



## غنی سازی ماست با روغن درون پوشانی شده و موسیلاژ دانه چیا: بهینه سازی و ارزیابی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی و رئولوژیکی

سیده زهرا سید محمدی فرد<sup>۱</sup>، سهیلا زرین قلمی<sup>۲</sup>، محسن زندی<sup>۳\*</sup>، مریم پاکپور<sup>۳</sup>

۱-دانش آموخته کارشناسی ارشد، فناوری مواد غذایی، دانشگاه زنجان.

۲-دانشیار، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۳-استادیار گروه مواد، انرژی ها و فناوری های کوآنتومی، دانشکده فناوری های همگرا، موسسه رهیافت های نوآور برتر پاسارگاد، تهران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

#### تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱

#### کلمات کلیدی:

روغن دانه چیا،  
موسیلاژ دانه چیا،  
ریزپوشانی،  
غنی سازی،  
ماست،  
بهینه سازی.

پژوهش حاضر با هدف بهینه سازی فرمولاسیون ماست غنی شده با روغن و موسیلاژ دانه چیا به منظور به حداکثر رساندن میزان اسید چرب آلفا-لینولنیک (امگا ۳) و حداقل تغییرات در ویژگی های فیزیکی و شیمیایی (pH، اسیدیته قابل تیترا، آب اندازی، ماده خشک، پراکسید و رنگ) نسبت به نمونه شاهد بود. ابتدا به منظور افزایش پایداری اکسایشی، روغن دانه چیا با استفاده از آلزینات سدیم و موسیلاژ دانه چیا و به کمک روش امولسیون سازی-ژلاسیون داخلی ریزپوشانی گردید. سپس نمونه های ماست حاوی ۰-۲۵٪ درصد موسیلاژ دانه چیا و ۰-۴٪ درصد روغن دانه چیا به دو صورت آزاد و ریزپوشانی شده تولید گردید. نمونه فاقد روغن و موسیلاژ دانه چیا به عنوان نمونه شاهد می باشد. نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دهنده تشکیل موفقیت آمیز ریزپوشش آلزینات سدیم- موسیلاژ دانه چیا با ساختار پوسته یکنواخت بود. نتایج بدست آمده از ویژگی های فیزیکی و شیمیایی نشان داد که غنی سازی سبب کاهش معنی دار آب اندازی ( $p < 0.05$ ) و افزایش معنی دار ( $p < 0.05$ ) ظرفیت نگهداری و ویسکوزیته ماست گردید. به علاوه ماست حاوی ۳/۴۱ درصد روغن دانه چیا به صورت ریزپوشانی شده و ۰/۲۱۳ درصد موسیلاژ دانه چیا، به عنوان نمونه بهینه تعیین شد. نتایج نشان داد که نمونه بهینه از نظر تعداد باکتری های آغازگر نیز تفاوت معنی داری با نمونه شاهد ندارد ( $p > 0.05$ ). بافت ماست ها، جامد ویسکوالاستیک تشخیص داده شد و در تمام نمونه ها همواره در کل محدوده فرکانسی، مدول ذخیره ( $G'$ ) از مدول افت ( $G''$ ) بیشتر بود. شاخص رفتار جریان در کلیه نمونه ها کمتر از یک بود که نشان دهنده رفتار غیر نیوتنی (هرشل بالکلی) نمونه ها می باشد. مدل هرشل بالکی در هردو نمونه بیشترین ضریب تبیین ( $R^2 = 0.99$ ) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا را دارا بود که نشان دهنده مناسب بودن این مدل برای مدل سازی رفتار رئولوژیکی نمونه ها است.

DOI: 10.22034/FSCT.20.134.171  
DOR: 20.1001.1.20088787.1402.20.134.13.7

\* مسئول مکاتبات:

Zandi@znu.ac.ir

## ۱- مقدمه

چیا از کلمه اسپانیایی چین<sup>۱</sup> یا چین<sup>۲</sup> اقتباس شده است که منشا آن از ناهوتی<sup>۳</sup> به معنای روغنی است [۱]. دانه‌های چیا از گیاه *Salvia hispanica*<sup>۴</sup> از خانواده لامباسه<sup>۵</sup> و جنس مریم‌گلی به دست می‌آیند [۲]. این دانه‌ها حاوی ۱۸-۲۴ درصد پروتئین، ۲۵-۵۰ درصد روغن، حدود ۴۲ درصد کربوهیدرات و حدود ۵ درصد خاکستر هستند. دانه‌های چیا منبع غنی از ترکیبات با فعالیت بیولوژیکی بالا به ویژه پلی‌فنول‌هایی نظیر اسید گالیک<sup>۶</sup>، اسید کافئیک<sup>۷</sup>، اسید کلروژنیک<sup>۸</sup>، اسید سینامیک<sup>۹</sup>، فرولیک<sup>۱۰</sup>، کوئرستین<sup>۱۱</sup>، کامپرفول<sup>۱۲</sup>، اپیکاتچین<sup>۱۳</sup>، روتین<sup>۱۴</sup>، آپیزین<sup>۱۵</sup> و اسید پی‌کوماریک<sup>۱۶</sup> نیز هستند. این دانه‌ها حاوی استرول‌های گیاهی نظیر کامپسترول، استیگماسترول، سیستواسترول، توکوفرول‌ها، مواد معدنی و ویتامین‌ها نیز می‌باشند [۲-۵]. روغن دانه چیا حاوی مقادیر زیادی اسیدهای چرب غیراشباع به ویژه آلفا-لینولنیک از گروه اسیدهای چرب امگا ۳ است که نقش مهمی در پیشگیری از بیماری‌های قلبی-عروقی به خصوص در افراد در معرض خطر دارد. [۶-۱۰]. اما یکی از مشکلات اسیدهای چرب چند غیراشباعی عدم پایداری اکسیداتیو آن‌ها می‌باشد که می‌توان از روش‌های مانند درون‌پوشانی برای حفاظت آن‌ها استفاده کرد.

درون‌پوشانی به عنوان ابزاری مفید برای بهبود نگهداری و تحویل ترکیبات زیست‌فعال محسوب می‌گردد و این امکان را فراهم می‌آورد تا ضمن حفظ و نگهداری این ترکیبات، امکان آزادسازی آن‌ها در زمان، مکان یا محصول خاص فراهم گردد [۱۱، ۱۲]. در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی برای درون‌پوشانی ترکیبات زیست‌فعال توسعه یافته است. روش امولسیون‌کردن به سبب سهولت، سرعت، ایمنی برای استفاده‌های غذایی و در دسترس بودن کاربرد فراوانی دارد. در این روش معمولاً قطره‌های روغن

یا آب از طریق پراکنده کردن یک مایع در مایع غیرقابل اختلاط دیگر تولید می‌گردد [۱۳-۱۵]. یکی از چالش‌های پیش‌رو در زمینه درون‌پوشانی، انتخاب مواد دیواره مناسب با حداکثر پایداری در مقابل عوامل خارجی در طول زمان می‌باشد. پلی‌ساکاریدها عمدتاً بیشترین کاربرد را به عنوان مواد دیواره دارند. آلژینات سدیم<sup>۱۷</sup> یک پلی‌ساکارید خطی مشتق شده از اسید آلژینیک است که به دلیل توانایی غلیظ‌کنندگی<sup>۱۸</sup>، خاصیت تشکیل فیلم<sup>۱۹</sup>، پایداری، سازگاری زیستی، ارزان و در دسترس بودن در توسعه فناوری ریزپوشانی کاربرد دارد. آلژینات سدیم به راحتی در آب حل می‌شود اما هنگام قرار گرفتن در مجاورت یون‌های کلسیم تشکیل ژل می‌دهد که این قابلیت به دلیل تعامل با کاتیون‌های دو ظرفیتی به عنوان عامل اتصال عرضی است که سبب پیوند گروه‌های عملکردی و تشکیل شبکه‌ای ژلی می‌گردد که روشی برای تولید ریزپوشش‌ها است [۱۱، ۱۶، ۱۷].

دانه‌های چیا حاوی تقریباً ۳۴-۳۰ درصد فیبر رژیمی است. فیبر یک ترکیب پیچیده شامل الیگوساکاریدها و پلی‌ساکاریدهایی مانند سلولز و همی‌سلولز است که به دلیل حضور کربوهیدرات‌های دارای گروه‌های قطبی آزاد، ویژگی جذب آب بالایی دارند و توانایی تشکیل ژل را دارند. در صنعت غذا نیز فیبرها به عنوان تثبیت‌کننده کف<sup>۲۰</sup>، عامل تعلیق<sup>۲۱</sup>، امولسیفایر و بهبود دهنده بافت کاربرد دارند. لیگنین بخش نامحلول اصلی فیبر است که نقش مهمی در محافظت از اسیدهای چرب غیراشباع ایفا می‌کند. قسمت محلول فیبر تا حدی از بذر خارج می‌شود و در تماس با آب، ژل تشکیل می‌دهد. بخشی از فیبر در چیا که در قسمت بیرونی قرار دارد پس از جذب آب، تا حدودی از سطح دانه خارج می‌شوند و به شکل موسیلاژ که کاملاً به خود دانه می‌چسبد، نمایان می‌شوند [۳، ۱۸]. یکی از راه‌های بهبود ارزش تغذیه‌ای مواد غذایی، غنی‌سازی با ترکیبات زیست‌فعال است [۱۹]. از بین مواد غذایی مختلف، لبنیات با توجه به مصرف بالا در جهان، بیشتر به عنوان پایه‌ی غذایی جهت غنی‌سازی در نظر گرفته می‌شوند [۲۰]. با توجه به گسترش تولید و مصرف روزافزون انواع ماست و از سویی دیگر نداشتن ترکیبات زیست‌فعال به اندازه کافی [۲۱]، غنی‌سازی این محصول با ترکیبات مفید از جمله اسیدهای چرب ضروری می‌تواند بسیار مفید واقع شود.

1. Chian
2. Chien
3. Nahuati
4. *Salvia hispanica*
5. Lamiaceae
6. Gallic acid
7. Caffeic acid
8. Chlorogenic acid
9. Cinnamic acid
10. Ferulic acids
11. Quercetin
12. Kaempferol
13. Epicatechin
14. Rutin
15. Apigenin
16. P-coumaric acid

17. Sodium alginate
18. Thickening
19. Film-forming property
20. Foam stabiliser
21. Suspending agent

ظروف نفوذناپذیر به رطوبت و هوا ریخته شد و در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری گردید [۲۳].

## ۲-۳- ریزپوشانی روغن دانه چیا و ارزیابی ریزپوشش‌ها

ابتدا ۲ گرم مخلوط مساوی پودر موسیلاژ چیا و آلژینات سدیم در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر (نسبت ۱ به ۵۰ (وزنی/حجمی)) حل شد و پس از ۲ ساعت همزدن در دمای محیط، مخلوط یک شب در دمای یخچال (۴ درجه سلسیوس) نگهداری گردید. فرایند ریزپوشانی به روش امولسیون‌سازی-ژلاسیون داخلی [۱۳] از طریق اختلاط کامل ۳۰ گرم از این مخلوط با ۱۰ گرم روغن دانه چیا (۶ دقیقه با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه) انجام شد. به‌منظور تشکیل ریزپوشش‌ها امولسیون حاصل، قطره قطره به محلول کلرید کلسیم (۱ درصد (وزنی/حجمی)) اضافه گردید و ریزپوشش‌ها حاصل توسط محلول کلرور کلسیم ۰/۰۵ مولار شستشو و با کمک سیستم خلاء شیشه‌ای میلی‌پور توسط فیلتر نیتروسولوزی جداسازی گردید و به نسبت ۱ به ۹ در آب مقطر ریخته شد و تا زمان استفاده در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری گردید. و تا زمان استفاده در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری گردید. برای اندازه‌گیری پایداری امولسیون (ES)<sup>۲۲</sup>، ۱۰۰ میلی‌لیتر از امولسیون (V<sub>0</sub>) به یک استوانه مدرج منتقل شد و به مدت یک ساعت در دمای اتاق نگهداری شد [۱۳، ۱۵]:

$$ES (\%) = (V/V_0) \times 100 \quad (1)$$

که V برابر فاز روغنی جدا شده پس از یک ساعت است. محاسبه راندمان ریزپوشانی<sup>۲۳</sup> (EE) با استفاده از جرم اولیه روغن مورد استفاده (M<sub>0</sub>) و جرم روغن ریزپوشانی‌نشده (M) باقی‌مانده بر روی سطح و همچنین روی سطح ریزپوشش‌ها انجام شد [۱۳، ۲۲]:

$$ES (\%) = (M_0 - M / M_0) \times 100 \quad (2)$$

به منظور اطمینان از تشکیل ریزپوشش‌ها و بررسی مورفولوژی آن‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۲۴</sup> استفاده گردید. به این ترتیب که پس از خشک‌کردن ریزپوشش‌ها به وسیله خشک‌کن انجمادی، پودر حاصله روی سطح مربوط به میکروسکوپ الکترونی روبشی ثبت گردید و پس از پوشش‌دار کردن با طلا (۱۱-۶ نانومتر، ۱۰ میلی‌آمپر و ۴۰ ثانیه) به داخل دستگاه

از آنجا که تا کنون پژوهشی در زمینه استفاده از روغن دانه چیا به صورت آزاد و ریزپوشانی شده در ماست و بررسی اثر آن بر ویژگی‌های کیفی، تغذیه‌ای و رئولوژیکی آن انجام نشده است، تحقیق حاضر با هدف ریزپوشانی روغن دانه چیا با استفاده از آلژینات سدیم و موسیلاژ دانه چیا به کمک روش امولسیون‌سازی-ژلاسیون داخلی به‌منظور حفاظت اکسیداتیو آن و سپس بهینه‌سازی ماست غنی‌شده با روغن دانه چیا ریزپوشانی‌شده، روغن آزاد و موسیلاژ دانه چیا بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی (pH، اسیدیته، پراکسید، ماده خشک، آب‌اندازی، رنگ و امگا ۳) و در نهایت مقایسه نمونه بهینه با شاهد از نظر شمارش باکتری‌های آغازگر و ویژگی‌های رئولوژیکی انجام پذیرفت.

## ۲-مواد و روش‌ها

### ۲-۱-مواد

شیر پاستوریزه و ماست پرچرب (میهن، ایران) و دانه چیا از بازار محلی زنجان تهیه شد. تمام مواد شیمیایی با درجه خلوص آزمایشگاهی و محیط‌های کشت از شرکت مرک (آلمان) تهیه گردید. آلژینات سدیم از شرکت سیگما آلدریج (آمریکا) تهیه شد.

### ۲-۲-استخراج روغن و موسیلاژ دانه چیا

برای استخراج موسیلاژ، ۱۰۰ گرم دانه چیا با ۲۰۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر (۱ به ۲۰ (وزنی/حجمی)) مخلوط شدند و با استفاده از همزن مغناطیسی (۱۰۰ دور در دقیقه) برای ۴۵ دقیقه در دمای ۲±۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۵ دقیقه هم‌زده شد. مخلوط نهایی پس از سرد شدن و یک شب نگهداری در دمای یخچال (۴ درجه سلسیوس) به‌منظور آب‌گیری کامل دانه‌ها، درون سینی‌های فلزی ریخته شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۵۰ درجه سلسیوس درون آون قرار داده شد تا خشک گردد. پس از نگهداری دانه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط برای ایجاد تعادل رطوبت، لایه‌ی موسیلاژ خشک‌شده توسط صافی با مش ۲۵ جداسازی شد. پودر حاصله تا زمان استفاده در ظروف شیشه‌ای نفوذناپذیر به رطوبت و هوا درب‌بندی و در دمای اتاق نگهداری شد [۱۸، ۲۲]. استخراج روغن دانه چیا با استفاده از پرس هیدرولیک سرد (شرکت Nord، مدل KK15، آلمان) به‌ترتیب در فشار و دمای ۲۰ مگاپاسکال و ۲۵ درجه سلسیوس انجام پذیرفت. روغن حاصل برای جلوگیری از اکسید شدن در

22. Emulsion stability (%ES)

23. encapsulation efficiency(EE%)

24. Scanning electron microscope (SEM)

درصد) به آن بسته به تیمار (جدول ۱) با سرعت پایین هم‌زده شد. نمونه شاهد نمونه فاقد روغن دانه چیا و موسیلاژ در نظر گرفته شد. در ادامه شیر مایه‌خورده تا رسیدن به  $pH=4/5$  (حدود ۳ ساعت) در آن با دمای ۴۵ درجه سلسیوس قرار داده شد و در نهایت ۲۴ ساعت در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شد.

میکروسکوپ الکترونی که ولتاژ شتاب‌دهی الکترون‌ها در آن ۱۵ کیلوولت بود منتقل و تصویر مورد نظر گرفته شد [۱۷، ۱۸].

## ۲-۴- تهیه ماست

۳ درصد مایه ماست به شیر پاستوریزه با دمای ۴۵ درجه سلسیوس افزوده شد و پس از افزودن روغن دانه چیا (۴-۰ درصد) به‌صورت آزاد یا ریزپوشانی‌شده و موسیلاژ (۲۵-۰)

Table 1 Design matrix of the response surface methodology.

Run	Encapsulation	Chia seed musilage (%)	Chia seed oil (%)	Run	Encapsulation	Chia seed musilage (%)	Chia seed oil (%)
1	With	0.125	2	13	Without	0.037	0.59
2	Without	0.125	2	14	With	0.125	4
3	With	0.21	0.59	15	Without	0.125	2
4	With	0.21	3.41	16	Without	0.125	2
5	With	0.037	3.41	17	Without	0.125	2
6	With	0.037	0.59	18	With	0.125	2
7	With	0.125	2	19	Without	0.125	4
8	Without	0.21	3.41	20	Without	0.125	0
9	Without	0.25	2	21	With	0	2
10	With	0.125	2	22	Without	0	2
11	With	0.25	2	23	With	0.125	0
12	Without	0.037	3.41	24	Without	0.21	0.59
12	Without	0.037	3.41	24	Without	0.21	0.59

داده شد و درصد آب‌اندازی ماست با توجه به وزن آب خارج شده از آن طبق رابطه ۴ محاسبه گردید [۲۴]:

$$(4) \quad (M / M_0) \times 100 = \text{میزان آب‌اندازی (درصد)}$$

که در آن  $M_0$ : جرم اولیه نمونه ماست و  $M$ : وزن آب خارج شده از ماست است.

برای اندازه‌گیری میزان عدد پراکسید نمونه‌های ماست، ابتدا ۵ گرم ماست و ۳۰ میلی‌لیتر محلول استیک اسید گلاسیال-کلروفرم (۳ به ۲ (حجمی/حجمی)) کاملاً مخلوط و ۰/۵ میلی‌لیتر از یدید پتاسیم اشباع به آن افزوده شد. پس از ۱۰ دقیقه نگهداری مخلوط در محیط تاریک، ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۱ میلی‌لیتر از چسب نشاسته (۱ درصد) به آن اضافه گردید و با سدیم تیوسولفات ۰/۰۱ مولار تیترا شد و عدد پراکسید از رابطه ۵ به دست آمد [۲۴]:

$$(5) \quad \text{عدد پراکسید} = [N(S-B) / M_0] \times 100 \text{ (meq/kg)}$$

که در آن  $M_0$ : جرم اولیه نمونه ماست،  $N$ : نرمالیت سدیم تیوسولفات،  $S$ : حجم سدیم تیوسولفات مصرفی برای نمونه و

## ۲-۶- بهینه‌سازی

برای تعیین شرایط بهینه از روش بهینه‌سازی عددی با هدف به حداکثر رساندن میزان امگام ۳ و حداقل‌سازی همزمان تغییرات pH، اسیدیته، ماده خشک، ویژگی‌های رنگی، میزان آب‌اندازی و پراکسید نسبت به نمونه شاهد استفاده گردید.

اسیدیته و pH ماست با روش تمجیدی و همکاران انجام شد [۲۴].

جهت اندازه‌گیری ماده خشک، حدود ۳-۵ گرم ماست توزین گردید و در آن با دمای  $105 \pm 2$  درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت قرار داده شد و میزان ماده خشک از رابطه ۳ محاسبه گردید [۸]:

$$(3) \quad (M / M_0) \times 100 = \text{میزان ماده خشک (درصد)}$$

که در آن  $M_0$ : جرم اولیه نمونه ماست و  $M$ : جرم نمونه خشک شده است.

برای اندازه‌گیری میزان آب‌اندازی ماست، ۳۰ گرم ماست به مدت ۱ ساعت در دمای ۱۰ درجه سلسیوس روی کاغذ صافی قرار

مدل‌های قانون توان<sup>۲۷</sup> (رابطه ۷)، بینگهام<sup>۲۸</sup> (رابطه ۸)، هرشل-بالکلی<sup>۲۹</sup> (رابطه ۹)، کاسون<sup>۳۰</sup> (رابطه ۱۰) و ووکادلو<sup>۳۱</sup> (رابطه ۱۱) استفاده گردید:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (7)$$

$$\tau = \mu_p \dot{\gamma} + \tau_0 \quad (8)$$

$$\tau = K\dot{\gamma}^n + \tau_0 \quad (9)$$

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + K_c \sqrt{\dot{\gamma}} \quad (10)$$

$$\tau = [\tau_0^{1/n} + K_V \dot{\gamma}]^n \quad (11)$$

که  $\tau$  برابر تنش برشی (Pa)،  $\dot{\gamma}$  برابر سرعت برشی ( $s^{-1}$ )،  $n$  برابر شاخص رفتار جریان،  $K$  برابر ضریب قوام ( $Pa \cdot s^n$ )،  $\mu_p$  برابر ویسکوزیته پلاستیک بینگهام (Pa.s)،  $\tau_0$  برابر تنش تسلیم (Pa)،  $K_c$  و  $K_V$  به ترتیب برابر ثابت مدل کاسون و شاخص قوام برای مدل ووکادلو می‌باشد.

## ۲-۸- تحلیل آماری

بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ (RSM)<sup>۳۲</sup> و با طرح مرکب مرکزی (CCD)<sup>۳۳</sup> با کمک دو عامل عددی شامل غلظت روغن دانه چیا (۰ تا ۴ درصد) و غلظت موسیلاژ (۰ تا ۰/۲۵ درصد) و یک عامل کیفی ریزپوشانی انجام شد. سطوح بالا و پایین بر اساس مطالعات اولیه (برای غلظت موسیلاژ) و با در نظر گرفتن مقدار مورد نیاز تامین شده توسط رژیم غذایی امگا ۳، میزان امگا ۳ روغن دانه چیا و میزان از دست رفتن روغن دانه چیا انتخاب شدند. برای مقایسه نمونه بهینه و شاهد از طرح فاکتوریل با طرح آزمایشی پایه بلوک کامل تصادفی با حداقل سه تکرار استفاده گردید و زمان به‌عنوان یک بلوک در نظر گرفته شد. ارزیابی و مقایسه مدل‌های رئولوژیکی با کمک ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ریشه

B: حجم سدیم تیوسولفات مصرفی برای شاهد است. به منظور تعیین شاخص‌های رنگی، از تصویربرداری سطحی در محفظه پردازش تصویر و با کمک دوربین (Canon EOS) 70D استفاده گردید و پس از استخراج شاخص‌های رنگی ( $a^*$ ،  $b^*$ ،  $L^*$ )، با استفاده از نرم‌افزار Image J (g.1/۴۰) ایالت متحده آمریکا، میزان تفاوت رنگ نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد ( $\Delta E$ ) از رابطه ۶ به دست آمد [۲۵]:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L^*_0)^2 + (a^* - a^*_0)^2 + (b^* - b^*_0)^2} \quad (6)$$

## ۲-۷- مقایسه نمونه بهینه با شاهد

مقایسه نمونه‌های بهینه و شاهد از طریق بررسی زنده‌مانی باکتری‌های آغازگر و ارزیابی رئولوژیکی نمونه‌های ماست انجام شد. به منظور شمارش باکتری‌های آغازگر، ۰/۱ میلی‌لیتر از غلظت  $10^{-7}$  نمونه‌های ماست به پلیت‌های حاوی محیط‌های کشت MRS (لاکتوباسیلوس‌ها) و M17 آگار (استرپتوکوکوس‌ها) منتقل گردید. پلیت‌ها در دمای ۳۷ درجه سلسیوس به ترتیب در شرایط بی‌هوازی به مدت ۷۲ ساعت و شرایط هوازی به مدت ۴۸ ساعت گرمخانه‌گذاری و سپس شمارش شد [۲۶].

ارزیابی رئولوژیکی نمونه‌های ماست توسط رئومتر برشی دینامیکی (Anton paar، مدل MCRS1، اتریش) با ژئومتری مخروط-صفحه، به قطر ۵۰ سانتی‌متر فاصله گام/گپ ۰/۰۱ میلی‌متر و زاویه مخروط ۱ درجه برای ارزیابی رئولوژیکی استفاده شد. هر نمونه جهت استراحت و بازیابی ساختار به مدت ۵ دقیقه در فضای بین مخروط و صفحه قرار گرفت. آزمون‌ها در دمایی ۲۵ درجه سلسیوس و با سه تکرار انجام شد. جهت تعیین ویژگی‌های ویسکوالاستیک، در ابتدا یک آزمون نوسانی روبش-کرنش برای تعیین ناحیه ویسکوالاستیک خطی<sup>۲۵</sup> انجام شد و سپس کرنش مناسب در محدوده ویسکوالاستیک خطی (یک درصد) جهت انجام آزمون روبش-فرکانس<sup>۳۶</sup> انتخاب شد. آزمون روبش-فرکانس در محدوده فرکانس ۰/۰۱ تا ۱۰۰ هرتز با اعمال کرنش ثابت یک درصد انجام شد که در نهایت مدول‌های افت و ذخیره توسط دستگاه ثبت گردید. برای توصیف رفتار جریان از

27. Power Law  
28. Bingham  
29. Herschel-Bulckly  
30. Casson  
31. Vocadlo  
32. Response surface methodology (RSM)  
33. Central composite design (CCD)

25. Linear viscoelastic region  
26. Frequency sweep

به عنوان یک هیدروکلوئید آب دوست، از یک طرف سبب افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته اطراف قطرات روغن می گردد و حرکت آن ها را محدود می کند و از طرف دیگر به دلیل جذب شدن بین فاز روغن و آب باعث کاهش کشش سطحی و پایداری امولسیون می گردد [۲۷]. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که میزان کارایی روش امولسیون سازی به منظور ریزپوشانی روغن دانه چیا برابر  $0.24 \pm 0.89$  درصد است. چنان و همکاران نیز راندمان ریزپوشانی بین ۸۵ تا ۹۰ درصد را برای پوشش دهی لاکتوباسیلوس با پوشش های آلژینات سدیم به دست آوردند. آن ها دریافتند که راندمان ریزپوشانی علاوه بر غلظت آلژینات و نوع آن به سرعت تشکیل دیواره پوشش در اثر اتصالات عرضی وابسته است. بخشی از روغن آزاد ممکن است مرتبط با نشت روغن از سطح ریزپوشش قبل از تشکیل دیواره پیوسته توسط فاز آلژینات باشد [۲۷]. نتایج مشابه توسط سایر پژوهشگران برای پوشش های بر پایه آلژینات گزارش شده است [۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۷]. نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دهنده تشکیل موفقیت آمیز ریزپوشش آلژینات-موسیلاژ دانه چیا کاملاً گرد و با اندازه ای در حدود ۱۰ میکرومتر با ساختار پوسته یکنواخت می باشد (شکل ۱). همچنین سطح دیواره ریزپوشش دارای منافذی است که باعث رهایش آرام مواد درون هسته می گردد. نتایج مشابهی توسط سایر پژوهشگران برای پوشش های آلژینات گزارش شده است [۱۱-۱۳، ۱۵، ۱۷، ۲۷].

میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام شد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O-P)^2}{\sum_{i=1}^n (O+P)^2} \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{(O-P)^2}{n-p}} \quad (13)$$

که  $O$ ،  $P$ ،  $n$  و  $p$  به ترتیب داده تجربی، داده پیش بینی شده، تعداد مشاهده و تعداد متغیرهای مدل است. تجزیه و تحلیل داده های بهینه سازی با نرم افزار دیزاین اکسپرت (نسخه ۱۲، ایالات متحده آمریکا) انجام شد و داده های مقایسه با استفاده از تجزیه و تحلیل واریانس یک طرفه (one-way ANOVA) با کمک نرم افزار SPSS (نسخه ۲۶، ایالات متحده آمریکا) انجام گردید. برای مقایسه میانگین ها از آزمون تعقیبی دانکن استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ارزیابی ریزپوشش آلژینات سدیم-

##### موسیلاژ دانه چیا

شکل گیری و پایداری امولسیون یکی از مهم ترین مراحل در فرایند ریزپوشانی به روش امولسیون سازی است که تأثیر قابل توجهی در کارایی ریزپوشانی و همچنین کیفیت ریزپوشش نهایی دارد [۱۳، ۱۵]. نتایج بررسی پایداری امولسیون نشان داد که شاخص پایداری امولسیون  $0.1 \pm 98.7$  درصد بود که این مقدار نشان از پایداری کامل امولسیون دارد. افزودن آلژینات سدیم

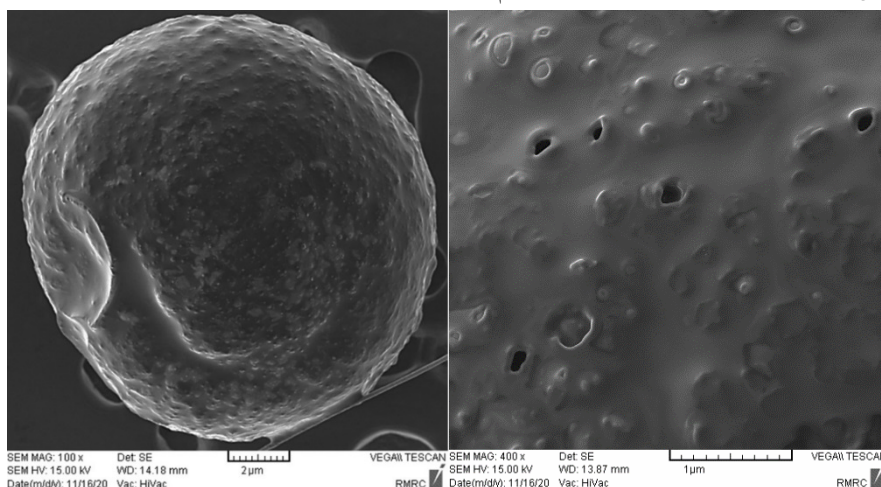


Fig 1 Scanning electron microscopy images from sodium alginate-chia seed mucilage containing chia seed oil

گزارش شده است [۲۹]. بررسی نتایج تجزیه واریانس نشان داد که متغیر عددی مستقل روغن دانه چیا تاثیر معنی داری بر تغییرات pH و اسیدیته دارد ( $p < 0/05$ ) به طوری که مطابق شکل ۲، با افزایش مقدار روغن، اسیدیته نمونه‌ها کاهش و pH آن‌ها افزایش یافت. این در حالی است که افزودن موسیلاژ دانه چیا و روغن ریزپوشانی شده و فرایند ریزپوشانی، تاثیر معنی داری بر تغییرات آن‌ها ندارد ( $p > 0/05$ ).

### ۳-۲-pH و اسیدیته

pH و اسیدیته بر ویژگی‌های بافتی ژل ماست و مدت زمان نگهداری آن تاثیر می‌گذارد و تحت تاثیر عواملی از قبیل ترکیب شیمیایی شیر، شرایط فرآیند، افزودنی‌ها و فعالیت باکتری‌های آغازگر در حین تخمیر قرار دارد [۲۸]. با توجه به نتایج، pH نمونه‌های ماست غنی شده بین ۴/۳۱-۴/۶۶ متغیر بود. pH بهینه برای دستیابی به ویژگی‌های مطلوب بافت ماست ۴/۱-۴/۶

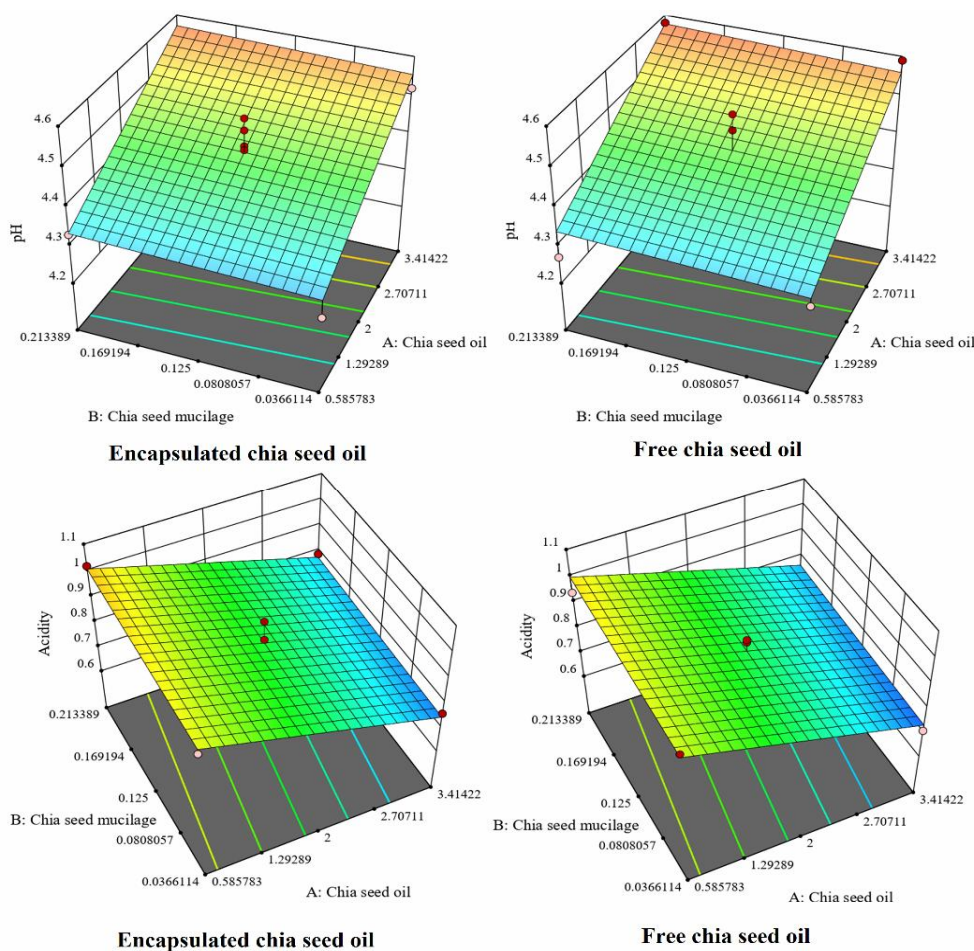


Fig 2 The change in pH and acidity of yogurt vs. independent variables.

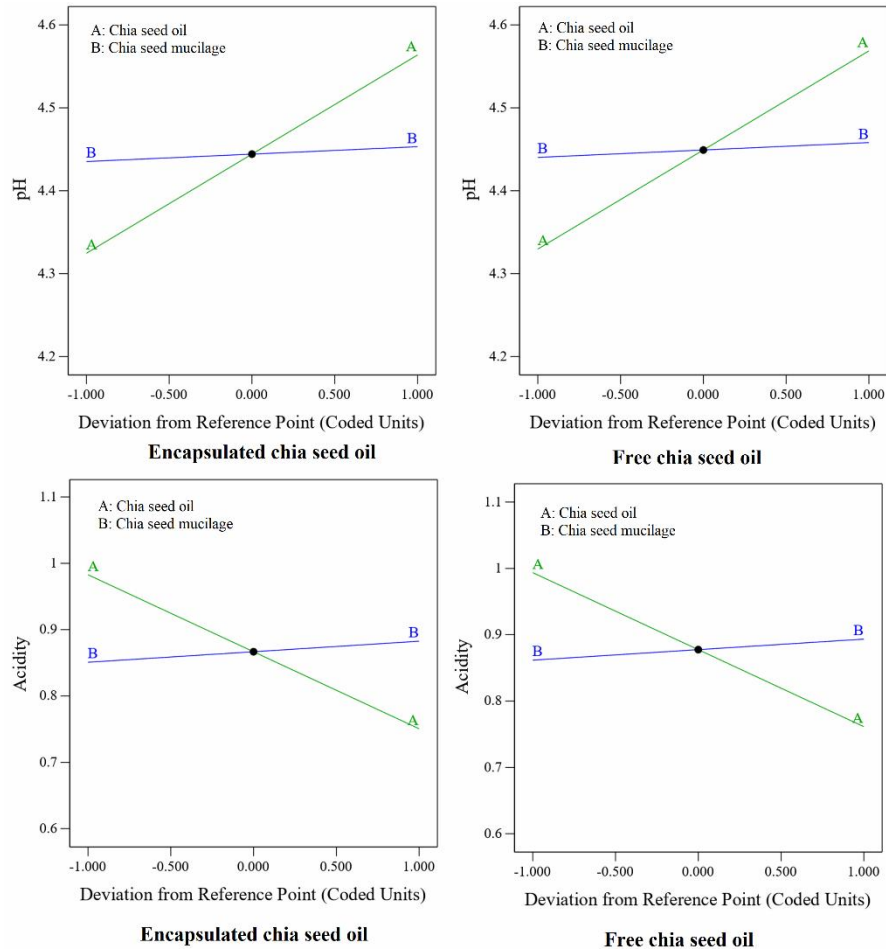
می‌دهد که پاسخ، به این متغیر حساس است و خط نسبتاً صاف، غیر حساس بودن پاسخ را به تغییر در آن عامل خاص نشان می‌دهد [۳۲، ۳۳]. در بین متغیرهای عددی مورد مطالعه از آنجایی که شیب نمودار روغن دانه چیا بیش‌تر از شیب نمودار موسیلاژ دانه چیا است، پس می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات pH و

به منظور اثبات تاثیر متغیرهای مستقل فرآیند بر تغییرات pH و اسیدیته، از نمودار اغتشاشی یا پرسیدگی<sup>۳۴</sup> استفاده شد (شکل ۳). در نمودار اغتشاشی، تغییرات جزئی هر متغیر در اطراف نقطه مرکزی نشان داده شده است. شیب یا انحنای تند یک متغیر نشان

34. Perturbation

تاثیر معنی دار ( $p > 0/05$ ) افزودن نسبت های مختلف صمغ کنجک و مرو بر تغییرات pH و اسیدیته ماست [۲۹] نشان داده اند.

اسیدیته نسبت به روغن دانه چیا حساس تر از موسیلاژ است. نتایج مطالعات انجام شده در گذشته نیز تاثیر معنی داری افزودن روغن خرفه [۳۰]، عصاره دانه چیا [۳۱]، دانه چیا و توت فرنگی [۸] بر تغییرات pH و اسیدیته ماست و عدم



**Fig 3** The perturbation plot of the changes in pH and acidity of yogurt.

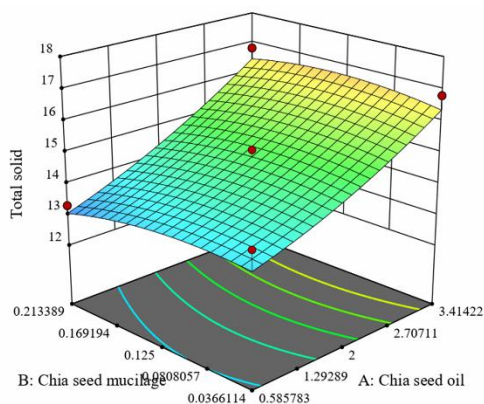
نظیر فیبرها و فرآورده های آن، دمای تخمیر و pH از مهم ترین عوامل کنترل آب اندازی ماست هستند [۸، ۲۶، ۳۰]. ماده خشک ماست نیز در قوام و میزان آب اندازی محصول نهایی موثر است. نتایج تجزیه و تحلیل واریانس نشان داد که افزودن روغن دانه چیا تاثیر معنی داری بر افزایش ماده خشک نمونه های ماست دارد ( $p < 0/05$ ). این افزایش قابل انتظار مطابق شکل ۴، به سبب افزودن روغن به فرمولاسیون ماست است که باعث تغییر ماده خشک کل در محدوده بین ۱۲/۵ تا ۱۷/۶ درصد شده است. با این حال ریزپوشانی روغن و افزودن موسیلاژ تاثیر معنی داری بر میزان ماده خشک ندارد ( $p > 0/05$ ). اگرچه انتظار می رفت که با

### ۳-۳- ماده خشک و آب اندازی

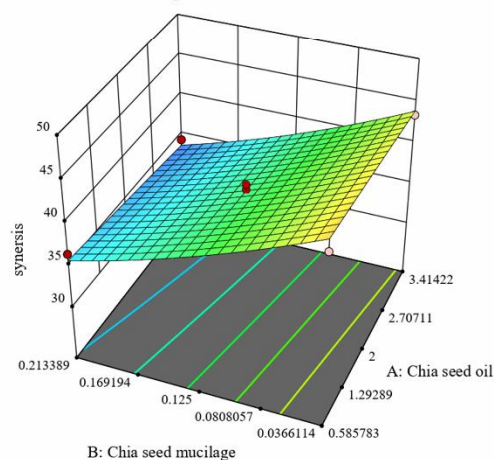
یکی از مهم ترین اهداف صنعت لبنیات، تولید ماستی مطلوب با حداقل آب اندازی طی حمل و نقل و نگهداری است. ساختار ماست را می توان به صورت شبکه سه بعدی از زنجیره ها و خوشه های میسل های کازئین که شکل کروی خود را حفظ کرده اند، تعریف کرد. آب اندازی عموماً به دلیل تغییر و شکست در شبکه پروتئینی ماست، چروکیدگی ساختار آن و کاهش قدرت اتصال پروتئین های سرمی به شبکه کازئینی طی نگهداری و اعمال تنش رخ می دهد. درصد چربی، ویژگی های باکتری های آغازگر، میزان ماده خشک بدون چربی، افزودن مواد جاذب آب



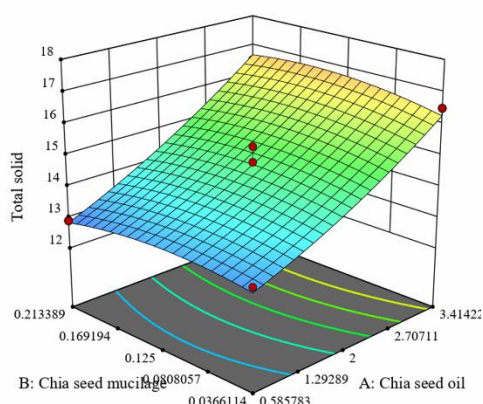
نشان می‌دهند که افزودن روغن دانه چیا و موسیلاژ آن و فرآیند ریزپوشانی، تاثیر معنی‌دار کاهشی بر آب‌اندازی نمونه‌های ماست غنی‌شده دارند ( $p < 0/05$ )؛ به طوری که مقدار آب‌اندازی نمونه بهینه نسبت به نمونه شاهد  $4/79\%$  درصد کاهش یافت. اما، اثر متقابل عوامل بر میزان ماده خشک و آب‌اندازی معنی‌دار نشد ( $p > 0/05$ )؛ در حالی که اثر درجه دوم روغن و موسیلاژ دانه چیا بر ماده خشک و اثر درجه دوم موسیلاژ دانه چیا بر میزان آب‌اندازی معنی‌داری بود ( $p < 0/05$ ).



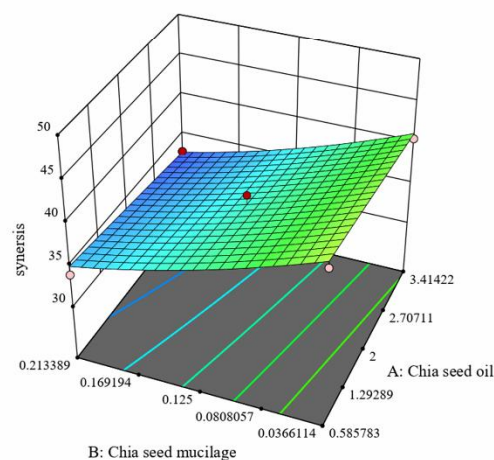
Encapsulated chia seed oil



Encapsulated chia seed oil



Free chia seed oil



Free chia seed oil

**Fig 4** The change in dry matter and syneresis of yogurt vs. independent variables.

غنی‌شده دارند [۳۴]. به علاوه ن موسیلاژ به علت داشتن ساختار هیدروکلوئیدی آب‌دوست، می‌تواند سبب کاهش شدید در آب‌اندازی ماست گردد. آتیک و همکاران (۲۰۲۰)، نیز گزارش کردند که افزودن هر نسبتی از موسیلاژ چیا سبب کاهش آب‌اندازی و افزایش استحکام نمونه‌های ماست نسبت به نمونه شاهد می‌شود؛ که دلیل آن را ساختار هیدروکلوئیدی موسیلاژ چیا

افزایش موسیلاژ، ماده خشک کل افزایش یابد؛ ولی این امر را می‌توان به مقدار نسبتاً کم پودر موسیلاژ اضافه‌شده (بین ۰ تا ۰/۲۵ درصد) در مقایسه با روغن دانه چیا و تغییرات زیاد ماده خشک (۱۲/۵ تا ۱۷/۶ درصد) تحت تاثیر افزودن روغن دانه چیا نسبت داد که سبب می‌گردد تا تغییرات ناشی از افزودن پودر موسیلاژ معنی‌دار نگردد ( $p > 0/05$ ). با این حال همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، اثر درجه‌ی دوم این عامل بر ماده خشک کل ماست معنی‌دار شده است ( $p < 0/05$ ). همچنین نتایج شکل ۴

مطابق شکل ۴، در میان نمونه‌های حاوی روغن، نمونه‌های ریزپوشانی‌شده توانستند مقدار آب بیشتری را در ماست حفظ کنند و در نتیجه مقدار آب‌اندازی نمونه را کاهش دهند. در ماست غنی‌شده، روغن موجب افزایش ماده خشک می‌شود که احتمالاً به‌علت پایدار کردن شبکه ژل و افزایش ظرفیت اتصال آب، اثر مطلوبی بر استحکام ژل ماست و کاهش آب‌اندازی در نمونه‌های

است. در این شکل، تغییرات متغیر موسیلاژ بر میزان ماده خشک، در اطراف نقطه مرکزی با کمی انحناء، که نشان از اثر مرتبه درجه دوم متغیر موسیلاژ بر ماده خشک است. اما به علت انحنای کم، تاثیر متغیر بر پاسخ شدید نیست. تغییرات متغیر روغن در اطراف نقطه مرکزی با شیب تقریباً تند، نشان دهنده اثر زیاد این عامل بر تغییرات ماده خشک است. شیب بیشتر نمودار موسیلاژ دانه چیا بر میزان آب اندازی نسبت به ماده خشک، نشان دهنده تاثیر بیشتر موسیلاژ دانه چیا بر میزان آب اندازی است.

و جذب آب توسط آن و افزایش استحکام شبکه پروتئینی ژل ماست دانستند [۳۵]. با توجه به تجزیه و تحلیل داده‌ها، مدل چند جمله‌ای درجه دوم به دست آمده به خوبی با داده‌های تجربی تغییرات ماده خشک و آب اندازی ماست با ضریب تبیین بالا متناسب است. این نتیجه نشان می‌دهد که مدل تعیین شده تناسب خوبی با داده‌های تجربی دارد و می‌توان از آن برای پیش‌بینی عملکرد کمی متغیرهای مستقل در آب اندازی ماست استفاده نمود. تأثیر متغیرهای مستقل فرآیند بر تغییرات ماده خشک و آب اندازی ماست در نمودار اغتشاشی در شکل ۵ نشان داده شده

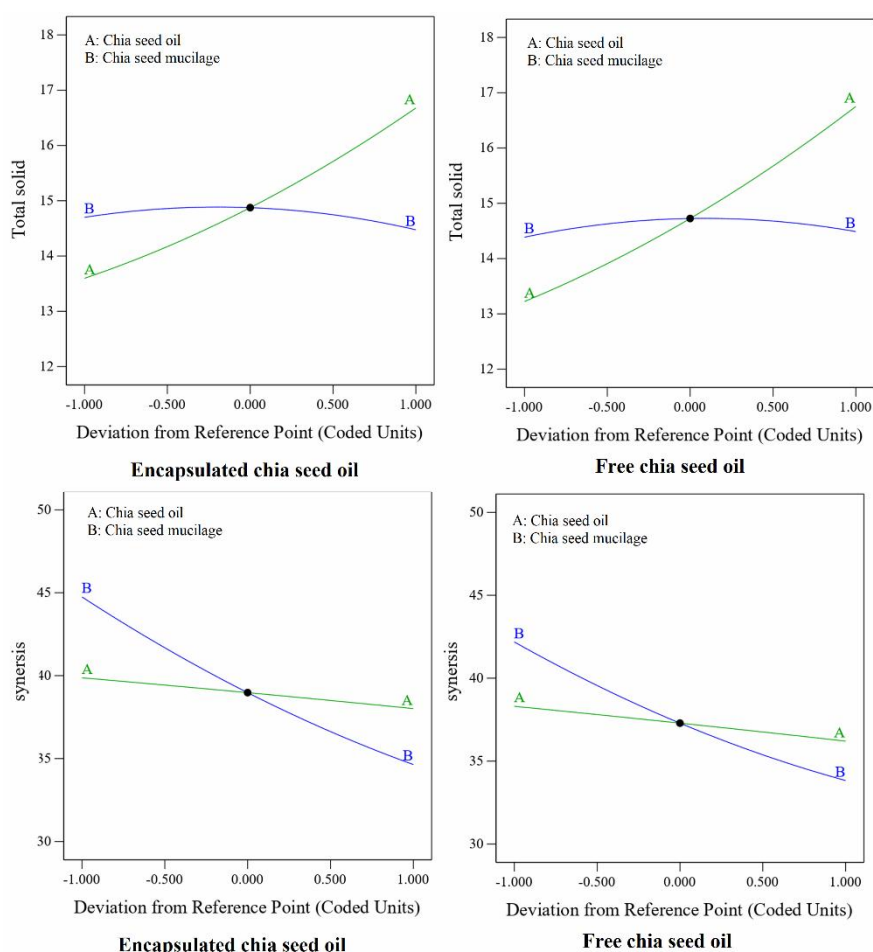


Fig 5 The perturbation plot for the change dry matter and syneresis of yogurt.

ندارد ( $p > 0.05$ ). این امر می‌تواند به سبب پایین بودن عدد پراکسید نمونه‌ها در هنگام تولید و عدم تاثیر فرآیند ریزپوشانی در اکسیداسیون روغن دانه چیا باشد. مقدار پراکسید تمامی نمونه‌ها در روز اول تولید در محدوده ۰/۱-۰/۳ میلی اکی والان اکسیژن فعال بر کیلوگرم روغن بود. به نظر می‌رسد تاثیر فرآیند

### ۳-۴- شاخص پراکسید

نتایج تجزیه و تحلیل واریانس نشان داد که میزان روغن دانه چیا و میزان موسیلاژ آن به عنوان متغیرهای عددی مستقل و دو حالت روغن آزاد و ریزپوشانی تاثیر معنی داری بر تغییر مقدار پراکسید

با اسپرولینا به صورت آزاد و ریزپوشانی با پودر آب پنیر (۰/۵ درصد) که نشان دادند نمونه‌های پوشش داده شده رنگ سفیدتری داشتند با نتایج تحقیق حاضر در اثر مثبت ریزپوشانی بر افزایش میزان سفیدی همخوانی داشت [۳۸]. اما نتایج تحقیق نجفی و همکاران در سال ۱۴۰۰، در بررسی غنی‌سازی ماست با نسبت‌های مختلف صمغ کنجاک و مرو نشان دهنده کاهش شاخص  $L^*$  نمونه‌ها با افزایش میزان صمغ کنجاک و کاهش صمغ دانه مرو بود که با تحقیق حاضر همخوانی ندارد [۲۹].

مطابق نتایج شکل ۶، مشخص شد که افزودن روغن دانه چیا و موسیلاژ آن و تاثیر متقابل فرایند ریزپوشانی و موسیلاژ دانه چیا بر تغییر شاخص  $a^*$  (قرمزی-سبزی) نمونه‌های ماست غنی شده تاثیر معنی دار دارد ( $p < 0.05$ )؛ اما فرایند ریزپوشانی به تنهایی تاثیری بر تغییر این شاخص ندارد ( $p > 0.05$ ). مطابق نتایج، افزایش روغن دانه چیا سبب کاهش شاخص  $a^*$  شد.

ریزپوشانی در طی دوره نگهداری و زمانی که شرایط برای اکسیداسیون روغن دانه چیا فراهم هست، مشخص می‌گردد. قربانزاده و همکاران (۲۰۱۷) نیز دریافتند که فرایند ریزپوشانی سبب کاهش سرعت افزایش پراکسید طی دوره نگهداری می‌گردد و تاثیر آن طی فرایند تولید چندان زیاد نمی‌باشد [۳۶].

### ۳-۵- تغییرات رنگ

رنگ سفید شیر به دلیل حضور ذرات کلونیدی مثل گلبول‌های چربی و میسل‌های کازئین می‌باشد [۳۷]. شاخص  $L^*$  یا میزان روشنی ماست تاثیر زیادی بر ظاهر و پذیرش محصول دارد. مطابق نتایج شکل ۶، افزودن روغن دانه چیا و فرایند ریزپوشانی تاثیر معنی دار افزایشی بر تغییر شاخص  $L^*$  نمونه‌های ماست غنی شده داشت ( $p < 0.05$ ) و در مقابل افزودن موسیلاژ دانه چیا به ماست تاثیر معنی داری بر تغییر شاخص  $L^*$  نمونه ریزپوشانی شده نداشت ( $p > 0.05$ ). نتایج بیان شده توسط نورمحمدی و همکاران در سال ۲۰۲۰، در غنی‌سازی ماست

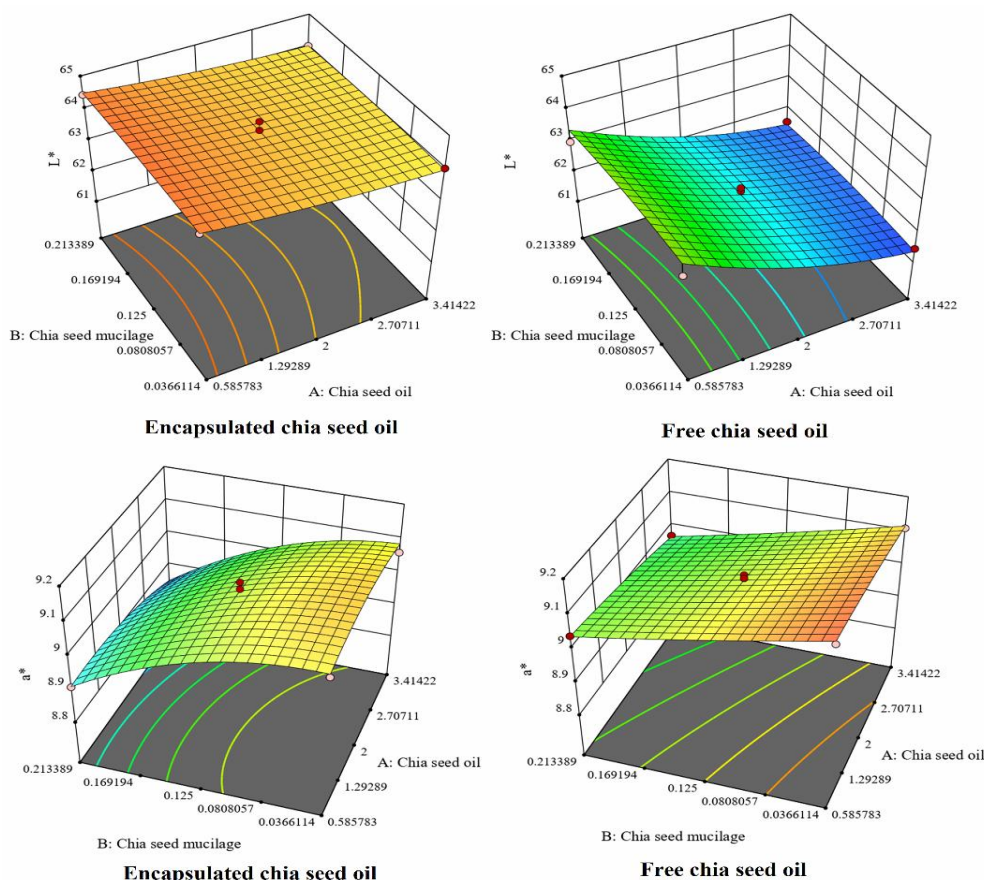


Fig 6 Chang in the  $L^*$  and  $a^*$  index of yogurt vs. independent variables.

بهتر می‌باشد. نتایج نشان داد که متغیرهای مستقل روغن و فرآیند درون‌پوشانی و رابطه متقابل بین این دو متغیر تاثیر معنی‌داری بر میزان تغییرات رنگ ماست غنی‌شده داشت ( $p < 0/05$ ) و این در حالی است که متغیر مستقل موسیلاژ و رابطه متقابل آن با دو عامل دیگر و اثرات درجه دوم آن تاثیر معناداری بر میزان تغییرات رنگ نداشت ( $p > 0/05$ ). با توجه به شکل ۷ تغییرات رنگ در نمونه‌های ریزپوشانی‌شده در مقایسه با نمونه شاهد تفاوت کمتری در مقایسه با نمونه‌های غنی‌شده با روغن به‌صورت آزاد داشت. غیبی و همکاران (۱۳۹۸) دریافتند که افزودن صمغ به‌دانه باعث افزایش میزان زردی ماست می‌شود که دلیل آن احتمالاً برهم‌کنش بین ذرات پروتئین و پلی‌ساکارید صمغ به‌دانه و در نتیجه ناپایدار شدن میسل کازئین می‌باشد [۳۹]. بیشتر افزایش معنی‌دار ( $p < 0/05$ ) تغییرات رنگ ماست با افزودن اینولین و صمغ دانه [۳۹]، صمغ دانه ریحان [۴۱] و صمغ بذر کتان [۴۰] توسط سایر پژوهشگران گزارش شده بود

غیبی و همکاران (۱۳۹۸)، طی پژوهشی که بر اثر افزودن اینولین و صمغ به‌دانه به ماست پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش مقدار اینولین و صمغ در ماست سبب کاهش شاخص  $a^*$  است، در این پژوهش شاخص  $a^*$  در محدوده رنگ سبز بود که یکی از دلایل کاهش این شاخص، کاهش میزان آب‌اندازی به دلیل افزودن اینولین و صمغ به‌دانه بود [۳۹]. مطابق شکل ۷، افزودن روغن دانه چیا و فرآیند درون‌پوشانی تاثیر معنی‌داری بر تغییر شاخص  $b^*$  نمونه‌های ماست غنی‌شده داشت ( $p < 0/05$ )؛ با این حال افزودن موسیلاژ دانه چیا تاثیر معنی‌داری بر تغییر این شاخص نداشت ( $p > 0/05$ ). مقدار شاخص  $b^*$  نمونه‌های ریزپوشانی‌شده در محدوده  $-0/62$  تا  $-0/11$  بود که مقادیر منفی نشان‌دهنده رنگ آبی نمونه‌ها می‌باشد و با افزایش مقدار روغن در نمونه‌های بدون ریزپوشش میزان شاخص  $b^*$  به بالاتر از صفر تغییر نمود که نشان‌دهنده ایجاد رنگ زرد در نمونه‌ها می‌باشد. هرچه قدر تغییرات رنگ ( $\Delta E$ ) نمونه‌های غنی‌شده نسبت به نمونه شاهد کمتر باشد از نظر مصرف‌کننده

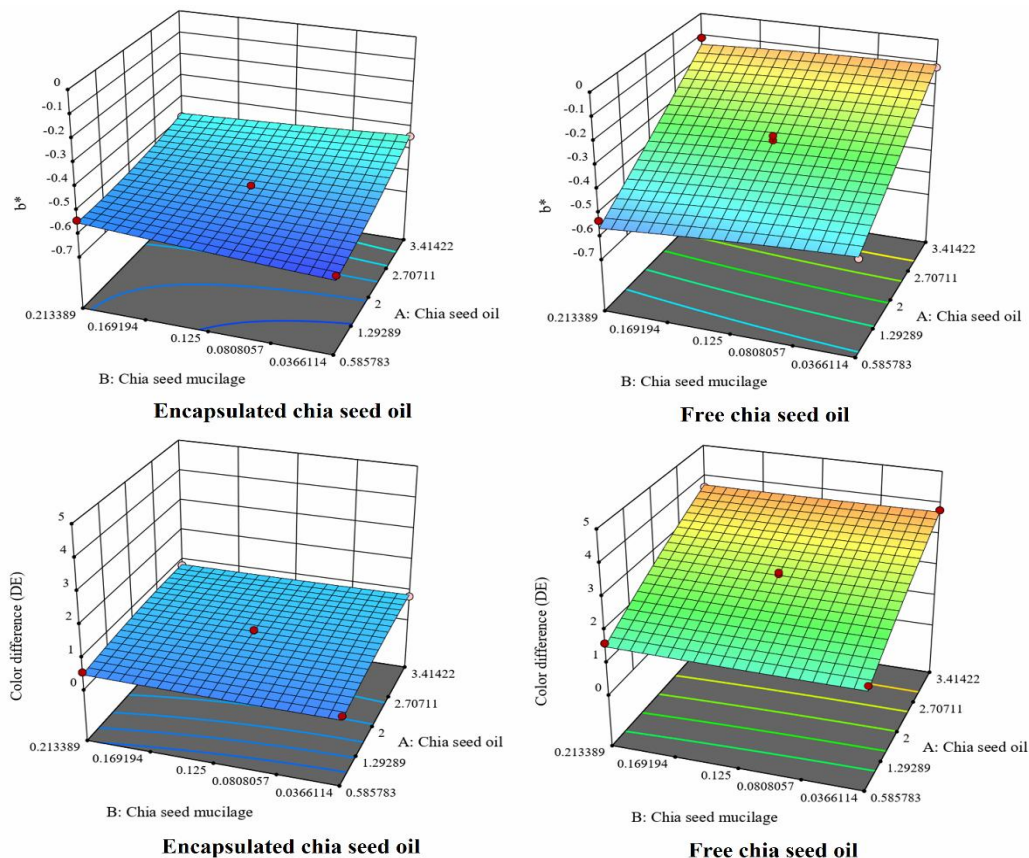
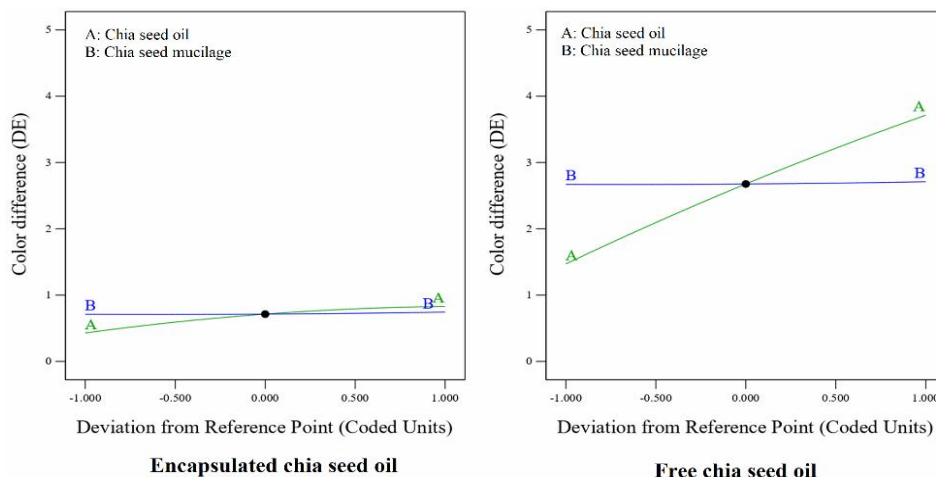


Fig 6 Chang in the  $b^*$  and  $\Delta E$  index of yogurt vs. independent variables.

اغتشاشی یا پرشیدگی نشان دهنده این است که علاوه بر تاثیر موثر شیب تند عوامل روغن و موسیلاژ دانه چیا بر پاسخ، تفاوت دو تصویر نشان دهنده تاثیر بسیار زیاد فرآیند ریزپوشانی بر تغییرات رنگ است، به طوری که پاسخ به شدت به وجود یا عدم وجود آن حساسیت نشان می‌دهد.



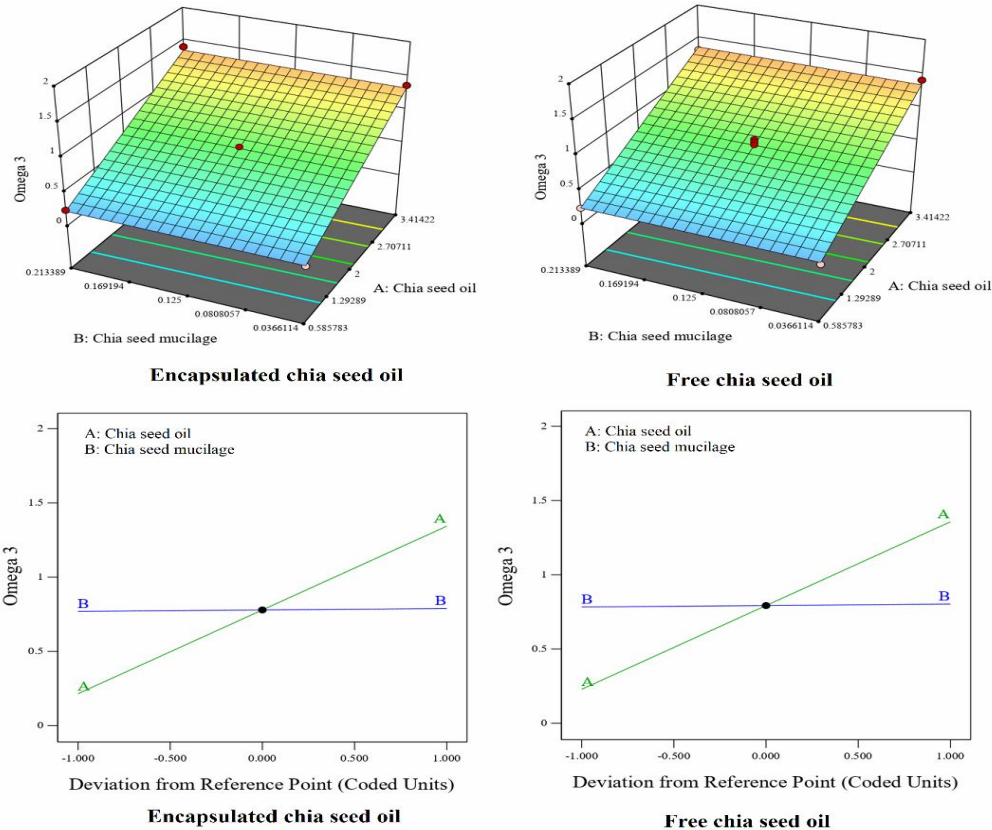
**Fig 8** The perturbation plot for the color differences change of yogurt

چندانی نکرده است پس احتمالاً میزان این اسیدهای چرب در نمونه‌های غنی‌شده در مقایسه با نمونه شاهد افزایش پیدا کرده است. مواد غذایی به عنوان منبع امگا ۳ در نظر گرفته می‌شوند که حداقل حاوی ۰/۳ گرم امگا ۳ در ۱۰۰ گرم باشند و مواد غذایی با حداقل ۰/۶ گرم امگا ۳ در ۱۰۰ گرم به عنوان منابعی با محتوای بالای امگا ۳ محسوب می‌شوند (Kowaleski et al., 2020). تاثیر متغیرهای مستقل فرآیند بر تغییرات امگا ۳ در نمودار اغتشاشی نشان داد که با توجه به شیب تند نمودار عامل افزودن روغن دانه چیا، بین متغیرهای عددی مورد مطالعه میزان روغن دانه چیا بیشترین تاثیر را بر امگا ۳ به عنوان پاسخ مورد مطالعه داشت و میزان حساسیت پاسخ به سایر عوامل ناچیز بود (شکل ۹).

### ۳-۶-۳ امگا ۳

با توجه به اینکه محصولات لبنی از نظر اسیدهای چرب ضروری غنی نمی‌باشند، می‌توان با افزودن ترکیبات غنی از اسیدهای چرب ضروری میزان این ترکیبات را در محصولات لبنی افزایش داد (نصرآبادی و همکاران، ۱۳۹۸). با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل واریانس (شکل ۹)، افزودن روغن دانه چیا به طور معنی‌داری باعث افزایش میزان امگا ۳ نمونه‌های ماست غنی‌شده گردید ( $p < 0/05$ ).

این در حالی است که افزودن موسیلاژ دانه چیا و فرآیند ریزپوشانی تاثیر معنی‌داری در تغییر میزان امگا ۳ نمونه‌های ماست نداشت ( $p > 0/05$ ). افزودن روغن دانه چیا به ماست می‌تواند سبب افزایش مقادیر اسید اولئیک، اسید لینولئیک و اسید آلفا-لینولئیک باشد و از آنجایی که مقادیر عدد پراکسید تغییر



**Fig 9** Change in the Omega 3 of yogurt vs. independent variables and their the perturbation plot.

### ۳-۷- بهینه سازی

نتایج مشابهی توسط کوالشکی و همکاران طی غنی سازی ماست با نسبت های مختلف دانه چیا و توت فرنگی به دست آمد. آن ها با بررسی نمایه اسیدهای چرب نمونه های ماست دریافتند که افزودن دانه چیا به ماست سبب کاهش میزان اسیدهای چرب اشباع در ماست در مقایسه با نمونه شاهد می گردد ( $p < 0/05$ ). همچنین نمونه های غنی شده از نظر اسیدهای چرب غیر اشباع و اسیدهای چند غیر اشباع تفاوت معنی داری ( $p < 0/05$ ) با نمونه شاهد داشتند [۸]. سایر پژوهش ها در ارتباط با غنی سازی ماست با ترکیبات غنی از اسیدهای چرب ضروری نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. به عنوان مثال نصرآبادی و همکاران که غنی سازی ماست با روغن خرفه<sup>۳۵</sup> را انجام دادند، شاهد افزایش میزان اسید لینولنیک، اسید اولئیک و اسید لینولئیک در نمونه های ماست در مقایسه با نمونه شاهد بودند؛ زیرا روغن خرفه همانند روغن دانه چیا غنی از اسیدهای چرب ضروری است [۳۰].

نتایج بهینه سازی عددی چند پاسخ با روش سطح پاسخ و با طرح مرکب مرکزی (CCD) با هدف به حداکثر رساندن ارزش غذایی و حداقل سازی هم زمان تغییرات حسی، شیمیایی و رنگی نسبت به نمونه شاهد و کمترین میزان آب اندازی به منظور تعیین سطوح مطلوب متغیرهای کمی و کیفی مستقل مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بهینه سازی عددی مقادیر متغیرهای مستقل را برای عامل روغن دانه چیا برابر ۳/۶۱ درصد به صورت ریزپوشانی و برای مقدار موسیلاژ دانه چیا برابر ۰/۲۱۳ درصد تعیین نمود. مطلوبیت این شرایط بهینه برابر ۰/۸۹۶ می باشد. مقدار مطلوبیت بین ۰ تا ۱ است و هرچه مقدار آن بیشتر باشد، یعنی شرایط بهینه انتخاب شده به اهداف تعیین شده برای بهینه سازی نزدیک تر است. تحت این شرایط بهینه، مقدار پاسخ های پیش بینی شده و تجربی در جدول ۲ نشان داده شده است. همان طور که در این جدول مشاهده می شود، تفاوت چندانی بین مقادیر تجربی و پیش بینی شده وجود ندارد.

به دلیل اینکه شیب نمودارتنشی-برشی با افزایش سرعت برشی کاهش می‌یابد، می‌توان دریافت که رفتار نمونه‌ها از نوع غیرنیوتنی رقیق‌شونده<sup>۳۷</sup> با تنش تسلیم (هرشل بالکلی) می‌باشد. رفتار رقیق‌شونده با برش برای نمونه‌های ماست حاوی موسیلاژ دانه چیا و ریزپوشش‌ها را می‌توان با ساختار ساختمان فضایی زنجیرهای نیمه‌سخت ساختار هیدروکلوئیدی موسیلاژ و همچنین به وجود ساختار ژل مانند ضعیف آن توضیح داد که باعث افزایش درگیری ماکرومولکولی نمونه بهینه می‌گردد. این رفتار برای بیشتر نمونه‌های پیچیده غذایی قابل مشاهده است، که ناشی از ساختار پلیمری و وزن مولکولی بالای آن‌ها است. قبلاً رفتار رقیق‌شونده با برش برای ماست غنی‌شده با صمغ گوار و موسیلاژ چیا گزارش شده است [۳۵]. در سیالات غیرنیوتنی از گرانروی ظاهری استفاده می‌شود. گرانروی ماست تحت تأثیر روش‌های فرآوری، نوع آغازگر، نوع عملیات حرارتی و ترکیب فرمولاسیون که به آن افزوده می‌شود قرار دارد [۴۲]. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، کاهش گرانروی در درجه برش‌های پایین شدیدتر است و با افزایش درجه برش کاهش گرانروی کاهش یافت، به طوری که در درجه برش‌های بالا مقدار گرانروی به مقدار ثابتی نزدیک می‌شود. نتایج پژوهش نورمحمدی و همکاران نشان داد که افزودن ریزپوشش سبب افزایش گرانروی در مقایسه با نمونه شاهد به دلیل جذب آب توسط ریز جلیک‌ها می‌گردد. به علاوه، جذب آب کربوهیدرات‌های خارج سلولی تولیدشده توسط اسپیرولینا باعث افزایش گرانروی ماست می‌شود. وجود آلزینات و پروتئین آب پنیر با خاصیت جذب آب زیاد باعث گرانروی بیشتر در نمونه‌های حاوی میکروکپسول می‌گردد [۳۸].

در این پژوهش برای بررسی رفتار رئولوژیکی مستقل از زمان نمونه‌های ماست از پنج مدل توان، بینگهام، هرشل-بالکلی، کاسون و ووکادلو استفاده شد. بر اساس جدول ۳، نتایج نشان داد که مدل هرشل-بالکلی در نمونه شاهد و بهینه‌کاری بالایی ( $R^2=0/999$ ) در توصیف رفتار رئولوژیکی نمونه‌ها ماست دارد. تنش تسلیم نقش بسیار مهمی در سیستم‌های دارای شبکه سه‌بعدی ایفا می‌کند.

**Table 2** Multi-response numerical prediction results.

	Predicted values	Experimental values
pH	4.57	04.52±0.11
Acidity	0.77	0.74±0.13
Dry matter	16.43	16.51±0.25
Syneresis	33.56	34.02±0.79
Peroxide value	0.2	0.1±0.1
Color differences	0.84	0.80±0.09
Omega 3	1.33	1.39±0.12

### ۳-۷-۱- شمارش باکتری‌های آغازگر (اسید لاکتیک)

ماست حاوی باکتری‌های اسید لاکتیک زنده و فعال مفید برای سلامتی انسان است و طبق مقررات انجمن ملی ماست برای انواع ماست، باکتری‌ها باید در پایان زمان ماندگاری اعلام شده فعال باشند. بنابراین زنده‌مانی باکتری‌ها در ماست‌های غنی‌شده باید بررسی شود. رشد و زنده‌مانی باکتری‌های اسیدلاکتیک متأثر از عوامل بسیاری از جمله نوع و گونه آن، میزان تلقیح، دمای گرم‌خانه‌گذاری، pH، عوامل تحریک‌کننده و بازدارنده از رشد، زمان نگهداری، غلظت متابولیت‌ها و در دسترس بودن مواد مغذی می‌باشد [۲۶]. نتایج شمارش باکتری‌ها نشان داد که غلظت باکتری‌های آغازگر در هر دو نمونه شاهد و بهینه بالاتر از غلظت ذکر شده در استاندارد کدکس<sup>۳۸</sup> ( $10^7$  CFU/g) است و تأثیر ریزپوشش‌ها بر تعداد باکتری‌های آغازگر در مقایسه با نمونه شاهد معنی‌دار نیست ( $p>0/05$ ). میانگین تعداد باکتری‌های /ستریپوکوس ترموفیلوس در نمونه شاهد و غنی‌شده به ترتیب برابر  $8/45$  و  $8/50$  واحد تشکیل کلنی در میلی‌لیتر بود. میانگین تعداد باکتری‌های لاکتوباسیلوس بولگاریکوس نیز در نمونه شاهد و غنی‌شده به ترتیب برابر  $7/06$  و  $7/65$  واحد تشکیل کلنی در میلی‌لیتر بود که اختلاف معنی‌دار با یکدیگر نداشت ( $p>0/05$ ). بکری و همکاران (۲۰۱۹)، نیز طی پژوهشی به بررسی اثر غنی‌سازی ماست با روغن نعنا و روغن ماهی تن غنی از امگا ۳ پرداختند، بیان کردند که افزودن روغن‌ها تأثیر معنی‌داری بر تعداد باکتری‌های اسیدلاکتیک نداشته است [۲۶].

### ۳-۷-۲- خصوصیات رئولوژیکی

مطابق شکل ۱۰، از آنجایی که رابطه تنش برشی بر حسب سرعت برشی در تمامی نمونه‌ها، یک رابطه غیرخطی است و از طرفی

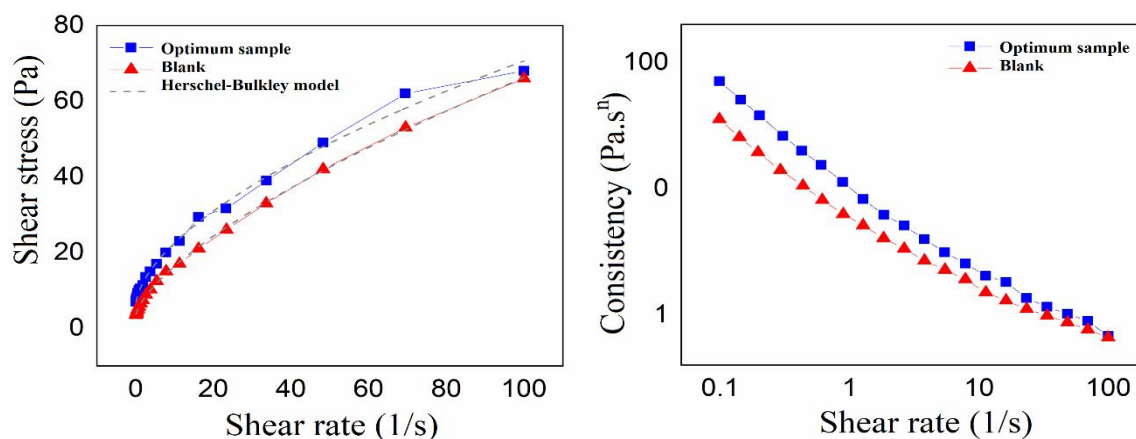


Fig 10 Shear stress-shear rate and consistency- shear plots for optimum and blank samples.

رفتار جریان سیال نشده است. همان طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، نمونه های حاوی ریزپوشش و موسیلاژ تنش تسلیم بالاتری را نشان دادند، که به ساختار ژل قوی تر ارتباط دارد. بنابراین وجود نمونه های ماست حاوی موسیلاژ و ریزپوشش روغن دانه چیا سبب افزایش ضریب قوام و تنش تسلیم و همین طور کاهش شاخص جریان شده است.

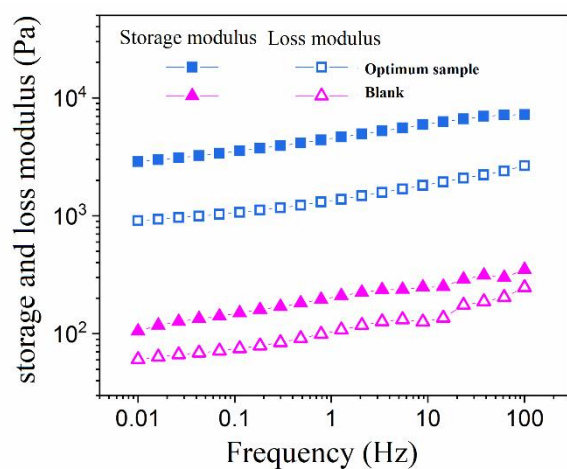
مدول ذخیره ( $G'$ )؛ میزان رفتار الاستیک و مقدار انرژی بازیابی شده در واحد حجم و مدول افت یا مدول ویسکوز ( $G''$ ) بیانگر میزان رفتار جریان و مقدار انرژی به هدر رفته در واحد حجم می باشد. مطابق شکل ۱۱، غالب بودن خاصیت کشسانی (الاستیک) به وجود ساختار شبکه ای و رفتار ژلی دلالت دارد. هر دو مدول الاستیک و ویسکوز به فرکانس وابسته هستند و با افزایش فرکانس مقادیر آن ها افزایش یافته است. افزودن ریزپوشش روغن دانه چیا و موسیلاژ دانه چیا به ماست سبب افزایش مدول ذخیره و افت نسبت به نمونه ی شاهد گردید و بالاتر بودن مدول ذخیره به افت نشان دهنده رفتار ژل گونه در این سیستم است. عدم تلاقی نمودارهای الاستیک و ویسکوز نشان می دهد که در محدوده زمانی مورد آزمایش هیچ تغییر فازی در نمونه ها رخ نداده است و همواره  $G'$  از  $G''$  بزرگتر می باشد؛ بنابراین پایداری کلیه ی نمونه ها از طریق این آزمون مورد تایید است [۴۳].

در تنش های برشی اعمال شده کم تر از تنش تسلیم، ماده مورد نظر مانند یک جامد الاستیک و برای مقادیر بالاتر از آن مانند یک مایع ویسکوز عمل می کند. بنابراین با وجود تنش تسلیم در نمونه های مورد نظر، مدل توان برای برازش داده ها مناسب به نظر نمی رسد. در مدل بینگهام نیز با عبور از تنش تسلیم، رفتار نیوتنی می گردد و به همین دلیل این مدل نیز نمی تواند در تعیین رفتار نمونه های مورد نظر مورد استفاده قرار گیرد. باید توجه داشت که نزدیکی شاخص ارزیابی در مدل ووکادلو و هرشل بالکلی از ماهیت یکسان این دو مدل نشأت می گیرد. وجود تنش تسلیم برای نمونه های ماست ممکن است به دلیل تعداد زیاد باندهای هیدروژنی در ساختار ماریچ آن ها باشد که منجر به ایجاد ساختار فضایی پایداری می گردد که در برابر جریان مقاومت می کند. تنش تسلیم همچنین نشان دهنده وجود پیوندهای جانبی و یا ساختارهای تعاملی در ماده است. بررسی داده های حاصل از آزمایش نمونه های ماست بهینه و شاهد نشان داد که مقادیر ضریب قوام و شاخص رفتار جریان به غلظت محلول بستگی دارد و با افزایش آن مقدار شاخص رفتار جریان کاهش و ضریب قوام افزایش می یابد. کاهش شاخص رفتار جریان با افزایش غلظت را می توان به افزایش درگیری بین مولکولی که سبب رفتار رقیق شوندگی با برش می گردد، نسبت داد. چون شاخص رفتار جریان در تمامی نمونه ها کم تر از یک بود، به عبارتی می توان نتیجه گرفت که، حضور موسیلاژ و روغن دانه چیا سبب تغییر در



**Table 4** Shear stress-shear rate parameters and consistency- shear plots for optimum and blank samples.

	Blank sample	Optimum sample
Power-law model		
K (Pa.s <sup>n</sup> )	4.58±0.29	8.72±0.61
n	0.57±0.016	0.44±0.018
R <sup>2</sup>	0.993	0.982
RMSE	1.51	2.56
Herschel-Bulkley model		
τ <sub>0</sub> (Pa)	3.04±0.17	5.75±0.69
K (Pa.s <sup>n</sup> )	2.79±0.10	4.31±0.49
n	0.67±0.008	0.58±0.02
R <sup>2</sup>	0.999	0.995
RMSE	0.38	1.1
Bingham model		
τ <sub>0</sub> (Pa)	6.71±0.82	11.41±1.19
μ <sup>p</sup> (Pa.s <sup>n</sup> )	0.65±0.02	0.66±0.03
R <sup>2</sup>	0.971	0.943
RMSE	3.13	4.54
Vocadlo model		
τ <sub>0</sub> (Pa)	3.74±0.21	7.22±0.55
K (Pa.s <sup>n</sup> )	7.37±0.64	35.16±9.20
n	0.63±0.008	0.51±0.01
R <sup>2</sup>	0.999	0.995
RMSE	0.51	1.19
Casson model		
τ <sub>0</sub> (Pa)	3.79±2.55	5.39±1.00
K (Pa.s <sup>n</sup> )	109.12±36.9	205.19±39.85
R <sup>2</sup>	0.660	0.805
RMSE	10.76	8.45

**Fig 11** Storage and loss modulus-frequency plot in optimum and blank samples.

شکل ۱۱ نشان می‌دهد مقادیر مدول الاستیک نمونه‌ها در محدوده فرکانس اعمال شده بالاتر از مدول ویسکوز می‌باشد در نتیجه می‌توان گفت همه نمونه‌ها دارای قابلیت تشکیل ژل ضعیف هستند که این قابلیت با افزودن ریزپوشش و موسیلاژ افزایش می‌یابد. با افزودن موسیلاژ، که به عنوان هیدروکلوئیدی خنثی طبقه‌بندی می‌شود، برهم‌کنش‌های غیرالکترواستاتیک بین موسیلاژ دانه چیا و توده‌های کازئینی اتفاق می‌افتد و این امر باعث افزایش خصوصیات الاستیکی ماست می‌شود؛ احتمالاً این هیدروکلوئید با برقراری اتصال با بارهای مثبت سطح میسل‌های کازئین، به تقویت شبکه کازئینی می‌پردازد و باعث افزایش مدول الاستیک می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری کلی

- hispanica L.) as a source of proteins and bioactive peptides with health benefits: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019. 18(2): p. 480-499.
- [5] Knez Hrnčič, M., et al., Chia Seeds (*Salvia hispanica* L.): an overview—phytochemical profile, isolation methods, and application. *Molecules*, 2020. 25(1): p. 11.
- [6] Ishak, I., et al., Optimization and characterization of chia seed (*Salvia hispanica* L.) oil extraction using supercritical carbon dioxide. *Journal of CO2 Utilization*, 2021. 45: p. 101430.
- [7] Özcan, M.M., et al., Effect of different microwave power setting on quality of chia seed oil obtained in a cold press. *Food Chemistry*, 2019. 278: p. 190-196.
- [8] Kowaleski, J., et al., Functional yogurt with strawberries and chia seeds. *Food Bioscience*, 2020. 37: p. 100726.
- [9] Sargi, S.C., et al., Antioxidant capacity and chemical composition in seeds rich in omega-3: chia, flax, and perilla. *Food Science and Technology*, 2013. 33: p. 541-548.
- [10] Ullah, R., et al., Nutritional and therapeutic perspectives of Chia (*Salvia hispanica* L.): a review. *Journal of food science and technology*, 2016. 53(4): p. 1750-1758.
- [11] Zandi, M., A. Ganjloo, and M. Bimakr, Encapsulation of musk willow (*Salix aegyptiaca* L.) essential oil with sodium alginate and whey protein: Characterization, controlled release and mathematical modeling. *Journal of food science and technology (Iran)*, 2022. 19(125): p. 121-133.
- [12] Zandi, M. and M. Mohebbi, Investigation of encapsulated diacetyl colloidosome release profile as a function of sintering process and release media properties. *Flavour and fragrance journal*, 2014. 29(6): p. 364-370.
- [13] Zandi, M., et al., Evaluation of diacetyl encapsulated alginate-whey protein microspheres release kinetics and mechanism at simulated mouth conditions. *Food Research International*, 2014. 56: p. 211-217.
- [14] Maes, C., S. Bouquillon, and M.-L. Fauconnier, Encapsulation of essential oils for the development of biosourced pesticides with controlled release: A review. *Molecules*, 2019. 24(14): p. 2539.
- مطالعه حاضر به منظور بررسی امکان غنی‌سازی ماست با روغن و موسیلاژ دانه چیا انجام شد. ابتدا به منظور افزایش پایداری اکسایشی روغن دانه چیا ریزپوشانی روغن آن به روش امولسیون‌سازی-ژلاسیون در پوشش آلژینات و موسیلاژ دانه چیا انجام شد. نتایج حاصل از ارزیابی فرایند ریزپوشانی نشان داد که میزان کارایی روش امولسیون‌سازی به منظور ریزپوشانی روغن دانه چیا برابر  $89/8 \pm 0/24$  درصد است. عبارت دیگر نزدیک به 90٪ درصد روغن دانه چیا اضافه شده، درون ریزپوشش‌ها محصور شد و تنها 10٪ از آن، بدون پوشش باقی ماند. نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان‌دهنده تشکیل موفقیت‌آمیز ریزپوشش آلژینات سدیم-موسیلاژ دانه چیا با ساختار پوسته یکنواخت بود. نتایج بدست آمده برای عدد پراکسید و راندمان درون‌پوشانی نشان می‌دهد که ریزپوشانی روغن دانه چیا به روش امولسیون‌سازی در پوشش آلژینات و موسیلاژ دانه چیا یک استراتژی موثر برای جلوگیری از اکسیداسیون روغن دانه چیا در ماست غنی شده است. نتایج بدست آمده از ویژگی‌های فیزیکی نشان داد که غنی‌سازی سبب کاهش آب‌اندازی، افزایش ظرفیت نگهداری و افزایش ویسکوزیته ماست گردید. تولید ماست حاوی ریزپوشش روغن دانه چیا و موسیلاژ آن که غنی از امگا 3 است، می‌تواند به عنوان یک ماده غذایی مغذی تقویت‌کننده سلامتی در نظر گرفته شود.

## 5- منابع

- [1] Campos, B.E., et al., Optimization of the mucilage extraction process from chia seeds and application in ice cream as a stabilizer and emulsifier. *LWT-Food Science and Technology*, 2016. 65: p. 874-883.
- [2] Marcinek, K. and Z. Krejpcio, Chia seeds (*Salvia hispanica*): health promoting properties and therapeutic applications-a review. *Roczniki Państwowego Zakładu Higieny*, 2017. 68(2).
- [3] Kulczyński, B., et al., The chemical composition and nutritional value of chia seeds—Current state of knowledge. *Nutrients*, 2019. 11(6): p. 1242.
- [4] Grancieri, M., H.S.D. Martino, and E. Gonzalez de Mejia, Chia seed (*Salvia*

- addition of microencapsulated chia seeds, pumpkin seeds and baru oils. Food chemistry, 2019. 274: p. 220-227.
- [26] Bakry, A.M., Y.Q. Chen, and L. Liang, Developing a mint yogurt enriched with omega-3 oil: Physicochemical, microbiological, rheological, and sensorial characteristics. Journal of Food Processing and Preservation, 2019. 43(12): p. e14287.
- [27] Chan, E.-S., et al., Effects of starch filler on the physical properties of lyophilized calcium-alginate beads and the viability of encapsulated cells. Carbohydrate polymers, 2011. 83(1): p. 225-232.
- [28] Najafabadi, T. and S. Hoseini Ghaboos, The effect of fat content changes on chemical and rheological properties of yogurt contains Jerusalem artichoke powder during storage. Journal of Food Research, 2020. 29(4): p. 153-169.
- [29] Najaf Najafi, M., H. Shateri, and M. Kashaninejad, The effect of konjac gum, sage seed gum, homogenization rate and fat content on pH, texture, and color of low fat stirred yogurt. 2021.
- [30] Ghorbani, M., Yogurt enrichment with Common purslane oil (Portulacaoleracea) and its physicochemical, antioxidant and sensory properties. Journal of food science and technology (Iran), 2019. 16(92): p. 23-36.
- [31] Kwon, H., et al., Chia seed extract enhances physicochemical and antioxidant properties of yogurt. Journal of dairy science, 2019. 102(6): p. 4870-4876.
- [32] Karami, P., M. Zandi, and A. Ganjloo, Evaluation of key parameters during ohmic-assisted hydro-distillation of essential oil from aerial part of yarrow (*Achillea millefolium* L.). Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2022. 31: p. 100425.
- [33] Jafari, R., M. Zandi, and A. Ganjloo, Effect of ultrasound and microwave pretreatments on extraction of anise (*Pimpinella anisum* L.) seed essential oil by ohmic-assisted hydrodistillation. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2022. 31: p. 100418.
- [34] Izadi, Z., et al., Optimization of producing enriched yogurt with phytosterols in order to reducing cholesterol content. Iranian Food Science & Technology Research Journal, [15] Zandi, M., et al., Identification of cardamom encapsulated alginate-whey protein concentrates microcapsule release kinetics and mechanism during storage, stew process and oral consumption. Journal of Food Process Engineering, 2017. 40(1): p. e12314.
- [16] Zandi, M., Evaluation of the Kinetics of Ascorbic Acid (AA) Release from Alginate-Whey Protein Concentrates (AL-WPC) Microspheres at the Simulated Gastro-Intestinal Condition. Journal of Food Process Engineering, 2017. 40(1): p. e12334.
- [17] Zandi, M., Vitamin protection by Alginate-Whey Protein Micro Gel (AL-WPC MG) as a novel microcapsule against gastrointestinal condition; case study: B-complex vitamins. Iranian Food Science and Technology Research Journal, 2020. 16(3): p. 14.
- [18] de Campo, C., et al., Nanoencapsulation of chia seed oil with chia mucilage (*Salvia hispanica* L.) as wall material: Characterization and stability evaluation. Food chemistry, 2017. 234: p. 1-9.
- [19] Naozuka, J., Elemental enrichment of foods: Essentiality and toxicity. Nutrition & Food Science International Journal, 2018. 4(3): p. 80-84.
- [20] Mannar, M.V. and N. Khan, Food Fortification: Rationale and Methods. 2016.
- [21] Ozturkoglu-Budak, S., C. Akal, and A. Yetisemiyen, Effect of dried nut fortification on functional, physicochemical, textural, and microbiological properties of yogurt. Journal of Dairy Science, 2016. 99(11): p. 8511-8523.
- [22] Us-Medina, U., et al., *Salvia hispanica* mucilage-alginate properties and performance as an encapsulation matrix for chia seed oil. Journal of Food Processing and Preservation, 2017. 41(6): p. e13270.
- [23] Muñoz-Tébar, N., et al., Enrichment of sheep cheese with chia (*Salvia hispanica* L.) oil as a source of omega-3. LWT, 2019. 108: p. 407-415.
- [24] Tamjidi, F., A. Nasirpour, and M. Shahedi, Physicochemical and sensory properties of yogurt enriched with microencapsulated fish oil. Food science and technology international, 2012. 18(4): p. 381-390.
- [25] Rojas, V.M., et al., Formulation of mayonnaises containing PUFAs by the

- [40] Marand, M.A., et al., Fortification of yogurt with flaxseed powder and evaluation of its fatty acid profile, physicochemical, antioxidant, and sensory properties. *Powder Technology*, 2020. 359: p. 76-84.
- [41] Kim, S.Y., et al., The quality characteristics, antioxidant activity, and sensory evaluation of reduced-fat yogurt and nonfat yogurt supplemented with basil seed gum as a fat substitute. *Journal of dairy science*, 2020. 103(2): p. 1324-1336.
- [42] Shahdadi, F., Study of various concentrations of resistant starch and chitosan on microstructure, rheological properties and viability of encapsulated probiotic bacteria in drinking yoghurt. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017. 9(2): p. 69-84.
- [43] Ein Ali Afjeh, M., et al., Effect of lactose, whey protein concentrat and skim milk powder on some rheological and sensory properties of set yoghurt with different somatic cell count. *Journal of food science and technology (Iran)*, 2015. 12(49): p. 209-218.
2011. 7(2): p. 156-164.
- [35] Atik, D.S., et al., Chia seed mucilage versus guar gum: Effects on microstructural, textural, and antioxidative properties of set-type yoghurts. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2020. 63.
- [36] Ghorbanzade, T., et al., Nano-encapsulation of fish oil in nano-liposomes and its application in fortification of yogurt. *Food chemistry*, 2017. 216: p. 146-152.
- [37] Ashrafi, R. and N. Gheybi, Investigation the effect of Dill extract (*Anethume graveolens*) using on the antioxidant and physicochemical properties of set yogurt. *JFST*, 2019. 84(15): p. 203-215.
- [38] Nourmohammadi, N., S. Soleimanian-Zad, and H. Shekarchizadeh, Effect of *Spirulina (Arthrospira platensis)* microencapsulated in alginate and whey protein concentrate addition on physicochemical and organoleptic properties of functional stirred yogurt. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020. 100(14): p. 5260-5268.
- [39] Gheybi, N. and R. Ashrafi, The Effect of Inulin and Quince Seed Gum Powder on the Physicochemical and Qualitative Properties of Low Fat Yogurt. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 2020. 50(4): p. 963-975.



## Fortification of yogurt with encapsulated chia seed oil and mucilage: optimization and evaluation of physicochemical and rheological properties

Seid Mohammadifard, S. Z.<sup>1</sup>, Zarringhalami, S.<sup>2\*</sup>, Zandi, M.<sup>2</sup>, Pakpour, M.<sup>3</sup>

1. Graduated M.s. student, Department of Food Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
2. Associate Professor, Department of Food Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
3. Assistant professor, Department of Materials, Energy and Quantum Technologies. Faculty of Convergent Technologies of Science, Pasargad Institute for Advanced Innovative Solutions (PIAIS), Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

### ABSTRACT

#### Article History:

Received 2023/ 02/ 21

Accepted 2023/ 04/ 10

#### Keywords:

Chia seed oil,  
Chia seed mucilage,  
Microencapsulation,  
Enrichment,  
Yogurt,  
Optimization.

**DOI:** 10.22034/FSCT.20.134.171

**DOR:** 20.1001.1.20088787.1402.20.134.13.7

\*Corresponding Author E-Mail:  
zandi@znu.ac.ir

The aim of the present study was to optimization of enriched yogurt with chia seed oil and mucilage. This purpose was done with the aim of maximizing omega-3 level and minimizing changes in physical and chemical properties (pH, titrate acidity, syneresis, dry matter, peroxide values and color changes) compared to the control sample. First, in order to increase the oxidative stability, chia seed oil was encapsulated with sodium alginate and chia seed mucilage using emulsification/ internal gelation method. The physical characteristics results showed that the enrichment caused a decrease in the syneresis, an increase in the water holding capacity and viscosity. Then, yogurt was enriched and optimized with free and encapsulated chia seed oil (0 to 4%) and chia seed mucilage (0 to 0.25%). The sample without chia seed mucilage and oil used as a control sample. The results of scanning electron microscopy images showed that the successful alginate-sodium-mucilage microfiber coating of chia seeds has been made with a uniform structure. Yogurt contained 3.41% encapsulated chia seed oil and 0.213% chia seed mucilage was selected as an optimum treatment. The results showed that the number of starter bacteria of optimum sample were not significantly different from the control ( $p > 0.05$ ). The texture of the yogurts was found to be viscoelastic. The flow behavior index in all samples was less than one, which indicates the non-Newtonian (pseudoplastic) behavior of the samples. Herschel Bally model had  $R^2$  and lowest RMSE in both samples, which indicates the suitability of this model to investigate the shear flow behavior in terms of shear velocity of samples.