

## بهینه‌سازی خصوصیات رئولوژیکی ماست چکیده تولید شده به روش فرآیند بدون آب‌گیری با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب

مصطفی کاشانی نژاد<sup>1</sup>، مسعود نجف نجفی<sup>2\*</sup>، محسن قدس روحانی<sup>3</sup>،

مرتضی کاشانی نژاد<sup>4</sup>

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، تولید فرآورده‌های نوین لبنی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.

2- دانشیار گروه صنایع غذایی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.

3- استادیار گروه صنایع غذایی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.

4- دانشجوی دکتری، مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

(تاریخ دریافت: 97/07/08 تاریخ پذیرش: 97/10/17)

### چکیده

روش‌های تولید ماست چکیده از روش‌های سنتی و پر زحمت مانند جدا کردن قسمتی از فاز سرمی در کیسه‌های پارچه‌ای تا روش‌های پیچیده‌تر، استفاده از روش‌های مناسب‌تر تولید مانند روش فرآیند بدون آب‌گیری (wheyless) توسط پودرهای پروتئینی حاصل از شیر را ضروری می‌سازد. لذا در این پژوهش اثر اجزاء مختلف فرمولاسیون ماست چکیده از جمله کنسانتره پروتئین شیر (mpc)، پودر آب پنیر (cwp) و صمغ کنجاک بر ویژگی‌های رئولوژیکی ماست چکیده با استفاده از طرح متقاطع مخلوط-فرآیند مورد بررسی قرار گرفت و سپس این خصوصیات با استفاده از مدل‌ای به دست آمده با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب بهینه گردید. نتایج حاصل از آزمون اصلاح شده اکسترژن برگشتی-آنالیز پروفیل بافت نشان داد که با افزایش میزان صمغ کنجاک سختی، چسبندگی و نیروی چسبندگی نمونه‌ها به طور معنی‌داری به ویژه برای نمونه‌های حاوی cwp بالاتر افزایش یافت در حالی که در مقادیر بالای صمغ کنجاک با افزایش میزان mpc و کاهش میزان cwp پیوستگی کاهش نشان داد. همچنین نتایج حاصل از آزمون کرنش متغیر نشان داد که با افزایش میزان صمغ کنجاک  $G''$  LVE،  $G'$  LVE،  $\tau_y$ ،  $\gamma_c$ ،  $G''$  LVE،  $G'$  LVE،  $\tau_f$  و  $G_f$  نمونه‌ها نیز به طور معنی‌دار به ویژه برای نمونه‌های حاوی cwp بالاتر افزایش پیدا کرد. نتایج بهینه درصد ترکیبات مختلف برای دستیابی به حداکثر سختی، پیوستگی،  $G''$  LVE،  $G'$  LVE،  $\tau_y$ ،  $\tau_f$  و  $G_f$  و حداقل چسبندگی، نیروی چسبندگی و  $G''$  LVE استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب در فضای مؤلفه‌های اصلی نشان داد که مقادیر بهینه به دست آمده از mpc و صمغ کنجاک واریانس بیشتری از داده‌های مربوط به پارامترهای رئولوژیکی را به خود اختصاص داده‌اند که نشان دهنده اهمیت و نقش مؤثر تقریباً یکسان صمغ کنجاک و mpc بر بهبود خواص رئولوژیکی ماست چکیده بود.

**کلید واژگان:** ماست چکیده، آزمون اصلاح شده اکسترژن برگشتی-آنالیز پروفیل بافت، الگوریتم کرم شب‌تاب، پودر آب پنیر، صمغ کنجاک، آزمون کرنش متغیر.

\* مسئول مکاتبات: mnajafi.mhd@gmail.com

## 1- مقدمه

لبنه یا ماست تغلیظ شده یک محصول نیمه جامد است که از ماست و به طریق آبدگیری و یا جدا کردن قسمتی از آب یا مواد محلول در آب به دست می آید. ارزش تغذیه ای بالا، قابلیت ماندگاری بیشتر، طعم و بافت مطلوب تر و امکان تهیه محصولات متنوع از این مصلو تخمیری، از جمله دلایل پذیرش بالای آن در بین مصرف کنندگان است [1]. از طرفی ساختار و خصوصیات رئولوژیکی ماست در تعیین پذیرش آن توسط مصرف کنندگان نقش دارد. این خواص خود وابسته به عواملی همچون میزان مواد جامد ماست، میزان چربی، میزان پروتئین های موجود، نوع و نسبت پروتئین ها، نوع و غلظت ثبات دهنده ها و یا قوام دهنده های مورد استفاده و شرایط فرآیندی نظیر عملیات حرارتی می باشند [2]. لذا ترکیب اجزاء شیر مورد استفاده برای تولید ماست یکی از مهم ترین پارامترها است. اگرچه تیمار حرارتی شیر پایه می تواند بر زمان تخمیر و خواص فیزیکی ماست مؤثر باشد، برهمکنش بین تیمار حرارتی با ترکیبات موجود در شیر پایه، مهم تر تشخیص داده شده است [3]. داده های مربوط به اثرات کمی و کیفی غنی سازی ماده خشک بر روی پارامترهای فیزیکی نظیر ویسکوزیته ظاهری، استحکام ژل یا حساسیت به آب اندازی توسط محققین زیادی ارائه گردیده است. نتایج مربوط به سفتی و آب اندازی ماست با نسبت اصلاح شده پروتئین سرم به کازئین تا حدودی در تعارض می باشند. به هر حال تمایل به سمت ژل های نرم تر و با ویسکوزیته کمتر برای محصولاتی که پروتئین سرم بالایی دارند، در مقایسه با محصولاتی که به همان میزان دارای پروتئین کازئین هستند، دیده می شود. در هر مورد، رعایت افزایش نسبت پروتئین سرم به کازئین به علت ایجاد طعم نامطلوب توصیه شده است [4].

تحقیقات جدید زیادی روی موضوع چگونگی تأثیر پروتئین های سرم بر بافت ماست انجام شده است [5]. اگر تشکیل ژل در شیر حرارت ندیده رخ دهد، تنها کازئین بر تشکیل ژل مؤثر است، اما

این مسئله پس از پیش گرم کردن شیر که منجر به دناتوراسیون پروتئین های سرم می شود، کاملاً متفاوت است [6]. پروتئین های سرم دناتوره شده که در زمان حرارت دهی، به سطح میسل های کازئین متصل شده اند، فاکتور بسیار مهمی در افزایش سختی در ژل های ماست تهیه شده از شیر حرارت دیده هستند [7]. این پروتئین ها موجب تجمع میسل ها در pH های بالاتر، به دلیل pH ایزوالکتریک بالاتر (5/3) پروتئین اصلی سرم، یعنی بتالکتوگلوبولین، نسبت به کازئین ها می شوند [8]. افزودن پروتئین های سرم ثبات و استحکام ماست های کم چرب را تقویت می کنند [9]. پیوند عرضی بیشتر ژل ها توسط پروتئین های سرم دناتوره شده استحکام ژل را افزایش می دهد [8]. از طرفی یکی از راه های افزایش قوام و بهبود بافت ماست و محصولات لبنی مشابه استفاده از هیدروکلوئیدها می باشد. این ترکیبات برای بهبود خواص رئولوژیکی و بافتی در صنایع غذایی کاربرد دارد و اغلب به عنوان مواد افزودنی به منظور افزایش ویسکوزیته، تشکیل ساختار ژل و افزایش مقاومت فیزیکی، تشکیل فیلم، کنترل تبلور، مهار آب اندازی و بهبود بافت به کار می روند. صمغ کنجاک، پلی- ساکاریدی خنثی است که از گیاهی پایا و چند ساله متعلق به خانواده (Araceae) و گونه (Amorphophalus Konjac) مشتق شده و به خوبی در کشورهای شرقی در طی قرن ها شناخته شده است [10]. قابلیت نگهداری آب، کاهش کلسترول و گلوکز در خون باعث مورد توجه قرار گرفتن این صمغ برای مصرف کننده شده است.

اغلب مسائل بهینه سازی در مهندسی علاوه بر غیر خطی بودن دارای محدودیت های زیادی هستند. بنابراین برای یافتن حل های بهینه برای این گونه مسائل غیر خطی به الگوریتم های بهینه سازی مؤثر و کارا نیاز می باشد. بسیاری از الگوریتم های فرا ابتکاری مدرن بر مبنای هوش جمعی و الهام گرفتن از طبیعت گسترش یافته اند و امروزه این الگوریتم های فرا ابتکاری پیشرفته با توجه به قدرت و کارایی شان در کاربرد های مختلف توسعه پیدا کرده-

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- انتخاب مواد اولیه

شیر گاو (ماده خشک 10/5 درصد، چربی 3/3 درصد، پروتئین 3/75 درصد، لاکتوز 5/63 درصد، خاکستر 0/86 درصد) از بازار محلی مشهد، شیر خشک بدون چربی (رطوبت 3/6 درصد، چربی 0/5 درصد، پروتئین 32/5 درصد، لاکتوز 45 درصد، خاکستر 8/5 درصد)، کنسانتره پروتئین شیر (رطوبت 4/1 درصد، چربی 0/5 درصد، پروتئین 69/5 درصد، لاکتوز 17 درصد، خاکستر 8/5 درصد)، پودر آب پنیر (رطوبت 2/3 درصد، چربی 0 درصد، پروتئین 5/4 درصد، لاکتوز 78 درصد، خاکستر 7/6 درصد) و آغازگر تجاری (ABY<sub>1</sub>, Cristian Hansen, Hørsholm, Denmark) از کارخانه پگاه خراسان رضوی و صمغ کنجاک تولید کشور چین نیز از شرکت Food Chem تهیه گردیدند.

### 2-2- روش تهیه ماست چکیده

به منظور تغلیظ هر چه بیشتر شیر مورد استفاده، به ازاء هر کیلوگرم شیر 3 درصد پودر شیر خشک بدون چربی به همه نمونه‌ها اضافه گردید و سپس مطابق طرح آزمایشی (جدول 1) کنسانتره پروتئین شیر و پودر آب پنیر نیز به نسبت‌های 0، 4، 6 و 8 درصد به آن اضافه شد به طوری که ماده خشک نهایی 21/5 درصد ثابت بود. صمغ کنجاک نیز با نسبت‌های 0، 0/05، 0/1، 0/15 و 0/2 درصد مطابق روش یازیسکی و آکگون (2004) در دمای 40°C اضافه شد. فرمولاسیون تهیه شده به این روش در دمای 50°C هم‌وزن گردید و به مدت 1 دقیقه در دمای 90°C پاستوریزه سپس تا دمای 43-45°C سرد شد [18]. باکتری‌های آغازگر در نظر گرفته شده به فرمولاسیون تهیه شده اضافه شد و به مدت 3-4 ساعت در دمای 45°C-43 نگهداری شدند. پس از رسیدن به اسیدیته مورد نظر مجدداً به آرامی هم‌زده شدند و سپس در ظروف پلی‌اتیلنی بسته‌بندی شدند. ماست چکیده تولید شده به سردخانه جهت

اند. الگوریتم کرم شب‌تاب<sup>1</sup> نیز یکی از جدیدترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر هوش دسته‌جمعی است که اولین بار در سال 2008 توسط فردی به نام یانگ معرفی شد [11]. به طور خلاصه نحوه عملکرد الگوریتم کرم شب‌تاب بدین صورت است که ابتدا تعدادی کرم شب‌تاب مصنوعی به طور تصادفی در دامنه مسأله توزیع می‌شوند و سپس هر کرم شب‌تاب از خود نوری ساطع می‌کند که شدت آن متناسب با میزان بهینگی نقطه‌ای است که آن کرم شب‌تاب در آن واقع شده است. سپس شدت نور هر کرم شب‌تاب مرتباً با شدت نور سایر کرم‌ها مقایسه شده و کرم شب‌تاب کم نورتر به سوی انواع پر نورتر جذب می‌شود. در عین حال پر نورترین کرم شب‌تاب نیز با هدف افزایش شانس یافتن جواب بهینه سراسری به طور تصادفی در دامنه مسئله حرکت می‌کند. این الگوریتم برای پیدا کردن نقطه بهینه عمومی در برخی کاربردها مورد آزمون قرار گرفته و از کارایی بالایی برخوردار بوده است [11]. یاماس نیز پارامترهای بهینه فرایند خشک شدن اسمزی قارچ‌ها را با استفاده از این الگوریتم تعیین نمود [12].

همچنین در پژوهش‌های مختلف به بررسی اثر ترکیب شیمیایی و روش‌های مختلف تولید [13، 14] و افزایش نوع ماده خشک [15، 16] و به کارگیری هیدروکلوئیدها [17] بر خواص رئولوژیکی ماست چکیده پرداخته شده است که علی‌رغم تحقیقات بر روی خواص انواع ماست چکیده، مطالعه‌ای بر روی خواص رئولوژیکی ماست چکیده تولید شده به روش فرآیند بدون آب‌گیری وجود ندارد. از این رو هدف این تحقیق، بررسی و بهینه سازی تأثیر اثر اجزاء مختلف فرمولاسیون از جمله کنسانتره پروتئین شیر، پودر آب پنیر و صمغ کنجاک و برهم‌کنش آنها بر روی ویژگی‌های رئولوژیکی ماست چکیده با استفاده از از طرح متقاطع مخلوط-فرآیند و الگوریتم کرم شب‌تاب بود به طوری که از لحاظ اقتصادی تولید ماست چکیده با تعیین ترکیب بهینه نیز مقرون به صرفه باشد.

1. Firefly Algorithm

دو صفحه موازی با قطر 50 میلی متر و فاصله دو صفحه (gap) 2 میلی متر بود. همچنین از نرم افزار Rheoplus/32, version V3.40 جهت تعیین پارامترهای رئولوژیکی مختلف ( $G'$ ,  $G''$  و  $\eta^*$ ) استفاده شد. دمای صفحه پایینی نیز با به کارگیری سیستم پلتر کنترل شد و برای حفظ یکنواخت دما در حالت فعال در طی آزمون نمونه ها با یک هود اختصاصی دستگاه محافظت شدند. آزمون تنش متغیر در محدوده 0/01 تا 100 درصد و فرکانس یک هرتز و در دمای 20°C برای تعیین مدول الاستیک در ناحیه خطی ( $G'_{LVE}$ )، مدول افت در ناحیه خطی ( $G''_{LVE}$ )، کرنش بحرانی ( $\gamma_c$ )، تنش تسلیم ( $\tau_y$ )، تانژانت اتلاف در ناحیه خطی ( $\tan \delta_{LVE}$ )، تنش تسلیم در نقطه جریان ( $\tau_f$ ) و مدول الاستیک در نقطه جریان ( $G_f$ :  $G' = G''$ ) انجام گرفت [20].

## 2-5- طرح آزمایش و آنالیز آماری

در این پژوهش اجزای طرح مخلوط شامل mpc به میزان 0 تا 8 درصد و cwp به میزان 0 تا 8 درصد تعریف شد، به طوری که این اجزاء 8 درصد وزن فرمول کلی را تشکیل دادند و فاکتور فرآیند شامل صمغ کنجاک به میزان 0 تا 0/2 درصد بود. به صورتی که تعداد کل تیمارهای نهایی حاصل از طرح متقاطع مخلوط - فرآیند 14 تیمار شد. نتایج پژوهش با استفاده از نرم افزار آماری (Design-Expert version 10) به روش طرح آزمایشی متقاطع مخلوط - فرآیند آنالیز شد و هر یک از متغیرهای پاسخ در قالب مدل رگرسیون ترکیبی (استف) ارائه شد [21]. سپس با استفاده از جدول آنالیز واریانس (ANOVA) معنی دار بودن اثرات خطی، درجه دوم و متقابل ضرایب مدل رگرسیون برای هر پاسخ در سطوح 0/001، 0/01، 0/05 بررسی شد.

خنک شدن و نگهداری منتقل شد و بعد از 24 ساعت آزمون - های مورد نظر بر روی آن انجام گردید.

## 2-3- آزمون اصلاح شده اکسترژن برگشتی - آنالیز پروفیل بافت<sup>2</sup>

برای انجام آزمون اصلاح شده اکسترژن برگشتی - آنالیز پروفیل بافت از دستگاه (( Texture Analyzer (Stable Micro Systems, London, UK) استفاده شد [19]. جهت انجام این آزمون از سیلندر با قطر 50 میلی متر و ارتفاع 100 میلی متر و پروب با قطر 45 میلی متر و ارتفاع 100 میلی متر و سرعت حرکت پروب 1 میلی متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. نمونه های ماست چکیده در دمای 10°C، تا 60% ارتفاع اولیه (ارتفاع 40 میلی متر سیلندر) طی دو سیکل توسط دستگاه اکسترود شدند. صفات مورد اندازه گیری عبارت بودند از سختی<sup>3</sup> (ارتفاع پیک اصلی در منحنی اول در مرحله و با واحد نیوتن)، پیوستگی<sup>4</sup> (سطح زیر منحنی دوم در مرحله رفت به سطح زیر منحنی اول در مرحله رفت)، حالت فنری<sup>5</sup> (فاصله بین شروع منحنی دوم تا رسیدن این منحنی به پیک)، حالت صمغی<sup>6</sup> (مقدار آن از حاصل ضرب مقادیر سختی در پیوستگی)، حالت آدامسی<sup>7</sup> (حاصل ضرب مقادیر حالت فنری در حالت صمغی) و چسبندگی<sup>8</sup> (مساحت زیر نمودار در قسمت منفی) و نیروی چسبندگی<sup>9</sup> (بیشترین مقدار نیرو در قسمت منفی).

## 2-4- آزمون رئولوژیکی دینامیکی (آزمون کرنش متغیر)

اندازه گیری پارامترهای رئولوژیکی دینامیک با استفاده از رئومتر پارفیزیکا انجام پذیرفت. این رئومتر مجهز به هندسه

2. Modified Texture Profile Analysis (TPA) and back extrusion
3. Hardness
4. Cohesiveness
5. Springiness
6. Gumminess
7. Chewiness
8. Adhesiveness
9. Adhesive Force

**Table 1** Coded range of process and mixture variable of the labane samples.

| Independent variables name   | Symbol | Variable Type | Variable Range |     |
|------------------------------|--------|---------------|----------------|-----|
|                              |        |               | +1             | -1  |
| Milk protein concentrate (%) | X1     | Mixture       | 0              | 8   |
| Cheese whey powder (%)       | X2     | Mixture       | 0              | 8   |
| Konjac gum (%)               | X3     | Process       | 0              | 0.2 |

$$I = I_0 e^{-yr} \quad (4)$$

$I_0$  شدت نور اولیه و  $y$  ضریب جذب نور می‌باشد.

میزان جذب کرم شب‌تاب با شدت نوری که از کرم‌های شب‌تاب اطراف ساطع می‌شود، متناسب است. بنابراین مقدار جذابیت یک کرم شب‌تاب طبق رابطه (5) تعریف شده است:

$$\beta = \beta_0 e^{-yr^2} \quad (5)$$

$\beta_0$  مقدار جذابیت در مسافت صفر است. شبه کد الگوریتم کرم

شب‌تاب در زیر نمایش داده شده است.

#### Firefly Algorithm

Objective function  $f(x)$ ,  $x=(x_1, \dots, x_d)$

Initialize a population of fireflies  $x_i$  ( $i=1, \dots, n$ )

Define light absorption coefficient

while ( $t < \text{Maxgeneration}$ )

for  $i=1 : n$  all  $n$  fireflies

for  $j=1 : i$  all  $n$  fireflies

Light intensity  $I_i$  at  $x_i$  is determined by  $f(x_i)$

If ( $I_j > I_i$ )

Move firefly  $i$  toward  $j$  in all  $d$  dimensions

end if

Attractiveness varies with distance  $r$  via  $\exp[-\beta]$

Evaluate new solutions and update light intensity

end for  $j$

end for  $i$

Rank the fireflies and find the current best

end while

Post-process results and visualization

فاصله بین هر دو کرم شب‌تاب  $i$  و  $j$  در  $X_i$  و  $X_j$  را می‌توان از مختصات کارتزین طبق رابطه (6) به دست آورد:

$$r_{ij} = \|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^n (X_{i,k} - X_{j,k})^2} \quad (6)$$

$X_{i,k}$  جزء  $k$  از کرم شب‌تاب  $i$  است.

در این الگوریتم کرم‌های شب‌تاب به سمت کرم‌های با جذابیت بیشتر حرکت می‌کنند. در هر مرحله میزان جابجایی کرم جذب شده  $i$  به سوی کرم شب‌تاب جذاب‌تر (روشن‌تر)  $j$  توسط رابطه (7) تعیین می‌شود [23]:

## 2-6- بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم کرم

### شب‌تاب

یانگ الگوریتم کرم شب‌تاب را بر اساس فرضیه‌های زیر فرموله کرده است [22]:

الف) کرم‌های شب‌تاب فاقد جنسیت می‌باشند، بنابراین یک کرم شب‌تاب می‌تواند توسط تمامی کرم‌های شب‌تاب دیگر جذب شود.

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

ج) اگر هیچ کرم شب‌تاب نورانی‌تری نباشد، کرم شب‌تاب به صورت تصادفی حرکت خواهد کرد.

د) روشنایی باید با تابع هدف در ارتباط باشد بنابراین جذابیت یک کرم شب‌تاب بر اساس درخشندگی یا شدت نوری تعیین می‌شود که از تابع هدف به دست آمده است.

در ساده‌ترین حالت برای مسائل بهینه‌سازی که در آن مقدار بیشینه تابع هدف به دست می‌آید، بیشینه روشنایی،  $I$  یک کرم شب‌تاب در مکان منحصر به فرد  $X$  می‌تواند مقدار روشنایی با تابع هدف متناسب شود  $(I(X) \propto F(X))$ . با این حال جذابیت  $\beta$ ، کاملاً نسبی است و باید در چشمان ناظر دیده شود و یا توسط کرم‌های شب‌تاب دیگر قضاوت شود. بنابراین جذابیت با مسافت  $r_{ij}$  بین کرم شب‌تاب  $i$  و کرم شب‌تاب  $j$  تغییر می‌کند. شدت نور با افزایش فاصله از منبعش کاهش می‌یابد و نور در محیط نیز جذب می‌شود، بنابراین باید اجازه داده شود جذابیت با درجه جذب تغییر کند. در ساده‌ترین حالت شدت نور  $I(r)$  با مسافت  $r$  به طور پیوسته و نمایی تغییر می‌کند. بیان ریاضی تغییرات شدت نور در رابطه (4) آمده است [23]:

### 3-1- مدل سازی

معادلات به دست آمده برای پیش‌بینی متغیرهای وابسته با استفاده از طرح آزمایشی متقاطع مخلوط - فرآیند برای متغیرهای معنی‌دار در جدول 2 آمده است. برای بررسی صحت مدل از ضرایب تبیین ( $R^2$ ) و تست عدم برازش استفاده گردید. همان‌طور که در جدول 2 نشان داده شده است ضریب تبیین برای کلیه صفات اندازه‌گیری شده بالاتر از 0/8 بوده و فاکتور عدم برازش نیز برای کلیه صفات اندازه‌گیری شده در سطح اطمینان 95% معنی‌دار نمی‌باشد. بنابراین بالا بودن ضریب تبیین و معنی‌دار نبودن عدم برازش برای تمامی پاسخ‌ها صحت مدل را برای برازش اطلاعات تأیید می‌کند. برای مشاهده بهتر اثر متغیرهای مستقل بر روی صفات مورد آزمایش، نمودارهای سطح پاسخ برای هر صفت رسم گردید.

$$X_i = X_j + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_i - x_j) + \alpha \in_i \quad (7)$$

عبارت دوم رابطه فوق با جذب در ارتباط است، در حالی‌که عبارت سوم تصادفی است که با بردار تصادفی  $\varepsilon_i$  تغییر می‌کند که از توزیع نرمال تبعیت می‌نماید. پارامتر  $\gamma$  تغییر جذابیت را مشخص می‌کند و مقدار آن مشخص‌کننده تعیین سرعت همگرایی و چگونگی رفتار الگوریتم کرم شب‌تاب است. در نهایت زمانی که  $\gamma=0$ ، جذابیت ثابت است یعنی  $\beta=\beta_0$  می‌باشد. روابط بهینه‌سازی فرمولاسیون با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب توسط نرم افزار متلب (a 2016) انجام شد و سپس با استفاده از روش تحلیل مؤلفه اصلی به کمک نرم افزار XLSTAT 2014 ارتباط بین داده‌ها و نوع همبستگی بین پاسخ‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

### 3- نتایج و بحث

**Table 2** Predicted models for the rheological parameters of the labane samples.

| Dependent variable  | Equation                                                                                                                      | F Value | p-value Probe > F | R <sup>2</sup> | CV    | Lack of fit |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------|----------------|-------|-------------|
| Hardness            | $y_3 = 1/193A + 0/4094B - 0/076AB - 12/332AC - 0/152BC + 0/517ABC + 45/942AC^2 - 0/011AC^2$                                   | 21.97   | 0.0001            | 0.951          | 16.30 | n.s.        |
| Cohesiveness        | $y_4 = 0/027A + 0/0294B - 1/203AB + 0/036AC + 0/133BC - 0/178AC^2 - 0/949AC^2$                                                | 7.99    | 0.0175            | 0.92           | 6.64  | n.s.        |
| Adhesiveness        | $y_5 = 0/002A - 0/002B - 0/0001AB + 0/0004AC + 0/0003BC + 0/113AC^2 - 0/019AC^2$                                              | 27.46   | 0.0010            | 0.97           | 30    | n.s.        |
| Adhesiveness force  | $y_6 = 0/595A + 0/084B - 0/021AB - 7/24AC + 0/48BC + 0/187ABC + 27/186AC^2 + 2/066AC^2$                                       | 3.63    | 0.048             | 0.85           | 30    | n.s.        |
| G' LVE (Pa)         | $y_7 = 655/155A + 240/54B + 1950/43AB - 9785AC - 2030/5BC + 12889ABC + 3600AC^2 + 12269AC^2$                                  | 70.67   | 0.0001            | 0.99           | 9.21  | n.s.        |
| G'' LVE (Pa)        | $y_8 = 183/86A + 70/98B + 562/73AB - 2737AC - 684/2BC + 4161ABC + 1057AC^2 + 4533AC^2$                                        | 298.21  | 0.0001            | 0.99           | 4.45  | n.s.        |
| $\gamma_c$ (%)      | $y_9 = 1/46A + 0/533B - 2/90AB + 34/54AC - 13/2BC - 15/93ABC - 190/99AC^2 + 101AC^2$                                          | 15.48   | 0.0092            | 0.96           | 26.94 | n.s.        |
| $\tau_y$ (Pa)       | $y_{10} = 5/87A + 0/114B + 4/164C - 33AC + 22/14BC$                                                                           | 4.08    | 0.0432            | 0.70           | 29.94 | n.s.        |
| $\tau_f$ (Pa)       | $Y_{11} = 0.037x_1 + 0.044x_2 + 0.058x_3 + 0.039x_1x_2 + 0.27x_1x_3 - 0.026x_2x_3 - 4.55x_1^2x_2x_3 - 2.16x_1x_2^2x_3 + 10.1$ | 60.97   | 0.0012            | 0.99           | 9.21  | n.s.        |
| $\tan \delta_{LVE}$ | $y_5 = 2/33 + 0/91A + 2/08B + 0/80C$                                                                                          | 5.51    | 0.042             | 0.65           | 13.64 | n.s.        |
| G <sub>f</sub> (Pa) | $y_{12} = 115/45A + 14/82B - 21/32AB - 1338AC - 248/8BC + 138/8ABC + 4335AC^2 + 3140AC^2$                                     | 8.35    | 0.0159            | 0.93           | 29    | n.s.        |

عوامل مختلف از جمله محتوای کازئین شیر، مقدار چربی، تیمار حرارتی، نوع کشت، دمای گرمخانه‌گذاری، درجه حرارت نمونه در زمان اندازه‌گیری سختی می‌باشد [24]. بر اساس پژوهش‌های انجام شده وقتی شیر با استفاده از cwp و یا کازئینات غنی می‌شود نسبت به وقتی که تنها از شیرخشک برای غنی‌سازی استفاده شده است، ماستی با سختی بیشتر به دست آمده است [17]. در واقع پروتئین سرم دنا توره شده طی فرایند حرارتی به سطح میسل‌های کازئین متصل شده‌اند، یکی از فاکتورهای اساسی در افزایش سختی ژل‌های حرارت داده شده هستند [7]. به عقیده کرزمسکی و همکاران (2011) پیوندهای اصلی در ژل‌های کازئین و کازئین-پروتئین سرم، سختی ژل را تحت تاثیر قرار می‌دهد و در این زمینه پیوندهای کووالان دارای تاثیر بیشتری بر سختی ژل نسبت به پیوندهای غیر کووالان هستند [9]. به احتمال زیاد خاصیت سختی کمتر نمونه‌های غنی شده با cwp و mpc در غلظت‌های مختلف صمغ به انرژی برهمکنش بین ذرات نسبت داده می‌شود. همچنین در حجم‌های بالای فراکسیون پروتئین سرم می‌تواند احتمال برهمکنش‌های شدید ذرات بین پروتئین سرم دنا توره شده و میسل‌های کازئین در شیر مصرفی در تهیه ماست طی حرارت‌دهی را افزایش دهد و موجب افزایش تعداد پیوندهای کووالان دی‌سولفیدی در ساختمان ژل طی تشکیل شبکه شود [25].

افزودن صمغ کنجاک نیز به نمونه‌های ماست، به علت قرارگیری پلی‌ساکاریدهای تشکیل‌دهنده هیدروکلوئید در میان میسل‌های کازئین، موجب ایجاد تداخل در تشکیل شبکه سه‌بعدی پروتئین شده که به نظر می‌رسد این تداخل با تغییرات نوع پروتئین متفاوت خواهد بود در نتیجه افزودن صمغ کنجاک در مقادیر بالای mpc منجر به کاهش سختی و در مقادیر بالای cwp منجر به افزایش سختی گردید. افزایش غلظت صمغ با افزایش فعل و انفعال هیدروکلوئید-پروتئین و تغییر در آرایش شبکه ژلی، منجر به ایجاد تغییرات در بافت خواهد شد. افزایش سختی ماست در طول زمان نیز، به تغییر آرایش و اتصال پروتئین‌ها نسبت داده می‌شود [26].

### 2-2-3- پیوستگی

نتایج تحقیق نشان داد که پیوستگی نمونه‌های مورد آزمون بین

## 3-2- ویژگی‌های رئولوژیکی تغییر شکل وسیع

### ماست چکیده

### 3-2-1- سختی

نتایج تحقیق نشان داد که سختی نمونه‌های مورد آزمون بین 3/25 تا 9/58 نیوتن متغیر بود. بر اساس نتایج تحلیل واریانس مدل متقاطع منتخب (Quadratic x Linear) اثرات متقابل kg-mpc و kg-cwp و mpc-cwp در سطح 99 درصد بر روی سختی نمونه‌ها معنی‌دار بود. شکل 1 تاثیر cwp mpc و صمغ کنجاک بر روی سختی نمونه‌های ماست چکیده را با توجه به معادله  $y_1$  جدول 2 نشان می‌دهد.

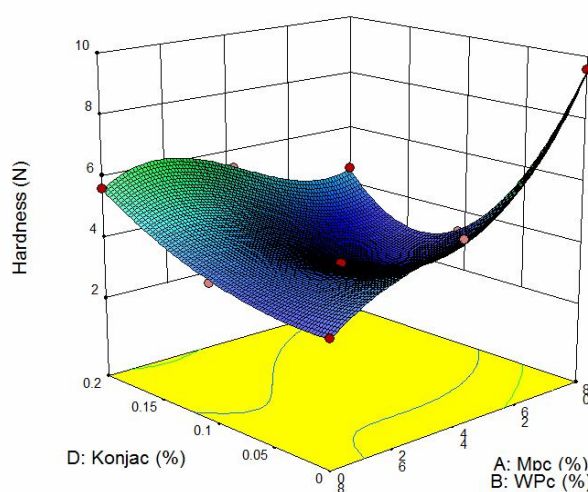


Fig 1 Effect of MPC, CWP and KG on hardness of the model labane samples

همان‌طور که در شکل 1 مشاهده می‌شود با افزایش میزان صمغ کنجاک سختی نمونه‌ها نیز به طور معنی‌دار به ویژه برای نمونه‌های حاوی cwp بالاتر افزایش یافت. همچنین طبق شکل 1 مشخص گردید در مقادیر کم صمغ کنجاک با افزایش میزان mpc و کاهش میزان cwp سختی نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است به طوری که بیشترین میزان سختی در نمونه‌های حاوی بالاترین میزان mpc مشاهده شد. این در حالی بود که سختی نمونه‌ها در مقادیر بالای صمغ کنجاک با افزایش میزان mpc و کاهش میزان cwp ابتدا کمی افزایش و سپس کاهش یافت که این امر نشان‌دهنده نقش بیشتر صمغ کنجاک بر cwp نسبت به mpc بود. مقدار سختی اندازه‌گیری شده در ماست وابسته به

0/15 تا 0/25 متغیر بود. بر اساس نتایج تحلیل واریانس مدل متقاطع منتخب (Cubic× Quadratic) تنها اثرات خطی  $mpc$  و  $cwp$  در سطح 95 درصد و اثر متقابل  $cwp - kg$  در سطح 99 درصد بر روی پیوستگی نمونه‌ها معنی‌دار بود. همچنین نتایج پژوهش نشان داد که در مقادیر کم صمغ کنجاک با تغییرات میزان  $mpc$  و  $cwp$  پیوستگی نمونه‌ها چندان تغییر نمی‌یابد در حالی که در مقادیر بالای صمغ کنجاک با افزایش میزان  $mpc$  و کاهش میزان  $cwp$  پیوستگی نمونه‌ها کاهش یافت و با توجه به اینکه فقط اثر متقابل  $cwp - kg$  بر پیوستگی معنی‌دار بود می‌توان به نقش مؤثر اثر متقابل  $cwp$  و صمغ کنجاک بر پیوستگی نمونه‌ها پی برد. شاخص پیوستگی تحت عنوان قدرت پیوندهای داخلی غذاها تعریف می‌شود و قدرت کششی و پیوستگی غذاها را نشان می‌دهد [27]. مطالعات انجام شده توسط اوزر و همکاران (2003) با میکروسکوپ الکترونی نشان داد که نمونه‌های حاوی مقادیر بالاتر پروتئین ساختارهای فشرده‌تری دارند. عزیزنیا و همکاران (2007) تأثیر کنسانتره‌ی آب پنیر در غلظت‌های مختلف را به عنوان یک جایگزین چربی بر خواص فیزیکی، شیمیایی و ساختاری ماست بدون چربی مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که افزایش کنسانتره‌ی آب پنیر موجب ایجاد ساختار فشرده و قوی حاوی اجزای کازئین، افزایش نرمی و کاهش آب‌اندازی گردید [26].

### 3-2-3- حالت فنی

حالت فنی نمونه‌های مورد آزمون بین 3/77 تا 14/39 میلی‌متر متغیر بود. همچنین نتایج بررسی‌ها نشان داد که هیچ‌کدام از اثرات خطی، درجه دوم و متقابل اثرات  $mpc$ ،  $cwp$  و صمغ کنجاک بر حالت فنی نمونه‌ها معنی‌دار نبود ( $P>0/05$ ).

### 3-2-4- چسبندگی و نیروی چسبندگی

نتایج تحقیق نشان داد که چسبندگی و نیروی چسبندگی نمونه‌های مورد آزمون به ترتیب بین 0/0003 تا 0/0225 نیوتن متر و 0/592 تا 4/609 نیوتن متغیر بود. بر اساس نتایج تحلیل واریانس مدل متقاطع منتخب هر دو پاسخ چسبندگی و نیروی چسبندگی

(Cubic× Quadratic) اثرات خطی  $mpc$  و  $cwp$  و اثرات متقابل  $mpc - kg$  و  $cwp - mpc - kg$  در سطح 99 درصد بر روی چسبندگی و نیروی چسبندگی نمونه‌ها معنی‌دار بود. اثر متقابل  $cwp - kg$  هیچ‌گونه اثر معنی‌داری بر چسبندگی و نیروی چسبندگی نمونه‌ها نداشت ( $P>0/05$ ). نتایج پژوهش نشان داد که تغییرات چسبندگی و نیروی چسبندگی نمونه‌ها با تغییرات  $mpc$ ،  $cwp$  و صمغ کنجاک تقریباً مشابه یکدیگر است به طوری که با افزایش میزان صمغ کنجاک در نمونه‌هایی که دارای مقادیر بالای  $cwp$  هستند حالات چسبندگی و نیروی چسبندگی نمونه‌ها افزایش یافت در حالی که با افزایش صمغ کنجاک تا حدود مقادیر 0/15 درصد در نمونه‌هایی با مقادیر بالای  $mpc$  کاهش چسبندگی و نیروی چسبندگی نمونه‌ها مشاهده گردید. با افزایش بیشتر صمغ کنجاک از حدود مقادیر 0/15 درصد تا 0/2 درصد این روند افزایشی شد.

در ارتباط با چسبندگی نمونه‌های ماست می‌توان گفت با توجه به این که نیروی چسبندگی، نیروی لازم جهت غلبه بر نیروی جاذبه سطحی بین ذرات است، لذا هرچه ساختار زلی و شبکه پروتئینی نمونه‌های ماست از سفتی بیشتری برخوردار باشد، نیروی چسبندگی نیز بیشتر خواهد بود که نتایج حاصل از سختی نیز آن را تأیید می‌کند. همچنین چسبندگی نیز مانند شاخص سفتی تحت تأثیر شبکه سه‌بعدی ضعیف ایجاد شده توسط صمغ و تغییرات پروتئینی در مقایسه با شبکه سه‌بعدی پروتئین‌های شیر قرار می‌گیرد [27]. گوچ و همکاران (2009) با بررسی تأثیر افزودن آب پنیر مایع به شیر در خصوص چسبندگی ماست تولید شده گزارش کردند که چسبندگی در نمونه‌های دارای درصد بیشتر آب پنیر مایع کمتر بود [28].

### 3-3- ویژگی‌های رئولوژیکی تغییر شکل کوچک

#### ماست چکیده (آزمون کرنش متغیر)

شکل 2 آزمون کرنش متغیر را برای تیمار شماره 1 در دمای 20 درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد.

الاستیک در نقطه جریان ( $G' = G''$ ): نمونه های ماست چکیده در دمای 20 درجه سانتی گراد و فرکانس یک هرتز در جدول 3 نشان داده شده است.

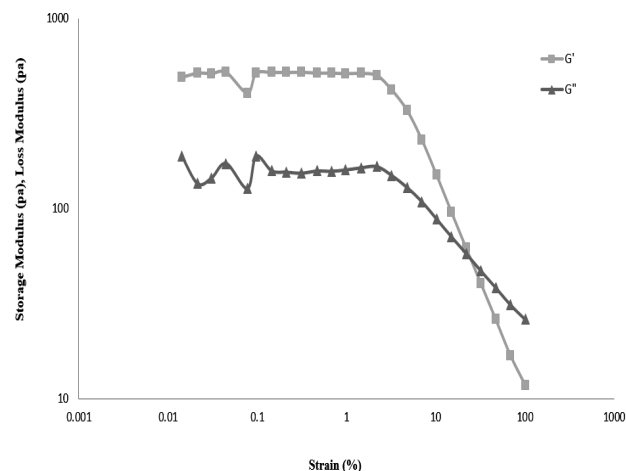
**Table 3** Strain sweep parameters of labane samples (1 Hz, 20 °C).

| Sample codes | $G'_{LVE}$ (Pa) | $G''_{LVE}$ (Pa) | $\gamma_c$ (%) | $\tau_y$ (Pa) | $\tan \delta_{LVE}$ | $\tau_f$ (Pa) | $G_f$ (Pa) |
|--------------|-----------------|------------------|----------------|---------------|---------------------|---------------|------------|
| 1            | 514             | 164              | 0.3143         | 0.4036        | 2.04723             | 18.57         | 60.035     |
| 2            | 56.57           | 26.42            | 0.4557         | 0.2845        | 3.47718             | 8.648         | 19.06      |
| 3            | 52.52           | 15.29            | 0.4224         | 2.31          | 3.43492             | 11.54         | 14.165     |
| 4            | 58.66           | 16.87            | 0.4204         | 2.566         | 2.91756             | 18.57         | 40.83      |
| 5            | 48.56           | 13.39            | 0.9865         | 4.969         | 3.09703             | 17.89         | 84.645     |
| 6            | 58.66           | 16.87            | 0.4204         | 2.566         | 3.0275              | 18.57         | 40.83      |
| 7            | 122.6           | 38.11            | 0.3143         | 0.4036        | 3.13415             | 5.398         | 80.995     |
| 8            | 17.18           | 49.99            | 0.3104         | 0.5552        | 3.62659             | 6.655         | 14.5       |
| 9            | 750.1           | 242.2            | 0.236          | 1             | 3.43669             | 23.11         | 37.815     |
| 10           | 245.6           | 84.18            | 1.321          | 3.429         | 3.43492             | 12.9          | 66.635     |
| 11           | 30.82           | 10.18            | 1.325          | 4.302         | 3.217               | 15.49         | 25.505     |
| 12           | 22.54           | 11.01            | 2.344          | 0.5879        | 2.14118             | 8.547         | 10.7       |
| 13           | 52.52           | 15.29            | 0.4224         | 2.31          | 3.47718             | 11.54         | 14.165     |
| 14           | 750.1           | 242.2            | 0.236          | 1.86          | 3.09703             | 23.11         | 37.815     |

### 3-3-1- مدول الاستیک و ویسکوز در ناحیه خطی ( $G'$ )

#### LVE و $G''$ LVE

نتایج تحقیق نشان داد که  $G'_{LVE}$  و  $G''_{LVE}$  نمونه های مورد آزمون به ترتیب بین 22/54 تا 750/1 و 11/01 تا 242/1 پاسکال متغیر بود. بر اساس نتایج تحلیل واریانس مدل متقاطع منتخب (Cubic× Quadratic) برای هردو پاسخ  $G'_{LVE}$  و  $G''_{LVE}$  اثرات متقابل  $\text{mpc-kg}$  و  $\text{cwp-kg}$  و  $\text{mpc-kg}$  در سطح 99 درصد بر روی  $G'_{LVE}$  و  $G''_{LVE}$  اثر معنی داری داشت در حالی که علاوه بر اثرات فوق، اثر متقابل  $\text{cwp-mpc}$  تنها بر روی  $G''_{LVE}$  نمونه ها تأثیر معنی داری نشان داد. نتایج پژوهش نشان داد که روند تغییرات  $G'_{LVE}$  و  $G''_{LVE}$  نمونه ها با تغییرات  $\text{mpc}$  و  $\text{cwp}$  و صمغ کنجاک تقریباً



**Fig 2** Strain sweep dependency of storage modulus ( $G'$ ) and loss modulus ( $G''$ ) measured for sample NO. 1 (6% MPC, 2% CWP and 0.05% KG) at 20 °C and  $f=1$  Hz.

همان طور که در شکل 2 ملاحظه می شود، دو ناحیه مختلف شامل ناحیه ویسکوالاستیک خطی (LVE) که در آن مدول الاستیک ( $G'$ ) و ویسکوز ( $G''$ ) تقریباً ثابت بوده اما مدول الاستیک بزرگ تر از مدول ویسکوز است که مبین رفتار جامد گونه<sup>10</sup> می باشد و ناحیه غیر خطی که در آن  $G'$  و  $G''$  با افزایش کرنش شروع به کاهش نموده و پس از نقطه تلاقی<sup>11</sup> (نقطه جریان) مدول ویسکوز ( $G''$ ) بزرگ تر از مدول الاستیک ( $G'$ ) شده و نمونه ها رفتار مایع گونه<sup>12</sup> نشان دادند، قابل تمایز است. در این آزمون، تنش یا کرنش متناظر با شروع رفتار غیر خطی و کاهش سریع مدول الاستیک ( $G'$ ) را کرنش بحرانی ( $\gamma_c$ ) یا تنش بحرانی ( $\tau_y$ ) می نامند. در نمونه 1 با افزایش تنش پیوندهایی که شبکه را کنار هم نگه می دارد شروع به پاره شدن می کند، یعنی در یک میزان بحرانی تنش ( $\tau_y$ ) ساختار شبکه به هم می خورد که در طی آن  $G'$  با شیب تندی کم می شود [29].

پارامترهای حاصل از آزمون کرنش متغیر شامل مدول الاستیک در ناحیه خطی ( $G'_{LVE}$ )، مدول افت در ناحیه خطی ( $G''_{LVE}$ )، کرنش بحرانی ( $\gamma_c$ )، تنش تسلیم ( $\tau_y$ )، تانژانت اتلاف در ناحیه خطی ( $\tan \delta_{LVE}$ )، تنش تسلیم در نقطه جریان ( $\tau_f$ ) و مدول

10. Solid-like

11. Crossover point

12. Liquid-like

Quadratic) برای هر دو پاسخ  $\gamma_c$  و  $\tau_y$  اثرات  $\text{mpc-kg}$  و  $\text{cwp-kg}$  در سطح 95 درصد بر روی  $\gamma_c$  و  $\tau_y$  نمونه‌ها معنی‌دار بود این درحالی است که علاوه بر اثرات فوق اثر متقابل  $\text{mpc-cwp}$  تنها بر روی  $\gamma_c$  اثر معنی‌داری داشت. همچنین نتایج پژوهش نشان داد که در مقادیر بالای  $\text{cwp}$  و مقادیر پایین  $\text{mpc}$  با افزایش میزان صمغ کنجاک  $\gamma_c$  نمونه‌ها افزایش یافت. لذا می‌توان دریافت که افزایش صمغ کنجاک باعث تقویت ژل ماست شده است. در حقیقت، افزایش کرنش بحرانی نشان دهنده زمان بیشتر تعاملات ساختار پلیمری نمونه‌ها است و در نتیجه با گذشت زمان پیوندهایی جدید جایگزین پیوندهایی می‌شود که با اعمال کرنش خارجی در آزمون تنش برشی با دامنه نوسانی کم شکسته شده‌اند. استف (1996) گزارش کرد که ژل‌های قوی در مقایسه با انواع ضعیف زمان بیشتری را در حالت خطی باقی می‌مانند [33]. همچنین بر اساس نتایج پژوهش در مقادیر کم صمغ کنجاک با افزایش میزان  $\text{mpc}$  و کاهش میزان  $\text{cwp}$ ،  $\tau_y$  نمونه‌ها افزایش پیدا کرد در حالی که  $\tau_y$  در نمونه‌های حاوی بالای مقادیر صمغ با افزایش میزان  $\text{mpc}$  و کاهش میزان  $\text{cwp}$  کاهش یافت. کوکوکسیتن (2008) نشان داد که تنش بحرانی ماست همزده به طور معنی‌داری تحت تأثیر نسبت پروتئین‌های سرم به کازئین قرار گرفت [25].

### 3-3-3- تانژانت اتلاف<sup>13</sup>

تانژانت اتلاف ( $\tan \delta = G''/G'$ ) یک عدد مشخصه برای توصیف رفتار ویسکوالاستیک مواد می‌باشد. اعداد کوچکتر آن ( $\tan \delta < 1$ ) نشان دهنده رفتار الاستیک غالب و تانژانت اتلاف بزرگ‌تر از یک بیانگر رفتار ویسکوز غالب است. تانژانت اتلاف بزرگ‌تر از 0/1 نشان می‌دهد که نمونه، ژل واقعی نبوده و ساختمان آن بین ژل فیزیکی و ژل واقعی است [35].  $\tan \delta$  نمونه‌ها بین 0/28 و 0/53 متغیر بود که با توجه به اینکه کمتر از یک و بزرگ‌تر از 0/1 بودند نشان از حضور ساختار الاستیک در ژل ضعیف بیوپلیمری داشت. همچنین با توجه به اینکه هیچ یک از نمونه‌ها ژل واقعی نبودند، درگیری رشته‌ها و ارتباطات ماکرومولکول‌ها موقتی بوده و می‌تواند در درجه برش‌های بالا از هم گسیخته شوند [36]. همچنین نتایج بررسی‌ها نشان داد که

مشابه یکدیگر است به طوری که با افزایش میزان صمغ کنجاک  $G'_{LVE}$  و  $G''_{LVE}$  نمونه‌ها افزایش یافت. در آزمون‌های نوسانی، مدول  $G'$  اساساً به پیوندهای پروتئین-پروتئین وابسته است و مدول  $G''$  حاکی از جاذبه‌ها و میانکشی‌های ضعیف‌تر است. با افزایش میزان کازئین مدول  $G'$  (مدول الاستیک) و نقطه تسلیم ژل افزایش و  $\tan \delta$  در آزمون نوسانی کاهش می‌یابد. آزر و همکاران (1999) نیز نشان دادند که حداقل درصد پروتئین شیر که به تشکیل ژل می‌انجامد، 3% است [14].

### 3-3-2- تنش و کرنش بحرانی ( $\tau_y$ و $\gamma_c$ )

تعیین کرنش متناظر با پایان محدوده خطی ویسکوالاستیک، معیاری از میزان قدرت ساختمانی یا قابلیت حفظ شکل به تنش‌های مکانیکی وارده به محصول هنگام حمل و نقل می‌باشد. نتایج تحقیق نشان داد که  $\gamma_c$  و  $\tau_y$  نمونه‌های مورد آزمون به ترتیب بین 0/23 تا 2/34 درصد و 0/28 تا 4/96 پاسکال متغیر بود. کلارک و روز مورفی (1987) گزارش کردند که ناحیه خطی در محلول‌های رقیق کمتر از محلول‌های غلیظ است و محلول‌های غلیظ کمتر از ژل‌ها می‌باشد. در حالی که این مقدار در ژل‌های کلونیدی به ندرت بیشتر از 0/1 درصد است، ناحیه خطی بزرگتری برابر با 1% و یا بیشتر برای ژل‌های بیوپلیمری طبیعی وجود دارد [30]. هلدمن و لوند (2007) گزارش کردند که  $G'_{LVE}$  برای بیشتر مواد غذایی جامد نرم در بازه 2-0/1 درصد است [31]. از این رو، با در نظر گرفتن کرنش بحرانی، نمونه‌های ماست چکیده ژل نسبتاً ضعیفی را ایجاد می‌کند. آوزر و همکاران (1999) نشان دادند که کرنش بحرانی ویسکوالاستیک برای ماست چکیده (لبنه) 0/02 درصد بود [14]. پولسون و دجمرک (1990) دامنه کرنش 0/01 درصد در فرکانس 1 هرتز را به عنوان کرنش بحرانی جهت بررسی تشکیل ژل حرارتی بتالاکتوگلوبولین در نظر گرفتند [32]. بیشتر تحقیقات بر روی محصولات لبنی ژل مانند با استفاده از دامنه کرنش کمتر از 0/05 درصد در فرکانس 1 هرتز انجام شده است از این رو در این تحقیق نیز کرنش 0/01 درصد در آزمون فرکانس متغیر در نظر گرفته شد تا کاملاً در ناحیه خطی قرار قرار داشته باشد تا ساختار ژل در طی اعمال کرنش دست نخورده باقی بماند.

بر اساس نتایج تحلیل واریانس مدل متقاطع منتخب (Cubic×

تصادفی کرم شب تاب ( $\alpha$ ) برای بهینه‌سازی توسط الگوریتم شب‌تاب به دست آیند. به این منظور، در مرحله اول  $\alpha=0/7$  در نظر گرفته شد و با تغییر ضریب جذب نور ( $y$ ) تأثیر آن در مقادیر بهینه بررسی و ضریب جذب نور مناسب انتخاب شد. برای تنظیم مقادیر  $y$  در بازه (5 و 0) مقادیر بهینه تابع هدف به دست آمد و مشخص شد که مقادیر بهینه در این مسئله چندان تحت تأثیر تغییرات  $y$  قرار نمی‌گیرد، بنابراین ضریب جذب نور 2 منظور شد.

عبارت سوم رابطه (7) باعث حرکت تصادفی کرم‌های شب‌تاب در فضا می‌شود و پارامتر بردار تصادفی ایجاد می‌کند که از توزیع نرمال تبعیت می‌نماید. تأثیر این بردار در حرکت کرم شب‌تاب به کمک پارامتر  $\alpha$  تعیین می‌شود ( $\alpha \in [0,1]$ ). لازم به ذکر است که در صورت صفر اختیار کردن این پارامتر قسمت تصادفی این رابطه (7) کاملاً حذف خواهد شد.

در الگوریتم کرم شب‌تاب، تمام کرم‌ها به سمت نقطه یا نقاط بهینه حرکت می‌کنند، بنابراین هر چه تعداد کرم بیشتر باشد احتمال دست یافتن به بهینه عمومی افزایش می‌یابد. لذا در این مسأله با توجه به اینکه مقادیر بهینه با افزایش تعداد کرم شب‌تاب بیشتر از 20 تغییرات چندان پیدای نمی‌کردند این تعداد کرم شب‌تاب نیز به عنوان تعداد کرم شب‌تاب در الگوریتم تعیین شد. نتایج بهینه cwp mpc و صمغ کنجاک به دست آمده با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب در جدول 4 نشان داده شده است.

با توجه به مقادیر بهینه به دست آمده از الگوریتم کرم شب‌تاب برای هر پارامتر رئولوژیکی و در نظر گرفتن اینکه سهم هر یک از این ترکیبات نشان‌دهنده میزان اثر آن ترکیب بر روی آن پارامتر رئولوژیکی خاص در نمونه‌ها می‌باشد، نمودار پراکنش آن‌ها در فضای PC به منظور بررسی رابطه بین سهم هر ترکیب و پارامترهای رئولوژیکی ماست چکیده مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که از مجموع 10 مؤلفه که با درجات استقلال متفاوت تعریف شده‌اند دو مؤلفه اول و دوم که دارای درجه استقلال بزرگ‌تر از یک بودند به عنوان مؤلفه‌های اصلی اول و دوم در نظر گرفته شدند. بنابراین مؤلفه‌های اصلی PCA داده‌های مربوط به پارامترهای رئولوژیکی ماست چکیده با دو مؤلفه اصلی به ترتیب 95% و 5% واریانس محاسبه گردیدند.

هیچ‌کدام از اثرات خطی و درجه دوم و متقابل اثرات کربوکسی متیل سلولز، صمغ کنجاک و صمغ دانه مرو بر روی تنش تسلیم نمونه‌های ماست چکیده معنی‌دار نبود که مشخص‌کننده یکسان بودن طبیعت و نوع نیروها و برهم‌کنش بین نمونه‌ها است [14].

### 3-3-4- تنش تسلیم و مدول الاستیک در نقطه جریان ( $G_f$ و $\tau_f$ )

نتایج تحقیق نشان داد که  $G_f$  و  $\tau_f$  نمونه‌های مورد آزمون به ترتیب بین 5/39 تا 23/11 و 8/09 تا 84/64 پاسکال متغیر بود. بر اساس نتایج تحلیل واریانس مدل متقاطع منتخب (Cubic× Quadratic) برای هر دو پاسخ  $G_f$  و  $\tau_f$  اثر متقابل mpc-kg در سطح 95% بر روی  $G_f$  و  $\tau_f$  نمونه‌ها معنی‌دار بود در حالی که علاوه بر اثرات فوق اثر متقابل cwp - mpc تنها بر روی  $\tau_f$  و اثر متقابل cwp - kg تنها بر روی  $G_f$  نمونه‌ها اثر معنی‌داری داشت.

همچنین بر اساس نتایج روند تغییرات  $G_f$  و  $\tau_f$  نمونه‌ها با تغییرات mpc, cwp و صمغ کنجاک تقریباً مشابه یکدیگر است به طوری که با افزایش میزان صمغ کنجاک در نمونه‌هایی که دارای مقادیر بالایی cwp هستند  $G_f$  و  $\tau_f$  نمونه‌ها افزایش یافت در حالی که در نمونه‌هایی که حاوی مقادیر بالایی mpc هستند منجر به کاهش  $G_f$  و  $\tau_f$  نمونه‌ها گردید. احتمالاً این تغییرات به علت ایجاد تغییرات در اتصالات پروتئین-پروتئین و همچنین به علت افزایش ظرفیت اتصال به آب صمغ کنجاک (خاصیت جذب آب بالای آن) که سبب کاهش جریان پذیری و افزایش مقاومت نمونه در برابر جاری شدن می‌شوند، بود [37].

### 3-3-4- بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب

در این پژوهش به منظور بهینه‌سازی خصوصیات رئولوژیکی ماست چکیده با استفاده از mpc, cwp و صمغ کنجاک تلاش بر این بود تا حد امکان سختی، پیوستگی،  $G' LVE$ ،  $\gamma_c$ ،  $\tau_y$  و  $G_f$  به عنوان توابع هدف افزایش و چسبندگی، نیروی چسبندگی و  $G'' LVE$  کاهش یابند. داده‌های اولیه داده شده به الگوریتم کرم شب‌تاب در حقیقت داده‌های مدل‌های پیش‌بینی شده از طرح مخلوط-فرآیند بودند. ابتدا لازم است مناسب‌ترین مقادیر پارامترهای مرتبط با جذب نور محیط ( $y$ ) و حرکت

#### 4- نتیجه گیری

ویژگی‌های رئولوژیکی محصولاتی مانند ماست نقش مهمی در عمل‌آوری و بازارپسندی محصول دارد. در ماست چکیده این ویژگی‌ها عمدتاً تحت تأثیر میزان و نوع ترکیبات به کار رفته در آنها قرار می‌گیرد. تعیین ترکیب بهینه از ترکیبات از لحاظ اقتصادی نیز حائز اهمیت است لذا در این تحقیق، اثر  $\text{mpc}$  و  $\text{cwp}$  و صمغ کنجاک و مخلوط ترکیبات بر خصوصیات رئولوژیکی ماست چکیده با استفاده از مدل‌های به دست آمده از طرح مخلوط - فرآیند و با استفاده از الگوریتم کرم شبتاب این خصوصیات رئولوژیکی به خوبی بهینه گردید. آزمون رئولوژیکی دینامیکی کرنش متغیر نیز برای نمونه‌های مختلف ماست چکیده نشان داد که کلیه نمونه‌ها ساختمان ژل مانند (ژل ضعیف) در فرکانس یک هرتز در دمای 20 درجه سانتی‌گراد داشتند. همچنین نتایج نقاط بهینه ترکیبات به دست آمده با استفاده از الگوریتم کرم شبتاب و تعیین واریانس داده‌های مربوط به پارامترهای رئولوژیکی اهمیت و نقش مؤثر صمغ کنجاک بر بهبود خواص رئولوژیکی ماست چکیده را نشان داد.

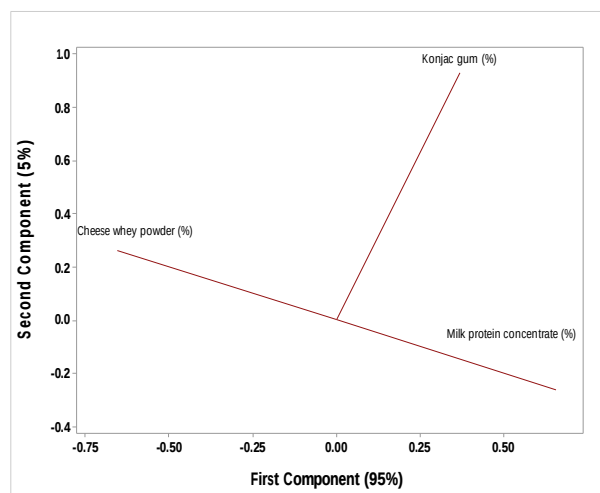
#### 5- منابع

- [1] Nsabimana, C., Jiang, B., & Kossah, R. 2005. Manufacturing, properties and shelf life of labneh: a review. *International Journal of Dairy Technology*, 58, 222-231.
- [2] Jumah, R. Y., Abu-Jdayil, B., & Shaker R. R. 2001. Effect of type and level of starter culture on the rheological properties of set yogurt during gelation process. *International journal of food properties*, 4 (3), 531-544.
- [3] Soukoulis, C., Panagiotidis, P., Kourelis, R., & Tzia, C. 2007. Industrial yogurt manufacture: monitoring of fermentation process and improvement of final product quality. *Journal of Dairy Science*, 90(6), 2641-2654.
- [4] Fox, P.F. 2003. The major constituents of milk. In: *Dairy Processing, Improving Quality* (ed. G Smit), pp. 5-41, CRC Press LLC, Boca Raton, FL.
- [5] Lucey, J. A. 2009. Milk protein gels. In: *Milk proteins: from expression to food*. Boland, M., Singh, H., & Thompson, A. Elsevier.

**Table 4** The optimum results of the percentage of  $\text{mpc}$ ,  $\text{cwp}$  and konjac gum for achieving the maximum hardness, cohesiveness,  $G'_{\text{LVE}}$ ,  $\gamma_c$ ,  $\tau_y$ ,  $\tan \delta_{\text{LVE}}$ ,  $G_f$  and minimum adhesiveness, adhesiveness force,  $G''_{\text{LVE}}$  using the algorithm ( $\alpha = 0.8$ ,  $y = 1$  and number of fireflies = 20).

| Rheological parameters     | Composition type             |                        |                |
|----------------------------|------------------------------|------------------------|----------------|
|                            | Milk protein concentrate (%) | Cheese whey powder (%) | Konjac gum (%) |
| Hardness                   | 7.8868                       | 0.1132                 | 0.1496         |
| Cohesiveness               | 7.7122                       | 0.2878                 | 0.1906         |
| Adhesiveness               | 5.1891                       | 2.8109                 | 0.0007         |
| Adhesiveness force         | 4.3402                       | 3.6598                 | 0.0523         |
| $G'_{\text{LVE}}$ (Pa)     | 7.7353                       | 0.2647                 | 0.1221         |
| $G''_{\text{LVE}}$ (Pa)    | 4.3229                       | 3.6771                 | 0.0349         |
| $\gamma_c$ (%)             | 4.0704                       | 3.9296                 | 0.1894         |
| $\tau_y$ (Pa)              | 7.8058                       | 0.1942                 | 0.0763         |
| $\tau_f$ (Pa)              | 7.8263                       | 0.1737                 | 0.1697         |
| $\tan \delta_{\text{LVE}}$ | 7.8658                       | 0.1342                 | 0.0258         |
| $G_f$ (Pa)                 | 7.6611                       | 0.3389                 | 0.1730         |

شکل 3 پراکنش مقادیر بهینه ترکیبات مختلف را بر مبنای دو مؤلفه اول و دوم نشان می‌دهد. همان طور که از موقعیت مقادیر بهینه ترکیبات در فضای PC مشاهده می‌گردد، مقادیر بهینه به دست آمده از  $\text{mpc}$  و صمغ کنجاک واریانس بیشتری از داده‌های مربوط به پارامترهای رئولوژیکی را به خود اختصاص داده‌اند که نشان دهنده اهمیت و نقش مؤثر تقریباً یکسان صمغ کنجاک و  $\text{mpc}$  بر بهبود خواص رئولوژیکی ماست چکیده بود.



**Fig. 3** The share of optimal amounts of different composition on the first and second principal component

- engineering, 62: 245-254.
- [19] Bourne, M. C. 1978. Texture profile analysis. *Food Technology*, 32, 62–66, 72.
- [20] Balaghi, S., Mohammadifar, M. A., Zargaraan, A., Ahmadi Gavlighi, H., & Mohammadi, M. 2011. Compositional analysis and rheological characterization of gum tragacanth exudates from six species of Iranian *Astragalus*. *Food Hydrocolloids*, 25, 1775–1784.
- [21] Dal Bello, L.H.A., & Vieirab, A.F.C. 2011. Optimization of a product performance using mixture experiments including process variables, *Journal of Applied Statistics*, 38(8), 1701–1715.
- [22] Yang, X-S., “Firefly Algorithms for Multimodal Optimization, in: Stochastic Algorithms”, Foundations and Applications, SAGA, Lecture Notes in Computer Sciences, Cambridge, UK, 5792, 2009, pp. 169-178.
- [23] Yang, X-S., “Firefly Algorithm, Stochastic Test Functions and Design Optimization”, *International Journal of Bio-inspired Computation*, Vol. 2, No. 2, 2010, pp. 78-84.
- [24] Walstra, P. 2013. Dairy technology: principles of milk properties and processes. CRC Press.
- [25] Kuecukcetin, A. (2008). Effect of heat treatment of skim milk and final fermentation pH on graininess and roughness of stirred yogurt. *International Journal of Dairy Technology*, 61(4), 385–390.
- [26] Aziznia, S., Khosrowshahi, A., Madadlou, A., & Rahimi, J. 2008. Whey Protein Concentrate and Gum Tragacanth as Fat Replacers in Nonfat Yogurt: Chemical, Physical, and Microstructural Properties. *Journal of Dairy Science*, 91, 2545–2552.
- [27] Park, Y. W. 2007. Rheological characteristics of goat and sheep milk. *Small Ruminant Research*, 68(8), 73–78.
- [28] Gauche, C., Tomazi, T., Barreto, P. L. M., Ogliari, P. J., & Bordignon-Luiz, M. T. 2009. Physical properties of yoghurt manufactured with milk whey and transglutaminase. *LWT-Food Science and Technology*, 42(1), 239–243.
- [28] Pai, V.B., & Khan, S.A. 2002. Gelation and Rheology of xanthan/ enzyme-modified guar blends. *Carbohydrate polymers*, 49, 207–216.
- [29] Clark, A.H., & Ross-Murphy, S.B. 1987. Structural and mechanical properties of
- [6] van Vliet, T., Lakemond, C. M., & Visschers, R. W. 2004. Rheology and structure of milk protein gels. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 9(5), 298-304.
- [7] Lucey, J. A., Munro, P. A., & Singh, H. 1998. Rheological properties and microstructure of acid milk gels as affected by fat content and heat treatment. *Journal of Food Science*, 63(4), 660–664.
- [8] Lucey, J. A., & Singh, H. 1997. Formation and physical properties of acid milk gels: a review. *Food Research International*, 30(7), 529–542.
- [9] Krzeminski, A., Großhable, K., & Hinrichs, J. 2011. Structural properties of stirred yoghurt as influenced by whey proteins. *LWT-Food Science and Technology*, 44(10), 2134–2140.
- [10] Chua, M., Chan, K., Hocking, T.J., Williams, P.A., Perry, C.J., & Baldwin, T.C. 2012. Methodologies for the extraction and analysis of konjac glucomannan from corms of *Amorphophallus konjac* K. Koch. *Carbohydrate Polymers*, 87(3), 2202–2210.
- [11] Yang, X-S., *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithm*, Luniver Press, 2008.
- [12] Yeomans, J. S. (2015). A parametric testing of the firefly algorithm in the determination of the optimal osmotic drying parameters of mushrooms. *JAISCR*, 4, 4, 257–266.
- [13] Tamime, A. Y., & Robinson, R. K. 1999. *Yoghurt: science and technology*. Woodhead Publishing.
- [14] Ozer, B.H., & Robinson, R.K. 1999. The Behaviour of Starter Culture in concentrated yoghurt (Labneh) produced by different techniques. *LWT - Food Science and Technology*, 32, 391–395.
- [15] Ozer, B.H., Bell, A.E., Grandison, A.S., & Robinson, R.K. 1998. Rheological properties of concentrated yoghurt (labneh), *Journal of Texture Studies*, 29, 67–79.
- [16] Salji, J. 1991. concentrated yoghurt: a challenge to our food industry. *food science and technology today*, 5(1), 18–19.
- [17] Sodini, I., Montella, J., & Tong, P. S. 2005. Physical properties of yogurt fortified with various commercial whey protein concentrates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(5), 853–859.
- [18] Yazici, F., Akgun, a. 2004. Effect of some protein based fat relacers on physical, chemical, textural and sensory properties of strained yoghurt. *Journal of food*

- [35] Mandala, I., Kapetanakou, A., & Kostaropoulos, A. 2008. Physical properties of breads containing hydrocolloids stored at low temperature. II. Effect of freezing. *Food Hydrocolloids*, 22, 1443– 1451.
- [36] Naji-Tabasi, S., & Razavi, S. M. A. 2017. New studies on basil (*Ocimum bacilicum* L.) seed gum: Part III – Steady and dynamic shear rheology. *Food Hydrocolloids*, 67, 243–250.
- [37] Tamime, A. Y., & R. K. Robinson. 1985. *Yoghurt: Science and Technology*. Pergamon Press, London, United Kingdom.
- 23 Walstra, P., T. van Vliet, and C.G.B. Bremer. (1990). Page 369-382 in *Food Polymers, Gels and Colloids*. E. Dickinson, ed. Royal Soc. Chem., Norwich, United Kingdom.
- biopolymer gels. *Advance Polymer Science*, 83, 57– 192.
- [30] Heldman, D.R., & Lund, D.B. 2007. *Handbook of Food Engineering*, 2nd edn. Pp. 12–15, 25–30, 36–40, New York, NY, USA, CRC Press.
- [31] Paulsson, M., & Dejmek, P. 1990. Rheological Properties of Heat-Induced -lactoglobulin gels. *Journal of Dairy Science*, 73, 45– 53.
- [33] Steffe, J.F. (1996). *Rheological methods in food process engineering* (pp. 17-23). East Lansing, MI. Freeman Press.
- [34] Kuecuekcetin, A. (2008). Effect of heat treatment of skim milk and final fermentation pH on graininess and roughness of stirred yogurt. *International Journal of Dairy Technology*, 61(4), 385–390.

## Optimization of rheological properties of labane (concentrated yoghurt) produced by wheyless process using firefly algorithm

Kashaninejad, M. <sup>1</sup>, Najaf Najafi, M. <sup>2\*</sup>, Ghods Rohani, M. <sup>3</sup>, Kashaninejad, M. <sup>4</sup>

1. MSc of Novel Dairy Products Manufacture, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and education Center, AREEO, Mashhad, Iran.
2. Associate professor, Food Industries Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran.
3. Assistant professor, Food Industries Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran.
4. PhD Student, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran.

(Received: 2018/09/30 Accepted:2019/01/07)

Production methods of concentrated yoghurt (labane) varied from traditional methods, which are tedious, such as separation of whey by fabric bags, to complicated methods. These raise demand to establish more suitable methods such as “wheyless process” by dried milk, concentrated milk protein or concentrated whey protein. So the influence of different ingredients such as milk protein concentrate (MPC), whey protein concentrates (WPC) and konjac gum (KG) on rheological properties of labane was investigated through mixture-process design methodology and optimized these properties by firefly algorithm. The results of the combination of back extrusion and texture profile analysis (TPA) indicated that increasing KG significantly increased hardness, adhesiveness and adhesiveness force especially for samples with high amount of CWP but increasing MPC and decreasing CWP decreased cohesiveness in samples with high amount of KG. Strain sweep test of the labane indicated that all sample had gel-like structure (weak gel) at 1 Hz and 20°C. Rheological results also showed that increasing KG significantly increased  $G'_{LVE}$ ,  $G''_{LVE}$ ,  $\gamma_c$ ,  $\tau_y$ ,  $\tau_f$  and  $G_f$  especially for samples with high amount of CWP. The optimal results of different gum percentages to achieve maximum Hardness, Cohesiveness,  $G'_{LVE}$ ,  $\gamma_c$ ,  $\tau_y$ ,  $\tan \delta_{LVE}$ ,  $G_f$  and minimum Adhesiveness, Adhesiveness force,  $G'_{LVE}$  using the firefly algorithm in PC space, it has been shown that the optimum amounts of KG and MPC were close to each other and had more variance of the data which shows the similarity of the effect of these two component on the rheological parameters.

**Keywords:** Concentrated yoghurt, Modified texture profile analysis and back extrusion, Firefly algorithm, Cheese whey powder, Konjac gum, Strain sweep test.

---

\* Corresponding Author E-Mail Address: mnajafi.mhd@gmail.com