12.063

Mert, B., & Demirkesen, I. (2016b). Reducing saturated fat with oleogel/shortening blends in a baked product. *Food chemistry*, *199*, 809-816. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.087

Moradabbasi, M., Goli, A., & Fayaz, G. (2021). Effect of sodium caseinate and xanthan gum biopolymers concentration on oleogel production capability based on oil-in-water emulsion system. *mdrsjrns*, *17*(107), 147-159. http://dx.doi.org/10.52547/fsct.17.107.147 (in Persian)

Mozafari, H., Hosseini, E., & Hojat al-Islami, M. (2015, May). *Investigating the flow behavior of Zodo oozing gum as a function of concentration and temperature* International conference of applied researches in agriculture, https://civilica.com/l/5518/ (in Persian)

Naji-Tabasi, S., Mahdian, E., Arianfar, A., & Naji-Tabasi, S. (2020). Investigation of Oleogel Properties Prepared by Pickering Emulsion-Templated Stabilized with Solid Particles of Basil Seed Gum and Isolated Soy Protein as a Fat Substitute in Cream. *Research and Innovation in Food Science and Technology*, *9*(3), 269-282. https://dx.doi.org/10.22101/JRIFST.2020.229269.1168 (in Persian)

O'Sullivan, C. M., Barbut, S., & Marangoni, A. G. (2016). Edible oleogels for the oral delivery of lipid soluble molecules: Composition and structural design considerations. *Trends in Food Science & Technology*, *57*, 59-73. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.08.018

Panagiotopoulou, E., Moschakis, T., & Katsanidis, E. (2016). Sunflower oil organogels and organogel-in-water emulsions (part II): Implementation in frankfurter sausages. *LWT*, *73*, 351-356. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.06.006

Patel, A. R., Cludts, N., Bin Sintang, M. D., Lewille, B., Lesaffer, A., & Dewettinck, K. (2014). Polysaccharide-based oleogels prepared with an emulsion-templated approach. *Chemphyschem : a European journal of chemical physics and physical chemistry*, *15*(16), 3435-3439. https://doi.org/10.1002/cphc.201402473

Patel, A. R., & Dewettinck, K. (2016). Edible oil structuring: an overview and recent updates [10.1039/C5FO01006C]. *Food & function*, *7*(1), 20-29. https://doi.org/10.1039/C5FO01006C

Patel, A. R., Dumlu, P., Vermeir, L., Lewille, B., Lesaffer, A., & Dewettinck, K. (2015). Rheological characterization of gel-in-oil-in-gel type structured emulsions. *Food Hydrocolloids*, *46*, 84-92. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.12.029

Patel, A. R., Rajarethinem, P. S., Cludts, N., Lewille, B., De Vos, W. H., Lesaffer, A., & Dewettinck, K. (2015). Biopolymer-Based Structuring of Liquid Oil into Soft Solids and Oleogels Using Water-Continuous Emulsions as Templates. *Langmuir*, *31*(7), 2065-2073. https://doi.org/10.1021/la502829u

Patel, A. R., Rajarethinem, P. S., Grędowska, A., Turhan, O., Lesaffer, A., De Vos, W. H., . . . Dewettinck, K. (2014). Edible applications of shellac oleogels: spreads, chocolate paste and cakes. *Food & function*, *5*(4), 645-652. https://doi.org/10.1039/C4FO00034J

Pehlivanoğlu, H., Demirci, M., Toker, O. S., Konar, N., Karasu, S., & Sagdic, O. (2018). Oleogels, a promising structured oil for decreasing saturated fatty acid concentrations: Production and food-based applications. *Critical reviews in food science and nutrition*, *58*(8), 1330-1341. https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1256866

Pehlivanoglu, H., Ozulku, G., Yildirim, R. M., Demirci, M., Toker, O. S., & Sagdic, O. (2018). Investigating the usage of unsaturated fatty acid-rich and low-calorie oleogels as a shortening mimetics in cake. *Journal of Food Processing and Preservation*, *42*(6), e13621. https://doi.org/10.1111/jfpp.13621

Rahimi, S., & Abbasi, S. (2014). Characterization of some physicochemical and gelling properties of Persian gum. *Innovative Food Technologies*, *1*(4), 13-27. https://dx.doi.org/10.22104/jift.2014.47

Ruiz-Capillas, C., Carmona, P., Jiménez-Colmenero, F., & Herrero, A. M. (2013). Oil bulking agents based on polysaccharide gels in meat batters: a Raman spectroscopic study. *Food chemistry*, *141*(4), 3688-3694. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.06.043

Shariati, F., Azadmard-Damirchi, S., & Shirani Rad, A. H. (2020). Effect of ethylcellulose and polyglycerol polyricinoleate concentration on microstructure and oxidative stability of sesame oil oleogel. *Journal of Food Processing and Preservation*, *11*(2), 63-76. https://dx.doi.org/10.22069/ejfpp.2020.14435.1464 (in Persian)

Soltanizadeh, N., & Goli, S. A. H. (2019). Evaluating the Effect of Cooling Rate and Organogelator Concentration on the Textural Properties of Sesame oil Oleogels and Comparison with Animal Fat. *Journal of food science and technology(Iran)*, *16*(90), 1-14. http://fsct.modares.ac.ir/article-7-16257-fa.html (in Persian)

Souhan Agini, A., Movahhed, S., & Ahmadi Chenarbon, H. (2017). Effect of Guar and xanthan gums as a part replacement of lipid on the qualitative properties of oily cake. *Journal of food science and technology(Iran)*, *14*(69), 295-306. http://fsct.modares.ac.ir/article-7-1745-fa.html (in Persian)

Stortz, T. A., Zetzl, A. K., Barbut, S., Cattaruzza, A., & Marangoni, A. G. (2012). Edible oleogels in food products to help maximize health benefits and improve nutritional profiles. *Lipid Technology*, *24*(7), 151-154. https://doi.org/10.1002/lite.201200205

Tan, S.-Y., Wan-Yi Peh, E., Marangoni, A. G., & Henry, C. J. (2017). Effects of liquid oil vs. oleogel co-ingested with a carbohydrate-rich meal on human blood triglycerides, glucose, insulin and appetite [10.1039/C6FO01274D]. *Food & function*, *8*(1), 241-249. https://doi.org/10.1039/C6FO01274D

Trinh, K. T., & Glasgow, S. (2012). On the texture profile analysis test.

Yılmaz, E., & Öğütcü, M. (2014). Properties and Stability of Hazelnut Oil Organogels with Beeswax and Monoglyceride. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, *91*(6), 1007-1017. https://doi.org/10.1007/s11746-014-2434-1

Yılmaz, E., & Öğütcü, M. (2015). Oleogels as spreadable fat and butter alternatives: sensory description and consumer perception [10.1039/C5RA06689A]. *RSC Advances*, *5*(62), 50259-50267. https://doi.org/10.1039/C5RA06689A

Zameni, A., Kashani nejad, M., & Salehi, F. (2015). The Effect of Thermal Treatments on the Rheological and Textural Properties of Basil Seed Gum. *Journal of Food Technology and Nutrition*, *12*(4), 5-16. https://jftn.srbiau.ac.ir/article_7811_fda5e0909784bcf00eb6bf536ffb8078.pdf (in Persian)

Zameni, A., Kashaninejad, M., Aalami, M., Salehi, F., & Shirvani, G. (2015). Rheological Properties, Texture and Color of Balangu (Lallemantia royleana) Seed Gum Affected by Different Temperatures. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, *46*(2), 185-192. https://dx.doi.org/10.22059/ijbse.2015.55678 (in Persian)

Zetzl, A. K., Marangoni, A. G., & Barbut, S. (2012). Mechanical properties of ethylcellulose oleogels and their potential for saturated fat reduction in frankfurters. *Food & function*, *3*(3), 327-337. https://doi.org/10.1039/C2FO10202A

Zulim Botega, D. C., Marangoni, A. G., Smith, A. K., & Goff, H. D. (2013). The potential application of rice bran wax oleogel to replace solid fat and enhance unsaturated fat content in ice cream. *Journal of food science*, *78*(9), C1334–C1339. https://doi.org/10.1111/1750-3841.12175

Optimization of Oil Bulking Agents Based on Inulin, Persian Gum and Alginate by Response Surface Methodology

Bita Mohammadalami[1], **Akram Arianfar**[1*], **Ali Mohammadisani**[1], **Sara Naji-Tabasi**[2]

1- Department of Food Science and Technology, Quchan Branch, Islamic Azad University, Quchan, Iran
* Corresponding author (a_aria_1443@yahoo.com)
2- Department of Food Nanotechnology, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran

Abstract

Nowadays, the food industry is looking for new ways to reduce the levels of saturated and trans fatty acids in processed foods and to produce suitable fat substitutes for high-fat products that provide all or some of the functional properties of fats and have health benefits. In this study, sesame oil in gel matrices for the production of inulin-based oil bulking agents in three levels (0.5 to 1.5%), Persian gum (1 to 2.5%) And alginate was used at three levels (0.5 to 1%) as a new way to improve the fat content of pragmatic food products. Oil migration percentage, thermal stability, color parameters such as L*, a*, and b*, rheological properties such as hardness, adhesiveness, consistency, adhesion force of oil bulking agents produced were investigated. The two-phase structured system was optimized by the response surface method with three-variable responses in maximum thermal stability, lowest oil migration percentage, best color and desirable texture properties, and optimal values in percent concentrations (1.32) of Persian gum (1.5) inulin and (0.96) sodium alginate were obtained. In the study of regression model, hardness, consistency, brightness and yellow color with an explanation coefficient above 85% showed a good fit of the model compared to the experimental data.

Keywords: Back extrusion method, Oil bulking agent, Reduced fat, Two-phase structured system

© 2022, Research Institute of Food Science and Technology. All rights reserved.
This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0). To view a copy of this license, visit (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).