



## بهینه‌یابی سیستم‌های حجم‌دهنده روغن بر پایه اینولین، صمغ فارسی و آلژینات با روش سطح پاسخ

بیبا محمدعلمی<sup>۱</sup>، اکرم آریانفر<sup>۲\*</sup>، علی محمدی ثانی<sup>۳</sup>، سارا ناجی طبسی<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران
- ۲- استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران  
\* نویسنده مسئول (a\_aria\_1443@yahoo.com)
- ۳- دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران
- ۴- استادیار، گروه نانوفناوری مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

### چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۹

### واژه‌های کلیدی

چربی کاهش‌یافته  
روش اکستروژن پس‌رو  
سیستم دوفازی ساختاریافته  
عامل‌های حجم‌دهنده روغنی

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 روغن کنجد در ماتریس‌های ژل‌مانند جهت تولید عامل‌های روغنی حجم‌دهنده بر پایه 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  $a^*$ ،  $b^*$  و همچنین ویژگی‌های رئولوژیکی از قبیل سختی، چسبندگی، قوام و نیروی چسبندگی ماتریس‌های حجیم روغنی تولیدشده بررسی گردید. سیستم ساختاریافته 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 (۱/۳۱۸۲) از صمغ فارسی، (۱/۵) اینولین و (۰/۹۶۴۶) درصد آلژینات سدیم به‌دست آمد. 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

Mert & Demirkesen, 2016a2017). از طرفی نتایج

نامطلوب استفاده از چربی‌ها از نظر سلامتی و بهداشت، سازمان‌های نظارتی را واداشت تا با ایجاد قوانینی تولید چربی‌های ترانس برای استفاده در موارد صنعتی را به حداقل رسانده و در مدت زمان محدود تعیین‌شده، حذف این مواد را در غذاهای فراوری‌شده در دستور کار خود قرار

امروزه مصرف‌کنندگان مواد غذایی به میزان قابل توجهی 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, Kumrungsee, Kato, Yanaka, & Thongngam,

جذب روغن<sup>۵</sup> و سیستم‌های دوفازی<sup>۶</sup> طبقه‌بندی می‌شوند. اولئوژلاتورهای پخش مستقیم اولین سیستم‌های ساختاریافته روغن بودند که بررسی شدند. همان‌طوری که از نام آنها پیداست، می‌توانند به صورت مستقیم در فاز روغن گنجانده شوند (Patel & Dewettinck, 2016). تهیه روغن‌های ساختاریافته به روش مستقیم، نیازمند درجه‌حرارت بالاست که باتوجه به ژل‌سازهای کاربردی حرارت‌دهی متفاوت خواهد بود (پگانه‌زاد و همکاران، ۱۴۰۰). حرارت به کاررفته باعث اکسیداسیون و ازبین‌رفتن یا کاهش مواد مغذی موجود در روغن می‌شود. به‌این‌علت محققان به‌دنبال روش‌هایی هستند تا مرحله حرارت‌دهی حذف و کیفیت روغن حفظ شود تا بتوان از این روغن ژل‌شده بدون محدودیت در فرمولاسیون مواد غذایی مختلف استفاده کرد (Patel, Cludts, et al., 2014). سیستم‌های دوفازی ساختاریافته که طیف وسیع‌تری را شامل می‌شوند خود به سه گروه امولسیون‌های ساختاریافته<sup>۷</sup>، امولسیون‌های ژله‌ای<sup>۸</sup> و سیستم‌های حجم‌دهنده روغن<sup>۹</sup> طبقه‌بندی می‌شوند (Patel & Dewettinck, 2016). سیستم‌های حجم‌دهنده 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 منجر به تشکیل عامل‌های حجم‌دهنده روغن<sup>۱۰</sup> می‌شود (Patel & Dewettinck, 2016). هیدروکلوئیدهایی از قبیل گلوکومانان کنجاک<sup>۱۱</sup> و آلژینات‌ها در ترکیب با اینولین و دکسترین برای سیستم‌های ساختاریافته حاوی روغن‌های سالم مانند ماهی، دانه کتان و روغن‌زیتون آزمایش شده‌اند. این فناوری شامل پراکنده‌گی روغن مایع در فاز آبی و به‌دنبال آن ژل‌شدن فاز پیوسته آبی است. سیستم‌های حجم‌دهنده روغن با امولسیون معمولی آب متفاوت هستند زیرا هیچ امولسیفایری برای تهیه آنها استفاده نمی‌شود. ثبات

دهند (O'Sullivan, Barbut, & Marangoni, 2016); این قوانین به‌صورت یک نیروی محرکه در صنعت غذا منجر به طغیان یک روند روبه‌رشدی جهت تولید محصولات جدید و سالم شد که نتیجه 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, Lim, Pehlivanoglu et al., Lee, Hwang, & Lee, 2017; 2018). به‌همین‌منظور تاکنون مطالعه‌هایی روی جایگزین‌های چربی<sup>۱</sup> با ساختارهای مختلف از جمله کربوهیدرات، پروتئین و چربی صورت‌گرفته است (A. J. Martins, Cerqueira, Bemiller, 2010; Cunha, & Vicente, 2017; Stortz, Zetzel, Barbut, Cattaruzza, & Marangoni, 2012). این جایگزین‌ها ترکیباتی هستند که تأمین‌کننده تمام یا برخی از خواص چربی‌ها هستند درحالی‌که کالری کمتری از چربی ایجاد می‌کنند (Tan, Wan-Yi Peh, Marangoni, & Henry, 2017) و مورد تأیید اداره مواد غذایی و دارویی آمریکا<sup>۲</sup> نیز می‌باشد. تهیه امولسیون‌های ساختاریافته از ارگانوژل‌ها، راهکار جدیدی برای بهبود محتوای چربی و تولید محصولات کم‌چرب است. ارگانوژل‌ها شبکه ژلی حاوی مولکول‌های ایجادکننده ژل هستند که حلال‌های آلی مانند بنزن، هگزان یا روغن‌های مایع خوراکی را از طریق واکنش‌های بین‌زنجیری مانند پیوندهای هیدروژنی و واندروالسی درون‌شبکه به‌دام‌می‌اندازند (Artur J. Martins, Cerqueira et al., 2017); Cerqueira, Fasolin, Cunha, & Vicente, 2016; Panagiotopoulou, Moschakis, & Katsanidis, 2016). در صنعت غذا به روغن‌های ساختاریافته اولئوژل گفته می‌شود (Dassanayake, Kodali, & Ueno, 2011). در سال‌های اخیر باتوجه به افزایش کاربردهای روغن‌های ساختاریافته، سیستم‌های منحصربه‌فرد ساختاردهی روغن نیز توسعه یافته‌اند. این استراتژی‌های جدید به‌طور گسترده‌ای براساس الزام‌های فرایندی به ۴ گروه اصلی پراکنده‌گی مستقیم<sup>۳</sup>، ساختاریافته غیرمستقیم<sup>۴</sup>،

<sup>5</sup> Oil sorption

<sup>6</sup> Biphasic system

<sup>7</sup> Structured emulsions

<sup>8</sup> Gelled emulsions

<sup>9</sup> Oil Bulking systems

<sup>10</sup> Oil bulking agents

<sup>11</sup> Konjac Glucomannan

<sup>1</sup> Fat replacer

<sup>2</sup> Food and Drug Administration (FDA)

<sup>3</sup> Direct dispersion

<sup>4</sup> Indirect structuring

غذایی و خصوصیات حرارتی برگشت‌پذیر<sup>۱</sup> در غلظت‌های پایین از جمله امتیازهای هیدروکلوئیدهاست (Leal, Calderon, Thivilliers, & Schmitt, 2007). ایران از جمله تولیدکنندگان برخی صمغ‌های گیاهی مانند صمغ کتیرا و صمغ فارسی در جهان است. کاربرد صمغ فارسی به دلیل طبیعی بودن، اطمینان از بازار تأمین، توجیه اقتصادی و بومی بودن در صنایع غذایی امکان‌پذیر است. از این رو، بررسی ویژگی‌های امولسیون‌کنندگی این صمغ در محدودهٔ وسیعی از سیستم‌های امولسیون غذایی توصیه می‌شود (رحیمی & عباسی, ۱۳۹۳; گل‌کار et al., 1394). صمغ فارسی، صمغی ترش‌شده شفاف است که از درخت بادامک، گونه‌ای از بادام‌کوهی با نام علمی *Amigdalus/اسکوپاریا*<sup>۲</sup> به دست می‌آید و به آن صمغ زدو<sup>۳</sup>، صمغ شیرازی یا صمغ آنگوم<sup>۴</sup> می‌گویند که کاربردهای تغذیه‌ای و دارویی همچون محرک اشتها، خردکنندهٔ سنگ مثانه دارد (رحیمی & عباسی, ۱۳۹۳; مظفری, حسینی, & حجت الاسلامی, ۱۳۹۴). پلی‌ساکاریدها به صورت جداگانه یا در ترکیب با هم می‌توانند برای ایجاد ساختارهای ژلی گوناگون که مناسب به دام‌انداختن قطره‌های روغن هستند، استفاده شوند و به عنوان عامل‌های حجم‌دهندهٔ روغن عمل نمایند (Ruiz-Capillas et al., 2013). خواص پلی‌ساکاریدهایی که به عنوان عامل‌های حجم‌دهنده در سیستم‌های ساختاریافته به کار می‌روند با مخلوط کردن آنها با سایر بیوپلیمرها بهبود می‌یابد. اینولین به عنوان یک پلی‌ساکارید دارای فواید سلامتی‌بخش و خواص تکنولوژیکی بسیار جالب مانند شیرین‌کنندهٔ کم‌کالری، عامل حجم‌دهنده و جایگزین چربی، توانایی برهمکنش با آب و جذب‌کنندهٔ آب، پایدارکنندهٔ کف و امولسیون، احساس دهانی چرب در محصولات جایگزین چربی می‌باشد که به عنوان عامل بافت‌دهنده به کار می‌رود. برخی محققان گزارش نمودند که ژل اینولین شبیه بافت چربی‌های جامد است و می‌تواند به عنوان مقلدهای چربی در محصولات غذایی مورد استفاده قرار گیرد (Bot, Erle, Vreeker, & Agterof, 2004). پلی‌ساکاریدهایی

سیستم به‌طور کامل به دلیل به‌دام‌افتادن فیزیکی فاز روغن در ماتریس ژله‌ای فاز آبی است. در واقع در این سیستم‌ها، قطره‌های پراکندهٔ روغن در ماتریس فاز آبی ژل شده با استفاده از شبکهٔ پلیمرها جاسازی شده‌اند (Patel & Dewettinck, 2016). در نهایت عامل‌های حجم‌دهندهٔ روغن تولیدشده می‌توانند به عنوان جایگزین چربی در محصولات غذایی عمل‌گرا به کار روند (A. M. Herrero, P. Carmona, F. Jiménez-Colmenero, & C. Ruiz-Capillas, Carmona, Ruiz-Capillas, 2014; Jiménez-Colmenero, & Herrero, 2013). مزایای این سیستم‌های ساختاریافته از لحاظ بهبود خواص تغذیه‌ای، کاهش میزان اسیدهای چرب اشباع، امروزه کاربرد روغن‌های ساختاریافته به عنوان جایگزین چربی در فرمولاسیون محصول‌های گوناگون افزایش یافته است (Patel & Dewettinck, 2016). در مورد سیستم‌های مختلف تهیهٔ روغن‌های ساختاریافته در فرمولاسیون و تثبیت محصولات گوشتی تازه، پخته‌شده و سوسیس (Zetzel, Marangoni, & Barbut, 2012)، سس‌ها، شکلات و خمیر شکلات (Patel, Rajarethinem, et al., 2014; Yilmaz & Patel, Rajarethinem, et al., 2014; Ögütçü, 2015)، نان، محصولات خمیری و فراورده‌های پختی (Jang, Bae, Hwang, Lee, & Lee, 2015; Kim et al., 2017; Mert & Demirkesen, 2016a, 2016b; Patel, Rajarethinem, et al., 2014) خامه‌ای (Bemer, Limbaugh, Cramer, Harper, & Maleky, 2016)، بستنی (Zulim Botega, Marangoni, Smith, & Goff, 2013) و خامه (ناجی‌طیسی, مهدیان, آریان‌فر, & ناجی‌طیسی, ۱۳۹۹) تحقیق‌های گسترده‌ای انجام شده است. در سیستم‌های ساختاریافتهٔ مورد استفاده در صنعت غذا به ترکیبات ژل‌کننده‌ای نیاز است که توانایی ایجاد شبکهٔ سه‌بعدی برای به‌دام‌انداختن روغن‌های خوراکی را داشته باشند. هیدروکلوئیدها یا صمغ‌ها می‌توانند این نقش را ایفا کنند (سوهان‌آجینی, موحد, & احمدی‌چنارین, ۱۳۹۶; عسگری‌ورجانی, صالحی‌فر, & شهریاری, ۱۳۹۶). آنها بیوپلیمرهای هیدروفیلیک با وزن مولکولی بالا می‌باشند (جباری‌ایزدی & معتزادگان, ۱۳۹۲; گل‌کار, نصیرپور, & کرامت, ۱۳۹۴). در دسترس بودن، دارا بودن درجهٔ

<sup>1</sup> Thermorversible

<sup>2</sup> *Amygdalus scoparia*

<sup>3</sup> Zedo gum

<sup>4</sup> Angum gum

روی هم‌زن مغناطیسی هیتردار (مدل IKA ساخت آلمان) قرار داده شد تا اینولین به‌طور کامل 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 درجه سانتی‌گراد) هم‌زده شد. جهت 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 درحین کار هم‌وژنایزر (اولتراتوراکس تی ۲۵، شرکت IKA، ساخت آلمان) با ۱۵۰۰ دور بر دقیقه به مدت دو 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 ۳±۱ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا آزمایش‌های مربوطه روی آنها انجام پذیرد (A. Herrero, P. Carmona, F. Jiménez-Colmenero, & C. Ruiz-Capillas, 2014).

جدول ۱- متغیرهای مستقل فرایند و مقادیر آنها

متغیرهای مستقل	نماد ریاضی	سطوح متغیرها		
		-۱	۰	+۱
درصد صمغ فارسی	X <sub>1</sub>	۱	۱/۷۵	۲/۵
درصد اینولین	X <sub>2</sub>	۰/۵	۱	۱/۵
درصد آلژینات	X <sub>3</sub>	۰/۵	۰/۷۵	۱

درصد متغیرهای مستقل در حجم کل محلول می‌باشد.

#### بهینه‌سازی

به‌منظور تهیه عوامل حجم‌دهنده روغن بر پایه اینولین، صمغ فارسی و آلژینات، روغن‌کنجد در درصد ثابت ۴۰ و اینولین، صمغ فارسی و آلژینات در سه سطح مطابق

همچون آلژینات، صمغ‌ها، دکسترین، الیگوساکاریدها<sup>۱</sup>، 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 پیچیده بین آنها بستگی دارد (A. M. Herrero et al., 2014).

به‌طور کلی هدف از این پژوهش تولید ماتریس‌های حجم‌دهنده روغن بر پایه پلی‌ساکاریدهای اینولین، صمغ فارسی و آلژینات سدیم و حاوی روغن‌کنجد و ارزیابی ماتریس‌های حجیم روغن تولیدشده از لحاظ درصد مهاجرت روغن، پایداری حرارتی، رنگ و تعیین پارامترهای بافت از قبیل سختی، قوام، چسبندگی، نیروی چسبندگی، ارائه مدل رگرسیونی مناسب و درنهایت انتخاب نمونه بهینه که دارای بیشترین پایداری حرارتی، کمترین نشت روغن، رنگ و خواص بافتی قابل قبول باشد چراکه اینها دلایلی هستند که می‌توان 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 آلدریج و مرک با درجه آزمایشگاهی تهیه شد.

##### آماده‌سازی مخلوط‌های پلی‌ساکاریدی

برای تهیه ۵۰ گرم نمونه ژل از روش (A. M. Herrero et al., 2014) (۲۰۱۴)، درصدهای موردنظر اینولین مطابق با جدول (۱) توزین شدند و در داخل بشر به آب دیونیزه مورد نیاز اضافه شدند. بشر داخل حمام آبی قرار داده شد تا دمای محلول به ۴۵±۱ درجه سانتی‌گراد رسانده‌شده و محلول شفاف به‌دست آید. آنگاه محلول

<sup>1</sup> Oligosaccharides

Accepted Article

### ارزیابی ماتریس‌های حجم‌دهنده روغن تعیین درصد مهاجرت روغن

به منظور ارزیابی ژل‌های تولیدشده، پایداری سیستم دوفازی ساختاریافته بایستی مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور مطابق روش (Yilmaz & Ögütçü, 2014) حدود ۱۵ گرم از هر نمونه در لوله‌های فالكون (با وزن a) ریخته شد و حدود ۱ ساعت در دمای محیط  $24 \pm 1$  درجه 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 استراحت دادن به نمونه‌ها، روغن جدا شده از ماتریس به داخل ظرف منتقل و مجدد لوله به همراه نمونه توزین گردید (c). درصد مهاجرت روغن از رابطه (۱) به دست آمد:

رابطه (۱)

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

### تعیین پایداری حرارتی

پایداری حرارتی مطابق روش (A. M. Herrero et al., 2014) تعیین شد. به این صورت که حدود ۱۰ گرم نمونه در داخل لوله‌های فالكون توزین گردید. سپس لوله‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۸۰ درجه 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 استراحت دادن به نمونه‌ها، روغن آنها جدا شده و بعد از توزین مجدد، پایداری ماتریس‌های تولیدی برحسب درصد وزن نمونه اولیه بیان گردید (A. M. Herrero et al., 2014).

### رنگ

رنگ یکی از شاخص‌های مهم در کیفیت، کنترل سریع طی فرایند و زمان نگهداری نمونه‌های تولیدشده می‌باشد. رنگ عوامل حجم‌دهنده روغنی تولیدشده، با دستگاه رنگ‌سنج (مدل WF-30، شرکت IWAVE، ساخت چین) ارزیابی شد. برای بررسی میزان تغییرات ایجاد شده در ویژگی‌های رنگی، از اصطلاح پارامترها یا شاخص‌های رنگی استفاده می‌شود. در این سیستم شاخص  $L^*$  که

جدول (۱) با نرم‌افزار مینی‌تب<sup>۱</sup> نسخه ۱۸ و با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM<sup>۲</sup>) طراحی شدند. با استفاده از طراحی سطح پاسخ نرم‌افزار مینی‌تب، ۲۰ تیمار مختلف براساس سطوح متغیرهای مورد بررسی مطابق جدول (۲) مشخص شدند. پس از انجام آزمون‌های مورد نظر روی نمونه‌های تولیدشده به منظور دستیابی به سطوحی از متغیرهای مستقل که در نتیجه به کارگیری آنها بهترین فرمولاسیون از لحاظ بیشترین پایداری حرارتی، ثبات امولسیون و بهترین رنگ و بافت به عنوان پاسخ، بهینه‌سازی انجام شد. شرایط بهینه متغیرهای مستقل براساس هدف بیشینه یا کمینه مقدار متغیر پاسخ تعیین شد.

جدول ۲- طراحی آزمایش‌ها

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

Stdorder: ترتیب انجام آزمایش‌ها، Runorder: ترتیب تصادفی 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  $X_3$  به ترتیب درصدهای صمغ فارسی، اینولین و آلزینات در کل محلول می‌باشند.

<sup>1</sup> Minitab

<sup>2</sup> Response Surface Methodology

ژل‌ها طی نگهداری که سطح زیر منحنی نیرو-زمان در ناحیه مثبت نمودار می‌باشد. سختی، بالاترین نقطه در نمودار نیرو-زمان می‌باشد که می‌تواند برحسب نیوتن بر گرم بیان شود. نیروی چسبندگی، نیروی لازم برای جدا شدن پروپ از نمونه و یا بیشترین نیروی منفی تولیدشده در طول برگشت و خارج شدن پروپ از ظرف اندازه‌گیری می‌باشد (نقطه حداقل نمودار). چسبندگی مساحت ناحیه منفی نمودار نمادی از انسجام بافت محصول است (T • rinh & Glasgow, Bourne, 1978; 2012).

### آنالیز آماری

در این پژوهش آنالیز آماری و تجزیه و تحلیل داده‌های مربوطه با استفاده از روش سطح پاسخ براساس طرح مرکب مرکزی<sup>۱</sup> با کمک نرم‌افزار مینی‌تب صورت گرفت. ۶ تکرار نقطه مرکزی برای تخمین خطای آزمایش و محاسبه تکرارپذیری استفاده شدند. براساس آنالیزها برای هر کدام از پاسخ‌های موردارزیابی نیز یک مدل چندمتغیره برای پیش‌بینی اثر متغیرها تعریف شد. به منظور 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. رابطه مدل و تعیین شرایط عملیاتی بهینه به‌وسیله نمودارهای سطح پاسخ انجام پذیرفت. در نهایت 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

نشان‌دهنده روشنایی (سفیدی یا سیاهی) و بین صفر تا ۱۰۰ متغیر است،  $a^*$  (از سبز تا قرمز) و  $b^*$  درجه آبی یا زردبودن را نشان می‌دهند و بین ۱۲۰- تا ۱۲۰+ متغیر هستند و  $c$  شاخص کروما<sup>۱</sup> و زاویه هیو<sup>۲</sup> که از پارامترهای رنگی فوق به‌دست می‌آیند، اندازه‌گیری شدند. شاخص کروما نشان‌دهنده میزان اشباع‌شدگی و یا شدت رنگ است که براساس رابطه (۲) به‌دست می‌آید:

رابطه (۲)

$$c = \frac{1}{2}(a^2 + b^2)$$

همچنین زاویه هیو شاخصی از رنگ ماده غذایی است که زاویه صفر یا ۳۶۰ درجه نمایانگر رنگ قرمز و زاویه‌های ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ به ترتیب نشان‌دهنده رنگ‌های زرد، سبز و آبی می‌باشد (رابطه ۳).

رابطه (۳)

$$\text{زاویه هیو} = \tan^{-1}\left[\frac{b}{a}\right]$$

### تعیین پارامترهای بافت‌سنجی

سفتی نمونه‌های تولیدشده با دستگاه آنالیز بافت (مدل Stable-Microsyst, PA-xt-plus، ساخت انگلستان) و با پروپ صفحه‌ای با قطر ۴۰ میلی‌متری انجام شد. از آنجا که تست اکستروژن پس‌رو<sup>۳</sup> برای ارزیابی بافت غذاهای نیمه‌جامد مناسب است (Giacintucci et al., 2018) از این آزمون برای مقایسه بافت نمونه‌ها استفاده گردید. در این آزمایش نمونه‌های تولیدشده که در یخچال نگهداری شدند برای مدت کوتاهی جهت هم‌دمایی با محیط (دمای آزمایشگاه  $24 \pm 1$  درجه 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. پروپ با سرعت ۱ میلی‌متر بر ثانیه حرکت کرد و تا ۵۰ درصد ارتفاع نمونه مسیر را پیمود. قوام<sup>۴</sup> (گرم×ثانیه)، سختی<sup>۵</sup> (گرم)، نیروی چسبندگی<sup>۶</sup> (گرم)، چسبندگی<sup>۷</sup> (گرم×ثانیه) از نتایج آزمون به‌دست‌آمد. قوام، شاخصی برای تعیین پایداری

<sup>1</sup>Choroma

<sup>2</sup> Hue angel

<sup>3</sup> Back- Extrusion

<sup>4</sup> Consistency

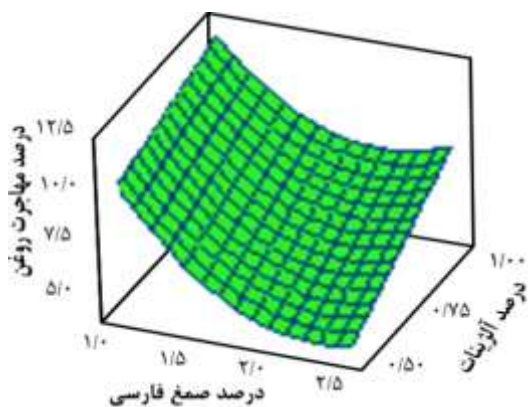
<sup>5</sup> Firmness

<sup>6</sup> Adhesive Force

<sup>7</sup> Cohesiveness (g.s)

<sup>8</sup> Central Composit Design(CCD)

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 حجم‌دهنده روغن ایجادشده، توانایی بیشتری در به‌دام‌انداختن روغن درون شبکهٔ سه‌بعدی و در واقع بهترین ظرفیت اتصال روغن‌مابِع را داشت. با توجه به 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 با استحکام مکانیکی بالاتر شده و ساختارهایی با شبکهٔ فشرده‌تر ایجاد می‌کند. استحکام مکانیکی عوامل حجم‌دهندهٔ تولیدشده به ظرفیت اتصال روغن در نمونه مرتبط است و مقاومت مکانیکی بالاتر منجر به ظرفیت اتصال روغن بهتر است. کمترین پایداری و بیشترین میزان نشت روغن (درصد مهاجرت روغن) در نمونه‌ای با کمترین میزان صمغ فارسی به‌دست‌آمد.



شکل ۱- نمودار سطح پاسخ درصد مهاجرت روغن

#### پایداری حرارتی

شکل (۲) تأثیر غلظت پلی‌ساکاریدها را بر پایداری حرارتی در شرایطی که اینولین در نقطهٔ مرکزی ۱ درصد ثابت نگاه‌داشته 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

درصد مهاجرت روغن یا نشت روغن<sup>۱</sup> 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 نگاه‌داشته 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 کمترین 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 روغن‌مابِع توسط صمغ اشغال شد و ویسکوزیتهٔ فاز آبی (فاز پیوسته) افزایش یافت که باعث محدودیت حرکت قطره‌های روغن و عدم پیوستگی آن شد. (Meng, Qi, Guo, Wang, & Liu, 2018a) در مطالعه‌ای بر تشکیل روغن‌های ساختاریافته بر پایهٔ سیستم امولسیون بی‌جان کردند که افزایش غلظت هیدروکسی پروپیل متیل سلولوز (HPMC)، 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 مطالعهٔ دیگری که اثر ویسکوزیته‌های مختلف HPMC و MC<sup>۳</sup> بر میزان نشت روغن را بررسی می‌کردند، نتیجه گرفتند اولئوژل‌های حاصل از ویسکوزیتهٔ بیشتر HPMC و MC توانایی بیشتری در نگهداری روغن داشتند چرا که با افزایش ویسکوزیتهٔ فاز پیوسته، حرکت قطره‌های روغن محدودشده و پدیدهٔ پیوستگی در امولسیون سپس اولئوژل تولیدی رخ نداد (Meng, Qi, Guo, Wang, & Liu, 2018b).

<sup>1</sup> Oil loss (%)

<sup>2</sup> Hydroxypropyl methylcellulose

<sup>3</sup> Methylcellulose

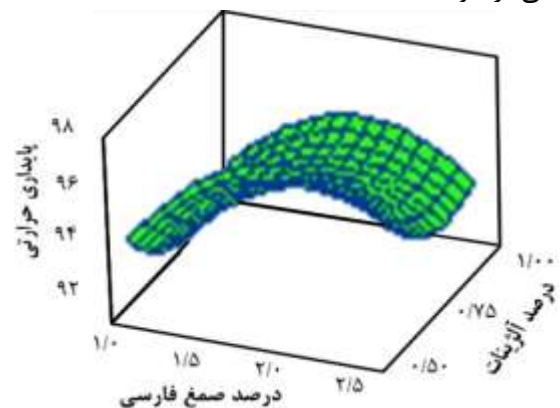
طی سردشدن، ویسکوزیتهٔ محلول تقریباً به حالت اولیهٔ خود بازگشت که نشان‌دهندهٔ عدم تخریب ساختار مولکولی صمغ در اثر اعمال حرارت است. همچنین اندازهٔ قطره‌های امولسیون پس از حرارت‌دهی در حضور صمغ فارسی در حداقل مقدار باقی‌ماند (خالصی 1395, et al.).

باین ترتیب 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، عدم تخریب ساختار مولکولی برای توجیه بیشترین پایداری در نمونه‌ای با بیشترین غلظت صمغ فارسی دلایل موجهی محسوب می‌شوند.

### رنگ

باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده و شکل (۳) روغن‌کنجد با دارابودن مقادیر شاخص‌های  $L^*$  (۸۷/۷۶) و  $b^*$  (۲۵/۳۷) به‌ترتیب رنگ زرد شفاف‌تری 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. در اصل رنگ نمونه‌ها در نتیجهٔ پراکندگی نور منعکس‌شده به‌وسیلهٔ گلبول‌های چربی و ذرات کلئیدی 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 (گل‌کار 1394, et al.). 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 به‌دام‌افتاده‌اند.

میزان پایداری حرارتی روند افزایشی و از ۲ تا ۲/۵ درصد وزنی-وزنی صمغ فارسی این روند کاهشی بود. باتوجه به نتایج با اعمال حرارت ۸۰ درجهٔ سانتی‌گراد، درصد مهاجرت روغن (نشت روغن) نیز افزایش پیدا کرد. افزایش دما و شوک حرارتی می‌تواند منجر به شکستن ساختاری مولکول‌ها، افزایش آزادی و تحرک مولکول‌ها، جاری‌شدن آنها و در نتیجه کاهش گرانروی و متعاقب آن کاهش پایداری امولسیون شود که با این کاهش پایداری، درصد نشت روغن نیز افزایش یافت (Marangoni & Edmund, 2012). از آنجاکه توانایی تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین پلی‌ساکاریدها به شدت تحت تأثیر شرایط دمایی مورد استفاده طی ۲۴ ساعت ابتدایی تشکیل ژل است (Davidovich-Pinhas, Barbut, & Marangoni, 2015; سلطانی‌زاده & گلی, ۱۳۹۸) و باتوجه به 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 شبکهٔ ژلی باعث به جریان درآمدن ماتریس‌ها شدند. البته تفاوت بین تیمارها معنی‌دار نبود ( $P \geq 0.05$ ).



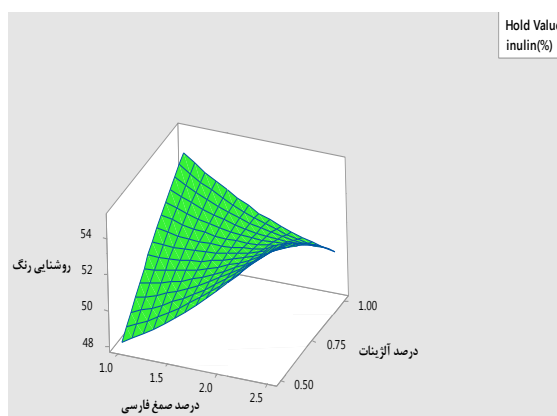
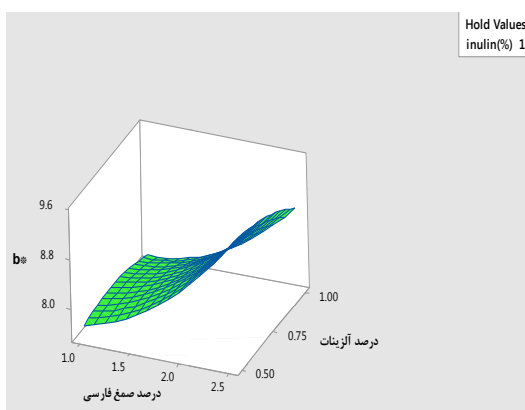
شکل ۲- نمودار سطح پاسخ متغیر پایداری حرارتی

در بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی صمغ فارسی که توسط (خالصی، کندخایی, & عمادزاده, ۱۳۹۵) (۱۳۹۵) انجام شد با افزایش غلظت صمغ، پایداری امولسیون افزایش یافت. افزایش دما از ۳۰ درجهٔ سانتی‌گراد به ۹۰ درجهٔ سانتی‌گراد، منجر به کاهش برهم‌کنش بین زنجیره‌های شد درحالی‌که قابلیت جذب آب صمغ با تغییرات دما تقریباً ثابت باقی‌مانده بود. بعد از اتمام عمل حرارت‌دهی،



روشنایی و زردی به ساختار غیرشفاف و سفیدرنگ ماتریس‌های تولیدشده از آلژینات و صمغ فارسی مرتبط باشد. (عبداللهی، گلی، & زاده، ۱۳۹۸) (۱۳۹۸) 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.

البته رنگ ممکن است تحت‌تأثیر رنگ صمغ فارسی استفاده‌شده نیز باشد از آنجاکه صمغ فارسی مورد استفاده رنگ‌بری‌نشده و با حداقل فراوری مصرف‌شده، روی رنگ نمونه‌های تولیدی تأثیرگذار بوده است. اینولین روی رنگ نمونه تأثیری نداشته است. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده برای زاویه 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



شکل ۳- نمودارهای سطح پاسخ متغیر روشنایی و زردی رنگ

است. با توجه به 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 حجم‌دهنده روغن مربوط به اتصال قوی قطره‌های امولسیون 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 تشکیل شده و پس از تبدیل به ماتریس‌های حجم‌دهنده روغن، ضمن تشکیل ساختار ژلی پایدارتر، قوام بالاتری ایجاد کرد. البته با توجه به بررسی‌های رئولوژیکی ماتریس‌های حجم‌دهنده 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 (مرادعباسی، گلی، & فیاض، ۱۳۹۹). همچنین افزایش

### ویژگی‌های بافتی نمونه‌های تولیدشده

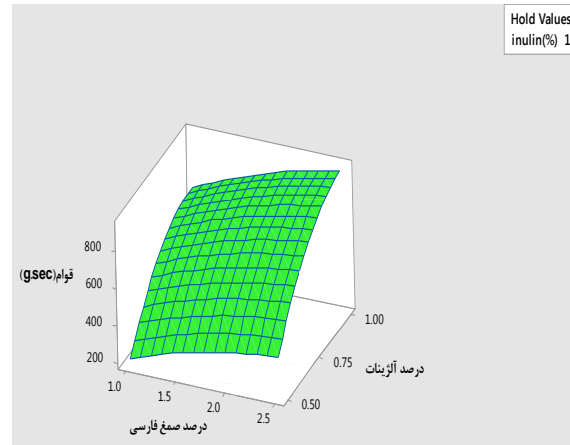
ساختار ژل مانند ماتریس‌های حجم‌دهنده روغن در نتیجه به‌دام‌افتادن روغن‌کنجد (روغن مایع گیاهی) در یک شبکه ساختاریافته‌ای از زیست‌پلیمرهای به‌کاررفته حاصل شد. بنابراین رفتار بافتی این ماتریس‌های پلی‌ساکاریدی با روغن‌کنجد بسته به غلظت پلی‌ساکاریدهای به‌کاررفته در فرمولاسیون آنها متفاوت بود. در ادامه نتایج مربوط به ۴ پارامتر قوام، سختی، نیروی چسبندگی و چسبندگی نمونه‌ها مشاهده می‌شود. البته در بررسی وضعیت ظاهری ماتریس‌های حجم‌دهنده 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 به‌طور کامل مشهود بود.

### قوام

در اکستروژن پس‌رو، نمونه در حد فاصل بین پروپ و دیواره ظرف تحت فشار قرار گرفت تا به جریان درآید. در واقع قوام شاخصی برای تعیین پایداری ژل‌ها طی نگهداری

فرصت کافی مورد نیاز است تا زمان مناسب برای تکمیل برهم کنش‌های بین مواد تشکیل‌دهنده ماتریس‌ها تأمین گردد (Davidovich-Pinhas et al., 2015). درحقیقت می‌توان گفت تعادل بین برهم کنش‌های 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 از نظر پیوند هیدروژنی با آب، ممکن است تفاوت خصوصیات ساختاری ماتریس‌ها را توضیح دهد (A. M. Herrero et al., 2014). به نظر می‌رسد افزایش میزان غلظت دو زیست‌پلیمر آلژینات سدیم و صمغ فارسی عاملی برای تقویت زنجیره‌های داخلی پلیمر به دلیل تعداد بیشتر پیوندهای هیدروژنی باشد که ایجاد نقاط اتصال به هنگام تشکیل ژل را افزایش‌داده و شبکه ژلی قوی‌تر تشکیل می‌دهند (سلطانی‌زاده & گلی، ۱۳۹۸). افزایش ویسکوزیته محیط نیز سبب محدودیت حرکت قطره‌های روغن شده و به پایداری امولسیون کمک می‌کند. وجود صمغ فارسی و افزایش غلظت آن به‌واسطه افزایش ماده 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 از طریق باندشدن آب و نیز برهم‌کنش بین گلبول چربی با شبکه ژلی به‌وسیله صمغ نیز نسبت داد (Davidovich-Pinhas, Barbut, & Marangoni, 2016; شریعتی، آزادمردمیرچی، & شیرانی‌راد، ۱۳۹۸; مرادعباسی et al., 1399). در واقع مقاومت ژل نسبت به نفوذ پروپ دستگاه بافت‌سنج با افزایش صمغ فارسی و افزایش ویسکوزیته بیشتر شد، در نتیجه سختی بافت نیز افزایش یافت. (Yilmaz & Ögütçü, 2014) (۲۰۱۴) افزایش سختی اولئوژل‌های تولیدشده از موم زنبورعسل را با افزایش غلظت ارگانوژلاتورها<sup>۱</sup> کاربردی خود گزارش کردند. (Zetzl et al., 2012) (۲۰۱۴) افزایش غلظت هیدروکلوئید را عاملی اثرگذار بر سفتی بافت ژل‌های تولیدی دانستند. همچنین (Patel, Dumlu, et al., 2015) و (Patel, Rajarethinem, et al., 2015)

ویسکوزیته فاز پیوسته در اثر افزایش غلظت صمغ فارسی، همانند اثر امولسیفایر باعث محدودشدن حرکت قطره‌های روغن و تشکیل شبکه قوی‌تر در فاز آبی (پیوسته) امولسیون می‌شود که در پایداری شبکه مؤثر است.



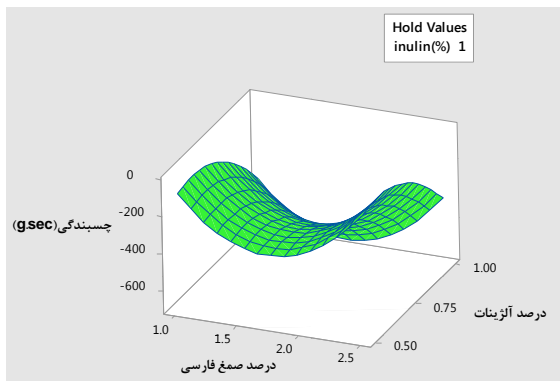
شکل ۴- نمودار سطح پاسخ متغیر قوام

#### سختی

سختی ماتریس‌های حجم‌دهنده روغن، میزان مقاومت ژل و میزان فشردگی ساختار شبکه ژل را نشان می‌دهد. باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده و شکل (۵)، میزان سختی نمونه حاوی بیشترین مقدار صمغ فارسی و آلژینات سدیم بیشتر از نمونه‌های دیگر و معنی‌دار بود ( $P \leq 0.05$ ). در واقع نمونه دارای سختی بیشتر، ساختار شبکه مستحکم‌تر در مقایسه با سایر نمونه‌ها داشت که این افزایش سختی بافت می‌تواند مربوط به تشکیل یک لایه سطحی ضخیم‌تر در اطراف حفره‌ها در حضور صمغ فارسی باشد. در عامل-های حجم‌دهنده روغنی، ساختار ژل مانند نمونه‌ها در نتیجه به‌دام‌افتادن روغن‌کنجد در یک شبکه ساختاریافته‌ای از زیست‌پلیمرهاست، بنابراین با افزایش غلظت زیست‌پلیمرهایی چون صمغ فارسی و آلژینات سدیم، مجموع غلظت کل نیز افزایش یافت که در نهایت منجر به افزایش 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 شبکه ژلی ساختاریافته مؤثر می‌دانند (عبداللهی et al., 1398). برای تشکیل و توسعه پیوندهای هیدروژنی

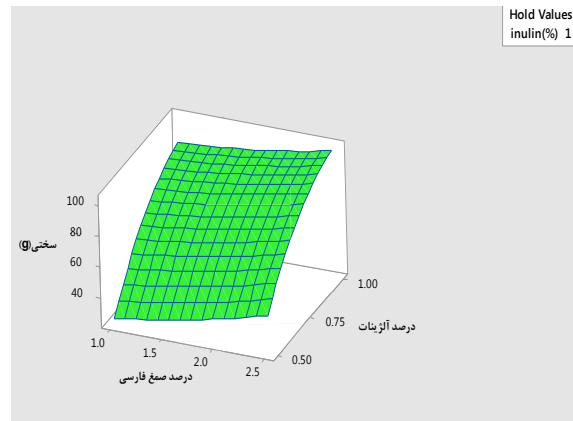
<sup>1</sup> Organogelators

شبهه ژل و کمک به خواص ویسکوالاستیک دانست که با نتایج (Meng et al., 2018a) (۲۰۱۸) نیز قابل توجه است.



شکل ۶- نمودار سطح پاسخ متغیر چسبندگی

2015) (۲۰۱۵) دریافتند افزایش غلظت زیست‌پلیمرها باعث افزایش قدرت ژل تولیدی می‌شود.



شکل ۵- نمودار سطح پاسخ متغیر سختی

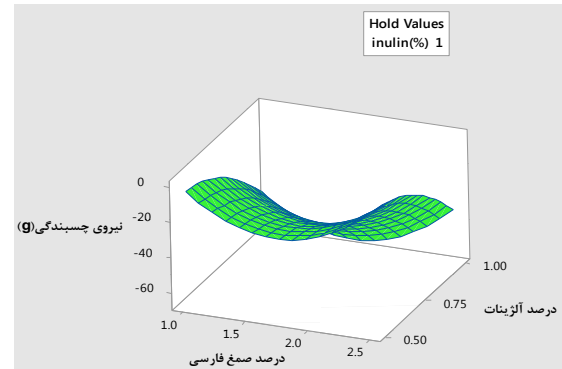
با افزایش غلظت زیست‌پلیمرها، قطره‌های روغن توسط میزان بیشتری از آلژینات سدیم و صمغ فارسی احاطه شده و حرکت آنها محدود می‌شود. علاوه بر این افزایش هیدروکلوئیدی مثل صمغ فارسی سبب افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته، تثبیت امولسیون و تشکیل شبهه قوی تر و در نهایت مانع از سرعت همبستگی بین ذرات روغن و رفتار شبه جامد در امولسیون می‌شود (Meng et al., 2018b). عکس این حالت نیز یعنی کاهش چسبندگی باعث کاهش استحکام شبهه ژلی و افزایش حالت پلاستیکی ژل‌ها خواهد شد (عبداللهی et al., 1398). چسبندگی به کار مورد نیاز برای غلبه بر نیروهای جاذبه بین سطح ماده غذایی و موادی که در تماس با آنها هستند، اشاره می‌کند (ضامنی، کاشانی‌نژاد، & صالحی، ۱۳۹۴). 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 نانوائی مناسب و برای محصولاتی مانند ماکارانی، پاستا، مغز نان و برخی محصولات گوشتی یک ویژگی منفی تلقی می‌شود (ضامنی، کاشانی‌نژاد، اعلی، صالحی، & شیروانی، ۱۳۹۴). باتوجه به هدف بعدی پژوهش در استفاده از عوامل حجم‌دهنده روغن تولیدی، در محصولات قنادی، افزایش چسبندگی نمونه حاوی بیشترین درصد صمغ

#### چسبندگی و نیروی چسبندگی

باتوجه به نتایج به دست آمده و شکل (۶) میزان چسبندگی در ماتریس تولید شده با بالاترین حد صمغ فارسی و کمترین میزان آلژینات بیشتر از نمونه‌های دیگر بود، اما معنی‌دار نبود. همچنین مطابق نتایج به دست آمده (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. به طوری که 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 می‌تواند افزایش یابد. درباره چسبندگی نمونه‌ها می‌توان گفت که نیروی چسبندگی، نیروی لازم جهت غلبه بر نیروی جاذبه سطحی بین ذرات است، لذا هرچه ساختار ژلی عامل‌های روغنی تولید شده 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

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 بهینه 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 بازی‌کننده 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 پیش‌بینی‌شده نشت روغن، پایداری حرارتی، روشنایی و زردی رنگ و متغیرهای پاسخ آزمون اکستروژن پس‌رو ماتریس‌های حجم‌دهنده روغن تولیدشده در **جدول (۳)** نشان داده شده است. مقادیر ضریب تبیین نیز برای هرکدام درج شده است.

فارسی حاکی از آن است که می‌توان با انتخاب مقادیر بهینه صمغ فارسی را به‌عنوان اصلاح‌کننده بافت در محصولاتی که پارامتر چسبندگی برای آنها مهم است استفاده نمود.



شکل ۷- نمودار سطح پاسخ متغیر نیروی چسبندگی

### مدل رگرسیونی

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و

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

R <sup>2</sup> -adj (درصد)	R <sup>2</sup> (درصد)	مدل	منبع
۵۲/۰۹	۸۲/۸۹	$0.0188 + 1.5158x_1 - 11.33x_2 - 3.49x_3 - 3.31x_1^2 + 6.38x_2^2 + 2.32x_3^2 - 1.13x_1x_2 - 2.45x_1x_3 + 0.67x_2x_3$	پایداری حرارتی
۳۰/۲۲	۷۰/۰۳	$4.4 - 4.3x_1 + 3.7x_2 + 8.3x_3 + 3.62x_1^2 - 1.92x_2^2 + 0.1x_3^2 + 3.32x_1x_2 + 3.07x_1x_3 - 7.4x_2x_3$	نشت روغن
۵۹/۳۷	۸۵/۴۹	$3.4/4 + 1.2/6 \cdot x_1 - 1.4/2x_2 + 2.7/2x_3 + 1/1 \cdot x_1^2 + 1.0/37x_2^2 - 5/3x_3^2 - 4/75x_1x_2 - 1.4/23x_1x_3 + 7/10 \cdot x_2x_3$	L*
۸۸/۶۱	۹۵/۹۳	$4/31 - 1/0.3x_1 + 4/10 \cdot x_2 + 5/26x_3 + 0/57 \cdot x_1^2 - 1/738x_2^2 - 2/12x_3^2 + 0/541x_1x_2 - 0/691x_1x_3 - 1/623x_2x_3$	b*
۵۵/۹۴	۸۴/۲۶	$-112 + 1.9/4x_1 - 8.8x_2 + 4.36x_3 + 3/4x_1^2 + 5.8/1x_2^2 - 1.86x_3^2 - 1.3/1x_1x_2 - 9/3x_1x_3 - 1.9/8x_2x_3$	سختی
۱۴/۲۲	۵۱/۱۷	$-8.43 - 1.737x_1 + 2.541x_2 + 2.37 \cdot x_3 + 4.95x_1^2 - 1.234x_2^2 - 2.02 \cdot x_3^2 + 2.4x_1x_2 + 1.4x_1x_3 - 4.1x_2x_3$	نیروی چسبندگی
۶۱/۵۸	۸۶/۲۸	$-8.78 + 3.378x_1 - 1.129x_2 + 3.817x_3 - 5.8x_1^2 + 5.87x_2^2 - 1.926x_3^2 - 7.3x_1x_2 + 1.14x_1x_3 - 1.25x_2x_3$	قوام
۲۶/۸۸	۵۴/۹۸	$-3.3 - 1.38x_1 + 2.01x_2 + 1.13x_3 + 3.6/9x_1^2 - 1.09/1x_2^2 - 1.49x_3^2 + 7/6x_1x_2 + 6/6x_1x_3 + 1.5x_2x_3$	چسبندگی

x<sub>1</sub> صمغ فارسی، x<sub>2</sub> اینولین، x<sub>3</sub> آلژینات، R<sup>2</sup>: ضریب تبیین و R<sup>2</sup>-adj: ضریب تبیین تعدیل‌شده

پیوستگی به‌ترتیب با مقادیر (R<sup>2</sup>=۵۴/۹۸) و (R<sup>2</sup>=۵۱/۱۷) به‌ترتیب به‌ترتیب با مقادیر 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،

باتوجه به **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،

Accepted Article

باتوجه به نتایج جدول (۴)، اثرات خطی درصد صمغ فارسی روی  $b^*$ ، درصد آلژینات روی تغییرات سختی و قوام، اثرات درجه دوم اینولین $\times$ اینولین روی  $b^*$  و اثرات متقابل درصد صمغ فارسی $\times$ آلژینات روی تغییرات روشنایی رنگ ( $L^*$ ) ماتریس‌های تولیدی معنی‌دار بود ( $P \leq 0.05$ ).

به اندازه کافی بزرگ نیست که بتواند برآورد دقیقی از روابط بین متغیرها ارائه دهد به این دلیل پارامترهایی از قبیل  $R^2$  و  $R^2$ -adj می‌تواند تفاوت زیادی داشته باشد. برای به دست آوردن برآورد دقیق باید از نمونه‌های بیشتر (به طور معمول ۴۰ یا بیشتر) استفاده شود.

#### آنالیز واریانس فاکتورهای رنگ، سختی و قوام

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

منبع تغییرات	$L^*$		$b^*$		سختی		قوام		پایداری حرارتی		نشت روغن	
	P-Value	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value	F-Value
رگرسیون	۰/۱۰۲	۳/۲۷	۰/۰۰۶	۱۳/۱۰	۰/۱۲۱	۲/۹۷	۰/۰۹۱	۳/۴۹	۰/۱۴۴	۲/۶۹	۰/۴۰۶	۱/۳۰
اثرات خطی	۰/۱۸۵	۲/۳۹	۰/۰۰۱	۳۱/۶۰	۰/۰۲۳	۸/۱۲	۰/۰۱۷	۹/۴۹	۰/۱۱۴	۳/۳۳	۰/۲۵۵	۱/۸۵
درصد صمغ فارسی	۰/۳۳۱	۱/۱۶	۰/۰۰۰	۸۴/۴۴	۰/۲۴۷	۱/۷۲	۰/۰۹۹	۴/۱۰	۰/۱۰۱	۴/۰۳	۰/۱۱۷	۳/۵۸
درصد اینولین	۰/۰۶۱	۵/۷۸	۰/۰۸۰	۴/۸۱	۰/۵۰۱	۰/۵۲	۰/۱۶۱	۲/۷۰	۰/۹۶۷	۰/۰۰	۰/۶۸۲	۰/۱۹
درصد آلژینات	۰/۶۴۴	۰/۲۴	۰/۰۶۵	۵/۵۴	۰/۰۰۵	۲۲/۱۱	۰/۰۰۶	۲۱/۶۷	۰/۰۵۸	۵/۹۷	۰/۲۳۹	۱/۷۸
اثرات درجه دوم	۰/۲۸۹	۱/۶۶	۰/۱۰۰	۳/۶۲	۰/۶۴۸	۰/۵۹	۰/۰۸۵	۰/۶۴۸	۰/۰۸۴	۴/۰۴	۰/۳۱۶	۱/۵۳
صمغ $\times$ صمغ	۰/۶۷۹	۰/۱۹	۰/۰۹۹	۴/۱۰	۰/۸۸۶	۰/۰۲	۰/۱۰	۰/۸۸۶	۰/۰۵۹	۵/۹۶	۰/۴۲۶	۰/۷۵
اینولین $\times$ اینولین	۰/۱۲۵	۳/۳۸	۰/۰۴۱	۷/۵۳	۰/۳۰۳	۱/۳۲	۰/۳۰۳	۱/۹۱	۰/۰۹۰	۴/۳۸	۰/۰۹۶	۴/۲۱
آلژینات $\times$ آلژینات	۰/۸۲۵	۰/۰۵	۰/۷۰	۰/۸۲۵	۰/۴۰۱	۰/۸۴	۰/۳۰۸	۱/۲۹	۰/۱۱۶	۳/۶۱	۱/۰۰۰	۰/۰۰
اثرات متقابل	۰/۰۴۴	۵/۷۶	۰/۰۸۱	۴/۱۰	۰/۸۸۲	۰/۲۱	۰/۱۳	۰/۸۸۲	۰/۹۳۶	۰/۷۱	۰/۶۹۰	۰/۵۱
صمغ $\times$ اینولین	۰/۰۷۶	۴/۹۶	۰/۰۷۳	۵/۱۱	۰/۵۲۵	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۵۲۵	۰/۶۶۷	۰/۹۶	۰/۳۹۲	۰/۸۸
صمغ $\times$ آلژینات	۰/۰۲۱	۱۱/۱۳	۰/۲۰۸	۲/۰۸	۰/۸۱۷	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۸۱۷	۰/۳۳۷	۱/۱۳	۰/۶۸۳	۰/۱۹
اینولین $\times$ آلژینات	۰/۳۲۴	۱/۲۰	۰/۰۷۳	۵/۱۱	۰/۷۴۵	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۷۴۵	۰/۸۰۶	۰/۰۴	۰/۵۲۱	۰/۴۸
باقی‌مانده خطا	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
کل	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

۱/۳۱۸۲ درصد صمغ فارسی قابل حصول است. نرم‌افزار شرایط بهینه متغیرهای مستقل را براساس هدف حداکثرسازی یا حداقل‌سازی متغیرهای پاسخ تعیین کرد. در این پژوهش، شرایط بهینه براساس بیشینه مقدار متغیر پاسخ قوام، شاخص ویسکوزیته، چسبندگی، نیروی چسبندگی، پایداری حرارتی و فاکتورهای  $L^*$  و  $b^*$  مربوط به رنگ و کمیته 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 به دست آمدند. مقادیر پیش‌بینی شده مشخصه‌های عوامل حجم‌دهنده روغن در این شرایط بهینه و نتایج آن در

#### شرایط بهینه تهیه ماتریس‌های حجم‌دهنده روغن

استفاده از تابع مطلوبیت یکی از قدیمی‌ترین تکنیک‌ها در رتبه‌بندی گزینه‌های یک مسئله تصمیم‌گیری چندشاخصه می‌باشد. با حل مسئله به روش تابع مطلوبیت راه‌حلی با حداکثر رضایت بخشی برای تصمیم‌گیرنده حاصل خواهد شد. با استفاده از 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 حجم‌دهنده روغن ارائه شد. این راه‌حل‌های پیشنهادی با استفاده از تابع مطلوبیت نشان داد که شرایط بهینه تولید ماتریس‌های حجم‌دهنده روغن در ۱/۵ درصد اینولین، ۰/۹۶۴۶ درصد آلژینات و

در این پژوهش عوامل حجم‌دهنده روغن بر پایه پلی‌ساکاریدهای اینولین، صمغ فارسی و آلژینات هرکدام در سه سطح به همراه روغن کنجد در درصد ثابت ۴۰ تهیه شدند. از روش دوفازی ساختاریافته برای تولید آنها استفاده شد. اهمیت این روش نه تنها در سادگی و کوتاه بودن مراحل تولید است بلکه با بررسی ویژگی‌های ماتریس‌های حجم‌دهنده روغن تولید شده می‌توان بر قابلیت یا عدم قابلیت تولید ماتریس‌های حجم‌دهنده روغن بر پایه سیستم دوفازی ساختاریافته دست یافت. همچنین عدم حرارت‌دهی و عدم استفاده از امولسیفایرهای صنعتی و استفاده از زیست‌پلیمرهای متنوع در تهیه این ماتریس‌ها از بخش‌های قابل توجه این سیستم‌هاست. پاسخ‌های سه متغیر با درصدهای متفاوت با استفاده از روش سطح پاسخ با در نظر گرفتن تابع مطلوبیت بهینه‌سازی شدند. دستیابی به بیشترین پایداری حرارتی، کمترین درصد مهاجرت روغن، بهترین رنگ و ویژگی‌های بافتی مطلوب به عنوان پاسخ در بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد اثرات خطی درصد صمغ فارسی روی  $b^*$ ، درصد آلژینات روی تغییرات سختی و قوام، اثرات درجه دوم اینولین  $\times$  اینولین روی  $b^*$  و اثرات متقابل درصد صمغ فارسی  $\times$  آلژینات روی تغییرات روشنایی رنگ ( $L^*$ ) ماتریس‌های تولیدی معنی‌دار ( $P \leq 0.05$ ) بود. سختی، قوام، روشنایی و زردی رنگ با ضرایب تبیین بالای ۸۵ برازش خوبی از مدل نسبت به داده‌های آزمایشی را نشان دادند. نمونه بهینه در غلظت‌های درصدی صمغ فارسی (۱/۳۱۸۲)، اینولین (۱/۵) و آلژینات سدیم (۰/۹۶۴۶) به دست آمد.

مرحله بعدی پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. از آنجایی که در بهینه‌سازی تولید عوامل حجم‌دهنده روغن هیچ کدام از فاکتورها از اهمیت بیشتری نسبت به سایر متغیرهای پاسخ برخوردار نبود، وزن و اهمیت تمام متغیرها یکسان در نظر گرفته شد. به منظور بررسی صحت شرایط بهینه به دست آمده، 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 پیش‌بینی شده 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) به دست آمده از این آزمون بیانگر این است که بین مدل‌ها و مشاهده‌های تجربی تفاوت معنی‌داری وجود ندارد و کارایی مدل‌ها را به خوبی اثبات می‌کند.

جدول ۵- مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها و

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

## نتیجه‌گیری

## منابع

- جباری‌ایزدی، آ. و معتزادگان، ع. (۱۳۹۲). بررسی کاربرد صمغ‌ها به عنوان جایگزین چربی در کیک‌ها. Paper presented at the 21<sup>st</sup> national congress of food science and technology: investigating the use of gums as a fat substitute و یکمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران <https://civilica.com/doc/235660>.
- خالصی، ه. کدخدایی، ر. و عمادزاده، ب. (۱۳۹۵). بررسی اثر صمغ فارسی و فرایند حرارتی بر ویژگی‌های امولسیون پایدار شده با کسانتره پروتئین آب پنیر. فناوری‌های جدید در صنعت غذا، ۴(۱)، ۱۰۳-۱۱۹. doi:<https://doi.org/10.22104/jift.2016.363>
- رحیمی، س. و عباسی، س. (۱۳۹۳). تعیین برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و ژل‌شوندگی صمغ فارسی. فناوری‌های جدید در صنعت غذا، ۱(۴)، ۱۳-۲۷. doi:<https://doi.org/10.22104/jift.2014.47>

- سلطانی‌زاده، ن. & گلی، س. (۱۳۹۸). بررسی اثر سرعت سرد کردن و غلظت ارگانوژلاتور بر ویژگی‌های بافتی اولئوژل روغن کنجد و مقایسه آن با چربی حیوانی. علوم و صنایع غذایی ایران، ۱۶(۹۰)، ۱-۱۴.
- سوهان‌آجینی، ع.، موحد، س.، & احمدی‌چناربن، ح. (۱۳۹۶). تأثیر صمغ‌های گوار و زانتان به عنوان جایگزین بخشی از چربی بر خواص کیفی کیک روغنی. علوم و صنایع غذایی ایران، ۱۴(۶۹)، ۲۹۵-۳۰۶.
- شریعتی، ف.، آزادمردمیرچی، ص.، & شیرانی‌راد، ا. (۱۳۹۸). تأثیر غلظت اتیل سلولز و پلی‌گلیسرول پلی‌ریسینولات بر ساختار میکروسکوپی و پایداری اکسایشی اولئوژل روغن کنجد. نشریه فرآوری و نگهداری مواد غذایی، ۱۱(۲)، ۶۳-۷۶. doi:<https://doi.org/10.22069/ejfp.2020.14435.1464>
- ضامنی، ع.، کاشانی‌نژاد، م.، اعلمی، م.، صالحی، ف.، & شیروانی، گ. (۱۳۹۴). بررسی خصوصیات رئولوژیکی، بافتی، و رنگ صمغ دانه بالنگو (*Lallemantia royleana*) تحت تأثیر دماهای متفاوت. مهندسی بیوسیستم ایران، ۴۶(۲)، ۱۸۵-۱۹۲. doi:<https://doi.org/10.22059/ijbse.2015.55678>
- ضامنی، ع.، کاشانی‌نژاد، م.، & صالحی، ف. (۱۳۹۴). اثر تیمارهای حرارتی بر ویژگی‌های رئولوژیکی و بافتی صمغ دانه ریحان. علوم غذایی و تغذیه، ۱۲(پاییز ۹۴) Retrieved from [https://jftn.srbiau.ac.ir/article\\_7811\\_fda5e0909784bcf00eb6bf536ffb8078.pdf](https://jftn.srbiau.ac.ir/article_7811_fda5e0909784bcf00eb6bf536ffb8078.pdf) 5-16.
- عبداللهی، م.، گلی، س.، & زاده، ن. س. (۱۳۹۸). بررسی خصوصیات اولئوژل تولیدی به روش غیر حرارتی با استفاده از زیست پلیمرهای ژلاتین و زانتان و غنی‌سازی آن با ویتامین D. علوم و صنایع غذایی ایران، ۱۶(۱۶)، ۸۹.
- عسگری‌ورجانی، س.، صالحی‌فر، م.، & شهریار، ش. (۱۳۹۶). اثر صمغ دانه ریحان و اسانس پونه کوهی بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی و حسی کیک شکلاتی با چربی کاهش یافته. علوم و صنایع غذایی ایران، ۱۴(۷۲)، ۳۵۷-۳۶۹.
- گل‌کار، ع.، نصیری‌پور، ع.، & کرامت، ج. (۱۳۹۴). تولید مایونز با چربی کاهش یافته با استفاده از کمپلکس‌های الکترواستاتیکی و کووالانسی بتالاکتوگلوبولین و صمغ فارسی. علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران، ۱۰(۴)، ۱۰۳-۱۱۴.
- مرادعباسی، م.، گلی، س.، & فیاض، گ. (۱۳۹۹). اثر غلظت زیست پلیمرهای سدیم کاربونات و صمغ زانتان بر قابلیت تولید اولئوژل بر اساس سیستم امولسیون روغن در آب. علوم و صنایع غذایی ایران، ۱۷(۱۰۷)، ۱۴۷-۱۵۹. doi:<https://doi.org/10.52547/fsct.17.107.147>
- مظفری، ح.، حسینی، ا.، & حجت‌الاسلامی، م. (۱۳۹۴). بررسی رفتار جریان صمغ تراوشی زودو به عنوان تابعی از غلظت و دما Paper presented at the 4th National Conference on Food Science and Technology in Iran, 2019. doi:<https://civilica.com/doc/415002>
- ناجی‌طیسی، س.، مهدیان، ا.، آریان‌فر، ل.، & ناجی‌طیسی، س. (۱۳۹۹). بررسی ویژگی‌های اولئوژل تهیه‌شده به روش قالب‌گیری امولسیون پیکرینگ پایدارشده با ذرات جامد کمپلکس صمغ دانه ریحان و ایزوله پروتئین سویا به‌عنوان جایگزین چربی در خامه. پژوهش و نوآوری در علوم و صنایع غذایی، ۹(۳)، ۲۶۹-۲۸۲. doi:<https://doi.org/10.22101/jrifst.2020.229269.1168>
- یگانه‌زاد، سمیرا، فائزبان، علی، براتیان‌قرقی، زهره، حصاری‌نژاد، محمدعلی. (۱۴۰۰). 'تغییرات خواص حرارتی، بافتی، رنگ و ریزساختار اولئوژل ساخته شده از موم زنبورعسل با روغن هسته انگور تحت تأثیر نرخ سرد کردن و غلظت اولئوژل کننده؛ پژوهش و نوآوری در علوم و صنایع غذایی' doi: 10.22101/jrifst.2022.283673.1242
- 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. Retrieved from <http://fsct.modares.ac.ir/article-7-31070-en.html>
- 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. Retrieved from <http://fsct.modares.ac.ir/article-7-10853-fa.html>

- 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.04.016>
- Bemiller, J. (2010). Carbohydrate Analysis. In (Vol. 2, pp. 147-177).
- 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. doi:<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. doi:<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. doi:<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. doi:<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. doi: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. doi:<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  $\beta$ -lactoglobulin and Farsi Gum. *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology*, 10(4), 103-114. Retrieved from <http://nsft.sbmu.ac.ir/article-1-1695-fa.html>
- Herrero, A., Carmona, P., Jiménez-Colmenero, F., & Ruiz-Capillas, C. (2014). Polysaccharide gels as oil bulking agents: Technological and structural properties. *Food Hydrocolloids*, 36, 374-381. doi:10.1016/j.foodhyd.2013.08.008
- 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.08.008>
- 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.110>
- Khalesi, H., Kadkhodae, 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. doi:<https://doi.org/10.22104/jift.2016.363>
- 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. doi:<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. doi:<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. doi:<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. doi:<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  $\beta$ -carotene on the gel structure and oxidative stability. *Food & Function*, 8(11), 4241-4250. doi:<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. doi:<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. doi:<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. doi:<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. doi:<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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.087>
- Moradabasi, 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. [اثر غلظت زیست [ پلیمرهای سدیم کازئینات و صمغ زانتان بر قابلیت تولید اولئوژل بر اساس سیستم امولسیون روغن در آب *mdrsjrns*, 17(107), 147-159. doi:<https://doi.org/10.29252/fsct.17.107.147>
- 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. doi:10.22101/jrifst.2020.229269.1168
- 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. doi:<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. doi:<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. doi:<https://doi.org/10.1002/cphc.201402473>
- Patel, A. R., & Dewettinck, K. (2016). Edible oil structuring: an overview and recent updates. *Food & Function*, 7(1), 20-29. doi:<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. doi:<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. doi: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. doi:<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. doi:<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. doi:<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. doi: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. doi:<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. doi:<https://doi.org/10.22069/ejfp.2020.14435.1464>
- 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. Retrieved from <http://fsct.modares.ac.ir/article-7-16257-fa.html>
- 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), 306-295. Retrieved from <http://fsct.modares.ac.ir/article-7-1745-fa.html>
- 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. doi:<https://doi.org/10.1002/lite.201200205>
- T•rinh, K. T., & Glasgow, S. (2012). *On the texture profile analysis test*.
- 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. *Food & Function*, 8(1), 241-249. doi:10.1039/C6FO01274D
- Yılmaz, E., & Ögütçü, M. (2014). Properties and Stability of Hazelnut Oil Organogels with Beeswax and Monoglyceride. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 91(6), 1007-1017. doi:<https://doi.org/10.1007/s11746-014-2434-1>
- Yılmaz, E., & Ögütçü, M. (2015). Oleogels as spreadable fat and butter alternatives: sensory description and consumer perception. *RSC Advances*, 5(62), 50259-50267. doi:<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. Retrieved from [https://jftn.srbiau.ac.ir/article\\_7811\\_fda5e0909784bcf00eb6bf536ffb8078.pdf](https://jftn.srbiau.ac.ir/article_7811_fda5e0909784bcf00eb6bf536ffb8078.pdf)
- 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. doi:10.22059/ijbse.2015.55678
- 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. doi:<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. doi:<https://doi.org/10.1111/1750-3841.12175>

## Optimization of Oil Bulking Agents based on Inulin, Persian gum and Alginate by Response Surface Methodology

Bitá Mohammadalami<sup>1</sup>, Akram Arianfar<sup>2\*</sup>, Ali Mohammadisani<sup>3</sup>, Sara Naji-Tabasi<sup>4</sup>

1- PhD. Student, Department of Materials Engineering and Food Industry Design, Quchan Branch, Islamic Azad University, Quchan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Quchan Branch, Islamic Azad University, Quchan, Iran

\*Corresponding author ([a\\_aria\\_1443@yahoo.com](mailto:a_aria_1443@yahoo.com))

3- Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Quchan Branch, Islamic Azad University, Quchan, Iran

4- Assistant Professor, 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 (1.3182) of Persian gum. (1.5) inulin and 0.9646% 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