

بررسی اثر صمغ فارسی و فرایند حرارتی بر ویژگی‌های امولسیون پایدار شده با کنسانتره پروتئین آب پنیر

هدی خالصی^۱، رسول کدخدایی^۲، بهاره عمادزاده^{۳*}

۱. دانشجوی دکتری، علوم و صنایع غذایی، گروه فراوری مواد غذایی، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی، مشهد

۲. دانشیار، گروه نانو فناوری مواد غذایی، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی، مشهد

۳. استادیار، گروه نانو فناوری مواد غذایی، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی، مشهد

(تاریخ دریافت: ۹۵/۶/۶، تاریخ پذیرش: ۹۵/۷/۱۲)

چکیده

بسیاری از محصولات غذایی دارای ساختار امولسیون ژل هستند که در آن‌ها سامانه امولسیون در شبکه ژلی پراکنده شده است. یکی از مهم‌ترین مراحل تولید امولسیون ژل، آماده‌سازی امولسیون پایه است که در مرحله بعد بتواند با فرایندهایی مانند حرارت، اسیدی کردن و آنزیم زنی به ژل تبدیل شود. در این تحقیق اثر غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر، ۳-۸ w/w و بخش محلول صمغ فارسی، ۰-۰/۶ w/w، بر خصوصیات امولسیون تازه و نیز پس از اعمال فرایند حرارتی به میزان ۹۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۳۰ دقیقه، مورد مطالعه قرار گرفت. به این منظور تغییرات پتانسیل زتا، توزیع اندازه قطرات، رفتار رئولوژیکی و ریزساختار نمونه‌های امولسیون بررسی گردید. نتایج نشان داد که افزایش غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر سبب کاهش اندازه قطرات امولسیون شد. از طرف دیگر، افزودن بخش محلول صمغ فارسی در غلظت ۰/۶٪ وزنی اندازه قطرات را افزایش داد. علاوه بر این اعمال حرارت باعث افزایش اندازه قطرات و پهن‌تر شدن گستره پراکندگی آن‌ها گردید. با این حال در حضور غلظت ۰/۳٪ وزنی بخش محلول صمغ فارسی، پایداری و مقاومت امولسیون در برابر فرایند حرارتی به‌طور چشمگیری افزایش یافت. گرانبوی امولسیون نیز بسته به غلظت بخش محلول صمغ فارسی دچار تغییر شد و پس از حرارت دهی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرد که به وقوع پدیده انبوهش تخلیه‌ای قطرات و ایجاد تجمعات پروتئینی در فاز پیوسته نسبت داده شد. پیش از اعمال فرایند حرارتی، نمونه‌های حاوی غلظت‌های مختلف پروتئین و صمغ فارسی، رفتار نیوتنی و بعد از اعمال حرارت، نمونه‌های حاوی غلظت بالای پروتئین و صمغ فارسی رفتار رقیق شونده با برش را نشان دادند. دستاوردهای این پژوهش حاکی از قابلیت مناسب بخش محلول صمغ فارسی در پایدارسازی امولسیون‌ها نسبت به حرارت است که می‌تواند کاربردهای متعددی در فرمولاسیون‌های غذایی از جمله امولسیون ژل‌ها داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: امولسیون، کنسانتره پروتئین آب پنیر، صمغ فارسی، فرایند حرارتی.

* نویسنده مسئول: b.emadzadeh@rifst.ac.ir

1- مقدمه

استفاده قرار می‌گیرند، در حالی که پلی ساکاریدها به‌طور عمده به‌عنوان قوام دهنده و عامل جذب آب به‌کار می‌روند. هم‌چنین جزء حجمی روغن از پارامترهای مهمی است که می‌تواند خواص امولسیون را تحت تاثیر قرار دهد [7-9].

تحقیقات مختلفی ویژگی‌های امولسیون لبنی تشکیل شده توسط چربی شیر، امولسیفایر و فاز آبی را بررسی کردند [10-12]. سگال و گف با تحقیق بر تاثیر غلظت‌های مختلف پروتئین آب پنیر هیدرولیز شده، ایزوله پروتئین آب پنیر و کازئینات سدیم در تهیه امولسیون با استفاده از چربی شیر، کاربرد ایزوله پروتئین آب پنیر را به‌عنوان امولسیفایر مناسب در تهیه امولسیون لبنی پیشنهاد کردند. بوتین و همکاران نیز با استفاده از غلظت 4 و 8٪ ایزوله پروتئین آب پنیر به‌عنوان امولسیفایر در امولسیون‌سازی چربی شیر، موفق به تولید امولسیونی با قطرات کوچک فاز پراکنده‌ای در حدود 900-340 نانومتر شدند. مدل‌سازی امولسیون‌های لبنی به‌منظور بررسی ویژگی‌های حسی نیز اهمیت بالایی دارند. در سال‌های اخیر تهیه امولسیون‌های لبنی کم چرب با ویژگی‌های مطلوب ظاهری و حسی هدف بسیاری از محققین بوده است. استفاده از قوام‌دهنده‌ها و هیدروکلوئیدهای مختلف در امولسیون‌های لبنی کم چرب به منظور تغییر رفتار رئولوژیکی و هم‌چنین ایجاد پروفایل حسی محصول رایج است. اختر و همکاران، دو امولسیون لبنی را با استفاده از کازئینات سدیم و چربی شیر (20-5٪) و کاربرد دو بیوپلیمر متفاوت مالتودکسترین و زانتان به گونه‌ای فرموله کردند که امولسیون‌هایی با رفتار رئولوژیکی مشابه حاصل شد. نتایج این تحقیق نشان داد علیرغم میزان گرانروی و قوام مشابه نمونه‌ها، با این حال درک احساس خامه‌ای کاملاً متفاوتی برای امولسیون‌ها به دلیل استفاده از بیوپلیمرهای مختلف، به‌دست آمد. بنجامین و همکاران با آنالیز ترکیبات فرار عطری حاصل از امولسیون چربی شیر و روغن سویا توسط بتا لاکتوگلوبولین و توئین 20 متوجه شدند که نوع امولسیفایر مورد استفاده در میزان رهایش ترکیبات فرار حسی اثر متفاوتی را دارد.

پروتئین‌های غذایی از ترکیبات فعال سطحی طبیعی هستند که به دلیل دارا بودن اسیدهای آمینه مختلف دارای نواحی قطبی و غیرقطبی می‌باشند. تاکنون عملکرد پروتئین‌های

امولسیون ترکیبی از دو فاز امتزاج ناپذیر است که یکی از آن‌ها به شکل قطرات کروی در دیگری پراکنده شده است. فازی را که به صورت قطرات پخش شده است، فاز داخلی یا پراکنده¹ و فاز دیگر که قطرات را احاطه کرده است، فاز پیوسته² یا خارجی گویند. به‌طور معمول آب و روغن، دو فاز امتزاج ناپذیر این سیستم را تشکیل می‌دهند [1]. برای تشکیل امولسیون علاوه بر دو فاز آب و روغن، به امولسیفایر و انرژی نیز نیاز است. از آنجایی که در حین تشکیل امولسیون انرژی داخلی سیستم افزایش می‌یابد، با گذشت زمان امولسیون‌ها تمایل به کاهش سطح انرژی و رسیدن به حالت تعادل دارند که با جدا شدن کامل دو فاز آب و روغن همراه است. دلیل ناپایداری این سیستم‌ها وجود کشش بین سطحی میان دو جزء آب و روغن است [2]. با افزودن ترکیباتی به‌عنوان امولسیفایر یا پایدارکننده می‌توان امولسیونی که در مدت زمان معین پایدار باشد را تولید نمود. امولسیفایر از طریق جذب در سطح بینابینی دو جزء غیرقابل اختلاط، کاهش کشش بین سطحی دو مایع و به تاخیر انداختن در هم آمیختگی قطرات فاز پراکنده، موجب پایداری امولسیون می‌شود [3].

افزودنی‌های غذایی نقش مهمی در ایجاد ریزساختار، ارتقای کیفیت و پایداری محصولات ایفا می‌کنند. اصولاً مصرف‌کننده‌ها تمایل بیشتری به افزودنی‌های طبیعی دارند و به همین دلیل روند تهیه امولسیون‌های غذایی و دارویی بر پایه ترکیبات "برچسب پاک"³ در سال‌های اخیر افزایش یافته است [4, 5]. تولید کارآمد امولسیونی با کیفیت بالا نیاز به داشتن آگاهی از سهم هر جزء تشکیل‌دهنده در خواص کلی محصول و چگونه تحت تاثیر قرار گرفتن این ویژگی در حضور سایر ترکیبات دارد. پرکاربردترین افزوده‌ها در تشکیل امولسیون، پروتئین‌ها و پلی ساکاریدها هستند [2, 6]. به دلیل چند جزئی بودن سیستم‌های غذایی، بررسی برهمکنش‌های پروتئین-پلی ساکارید به‌طور گسترده‌ای با هدف کاربرد جدید و بهتر این بیوپلیمرها در حال انجام است. پروتئین‌ها در درجه اول به‌عنوان امولسیفایر و عامل تثبیت‌کننده امولسیون مورد

1. Dispersed phase
2. Continuous phase
3. Clean label

اولیه در حضور نسبت‌های متفاوت دو پلیمر مذکور بررسی گردید و در ادامه پایداری و تغییرات ساختاری آن در شرایط اعمال حرارت (90 °C و 30 دقیقه) پایش شد.

2- مواد و روش‌ها

2-1- مواد اولیه

صمغ فارسی به صورت ترشحات خشک شده از سطح تنه و شاخه‌های درخت گیاه *Amygdalus scoparia* Spach به کمک کارشناس اداره منابع طبیعی و شرکت دنا امولسیون شیراز از منطقه میان جنگل شهرستان فسا در استان فارس جمع آوری شد. پس از تمیز کردن اولیه، گرانول‌ها با استفاده از آسیاب تبدیل به پودر و از الک آزمایشگاهی (Babak-Pars) با مش 60 عبور داده شد. کنسانتره پروتئین آب پنیر¹ (WPC) تجاری حاوی 4/53٪ رطوبت، 80/95٪ پروتئین، 4/7٪ چربی، 6/92٪ لاکتوز و 2/9٪ خاکستر از شرکت Interfood (کد 596490، هلند) خریداری شد. چربی شیر² (99/9٪) با نام تجاری ماهرخ از داخل کشور تهیه شد. سایر مواد شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق از نوع درجه خلوص بالا و مخصوص آنالیزهای شیمیایی از شرکت سیگما بودند.

2-2- تهیه بخش محلول صمغ فارسی

محلول 3٪ درصد وزنی/وزنی صمغ فارسی با استفاده از آب دیونیزه و 0/02٪ سدیم آزاید تهیه و به مدت 2 ساعت با همزن مغناطیسی با سرعت 600 rpm در دمای اتاق مخلوط گردید و به مدت یک شب در دمای 4 °C نگه‌داری شد. به منظور جداسازی جزءهای محلول و نامحلول، پراکنش کامل نمونه صمغ فارسی با استفاده از دستگاه سانتریفوژ (HERMLE, Z23HK, German) طی مدت زمان 30 دقیقه و 20000 دور در دقیقه جداسازی شد. فاز محلول صمغ (نمونه فوقانی به دست آمده پس از سانتریفوژ) جمع آوری و برای تهیه محلول‌های مورد نیاز استفاده شد [23].

2-3- تهیه محلول پروتئین

محلول استوک 16٪ وزنی/وزنی پروتئین تغلیظ شده

مختلفی از قبیل کازئینات سدیم، پروتئین آب پنیر، پروتئین سویا و یا گندم در تولید امولسیون مورد بررسی قرار گرفته است. از این بین پروتئین آب پنیر بهترین بازده را از نظر پایداری امولسیون داشته است. این پروتئین علاوه بر جنبه عملکردی، از لحاظ تغذیه‌ای نیز در فرمولاسیون‌های غذایی اهمیت دارد. پروتئین‌های محلول شیر به علت برخورداری از فعالیت سطحی مناسب می‌توانند به عنوان امولسیفایر جهت جلوگیری از در هم آمیختن فاز پراکنده در امولسیون روغن در آب استفاده شوند. اعمال فرایند حرارتی به این پروتئین‌های کروی منجر به باز شدن مولکول آن‌ها، در سطح قرار گرفتن بخش‌های آبگریز، دنا توره شدن، تجمع مولکولی و بالاخره ایجاد ژل می‌شود [2، 6 و 16].

ایران به دلیل پوشش گیاهی غنی و متنوع، قابلیت بهره‌برداری از صمغ‌های گیاهی گوناگونی را دارا می‌باشد. صمغ فارسی از درخت *Amygdalus scoparia* Spach (بادام کوهی) ترشح می‌شود و به نام‌های "صمغ شیرازی" یا "زدو" نیز موسوم است. میزان تولید صمغ فارسی حدوداً برابر با 470 تن در کل کشور گزارش شده است. این صمغ خواص دارویی مختلفی دارد و به عنوان محرک اشتها، تسکین دهنده دندان درد، خرد کننده سنگ مثانه و غیره عمل می‌کند [17]. در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای بر روی ساختار شیمیایی و خواص عملکردی صمغ فارسی صورت گرفته است. آرابینوز و گالاکتوز، مونوساکاریدهای اصلی صمغ فارسی محسوب می‌شوند و وزن مولکولی حدود $2/59-4/74 \times 10^6$ دالتون با شاخص پراکندگی 1/04-4/05 برای آن گزارش شده است [18]. این صمغ دارای دو بخش محلول و نامحلول است و به مقدار بسیار کم حاوی پروتئین بوده و هم‌چنین از فعالیت سطحی مطلوبی نیز برخوردار است. نتایج تحقیقات اخیر حاکی از این است که صمغ فارسی قابلیت مناسبی در پایدار کردن سامانه‌های امولسیونی، تشکیل فیلم خوراکی، بهبود ویژگی‌های بافتی ماست کم چرب و جایگزینی ژلاتین در پاستیل دارد [17، 19-22].

در پژوهش حاضر، تاثیر غلظت‌های مختلف کنسانتره پروتئین آب پنیر و بخش محلول صمغ فارسی بر پایداری سامانه امولسیون ژل روغن در آب در pH خنثی مورد مطالعه قرار گرفت. به این منظور ابتدا شاخص‌های کیفی امولسیون

1. Whey protein concentrate

2. Anhydrous milk fat

موسوم است یکی از شاخص‌های مطمئن برای پیش‌بینی میزان پایداری سامانه‌های امولسیون می‌باشد. به‌منظور تعیین این کمیت از دستگاه زتا سایزر (مدل Nano ZS، شرکت Malvern، انگلستان) استفاده شد که بر مبنای میزان جابه‌جایی الکتروفوریتیک ذرات بار الکتریکی سطحی کار می‌کند. نتیجه آزمون در دمای 25 درجه سانتی‌گراد و در سه تکرار به‌دست آمد [26، 25].

آب پنیر تهیه و 0/02 درصد بازدارنده میکروبی سدیم آزاید به آب دیونیزه اضافه و به‌منظور آبگیری کامل، یک شب در دمای 4 °C نگهداری شد. قبل از شروع آزمایش، محلول استوک به‌مدت یک ساعت بیرون از یخچال قرار گرفت تا به دمای محیط برسد و سپس pH آن با افزودن هیدروکسید سدیم 0/5 نرمال در pH=7 تنظیم گردید.

4-2- آماده سازی امولسیون

بر اساس فرمول امولسیون با در نظر گرفتن غلظت مورد نیاز کنسانتره پروتئین آب پنیر (در 6 سطح، 8-3 درصد وزنی) و بخش محلول صمغ فارسی (در سه سطح 0، 0/3 و 0/6 درصد وزنی) در محلول نهایی، فاز پیوسته امولسیون با استفاده از محلول استوک پروتئین و صمغ فارسی با یکدیگر مخلوط شدند. بعد از بازبینی pH، محلول کلئیدی فاز پیوسته با میزان 1٪ وزنی/ وزنی چربی شیر به مدت 1 دقیقه و با سرعت 550 دور در دقیقه توسط همزن مغناطیسی مخلوط شدند. به‌منظور تولید امولسیون، همگن‌سازی اولیه با استفاده از همگن ساز اولتراتوراکس (KINEMATICA، PT2100، سوییس) با سرعت 18000 دور در دقیقه به مدت 3 دقیقه و در دمای 40 درجه سانتی‌گراد انجام و برای همگن سازی ثانویه از امواج فراصوت با فرکانس 20 کیلوهرتز به مدت 2 دقیقه و در 70٪ توان اسمی دستگاه (مدل VCX750، ساخت شرکت Sonics & Material، آمریکا) به‌کار برده شد. انتقال امواج فراصوت از بلور پیزوالکتریک به نمونه به‌وسیله سونوترود استوانه ای شکلی از جنس تیتانیوم به قطر 19 میلی‌متر که در عمق 1 سانتی‌متر زیر سطح نمونه غوطه‌ور می‌شود، انجام گردید. دمای نمونه در طول فرایند در دمای 40 °C ثابت نگه داشته شد [24]. به منظور اعمال فرایند حرارتی، نمونه‌های امولسیون اولیه به لوله‌های شیشه‌ای درب دار به ارتفاع 15 cm و قطر 1 cm منتقل و به مدت 30 دقیقه در دمای 90 °C در داخل حمام آب حرارت داده شدند و بلافاصله به‌وسیله حمام یخ تا دمای محیط خنک شد. آزمون‌های امولسیون در این مرحله انجام شد.

5-2- بار الکتریکی سطحی

بار الکتریکی سطحی قطرات که به پتانسیل زتا (ζ) موسوم

6-2- توزیع اندازه قطرات

توزیع اندازه قطرات نمونه‌های امولسیون (یک ساعت بعد از تولید و یا پس از اعمال فرایند حرارتی) با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری اندازه ذرات (Mastersizer 2000، Malvern، UK) در دمای محیط انجام شد. مبنای اندازه‌گیری دستگاه براساس تفکیک تفرق نور است [26، 25]. قطر متوسط طولی - حجمی ($D_{4,3}$) بر اساس معادله (1) به دست آمد:

$$D_{4,3} = \frac{\sum n_i d_i^4}{\sum n_i d_i^3} \quad (1)$$

در عبارت فوق n_i تعداد ذرات با قطر d_i است. برای محاسبه شاخص دامنه پراکنندگی (عدد اسپان) که پهنای منحنی توزیع اندازه و شاخص یکنواختی قطر ذرات است از معادله (2) استفاده شد:

$$Span = \frac{[d(V, 90) - d(V, 10)]}{d(V, 50)} \quad (2)$$

در این عبارت $d(V, 10)$ ، $d(V, 50)$ و $d(V, 90)$ به ترتیب قطر قطرات در 10، 50 و 90 درصد حجم تجمعی می‌باشند.

7-2- گرانی و ویژگی‌های رئولوژیکی

اندازه‌گیری گرانی و ظاهری و بررسی رفتار جریان نمونه‌ها با استفاده از ویسکومتر چرخشی بروکفیلد (مدل DV-III Ultra، آمریکا) انجام شد. کلیه سنجش‌ها با به‌کارگیری سامانه UL Adapter در محدوده درجه برش $50-100 \text{ S}^{-1}$ و در دمای 25 درجه سانتی‌گراد عمل آمد. نرم افزار سیگما پلات نسخه 7 به منظور مدل‌سازی رفتار جریان استفاده شد [26-28].

8-2- مشاهده میکروسکوپی

ابتدا امولسیون به نسبت 1 به 1 رقیق شد. سپس یک قطره از آن بر روی لام قرار گرفت و با استفاده از میکروسکوپ نوری (Labmed, مدل 400x، آمریکا)، عکسبرداری نمونه‌ها در بزرگ نمایی 40× انجام شد.

9-2- تجزیه و تحلیل آماری

طرح آماری مورد استفاده در این پژوهش بر پایه طرح کاملاً تصادفی در قالب آزمون فاکتوریل و در سطح اطمینان 95% انتخاب شد. متغیرهای مستقل این تحقیق شامل میزان کنسانتره پروتئین آب پنیر در 6 سطح (8-3% وزنی) و بخش محلول صمغ فارسی در سه سطح (6/0-0% وزنی) است و در نتیجه تعداد 18 تیمار با سه تکرار تهیه شد. به منظور بررسی اثر بیوپلیمرها بر ویژگی‌های امولسیون حرارت دیده، تمامی آزمون‌ها برای نمونه‌های امولسیون تحت حرارتی نیز تکرار شد. تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS 16 صورت گرفت و میانگین‌ها به وسیله آزمون چند دامنه‌ای دانکن¹ با یکدیگر مقایسه شدند. نمودارها با استفاده از نرم افزار Excel. 2013 رسم شدند.

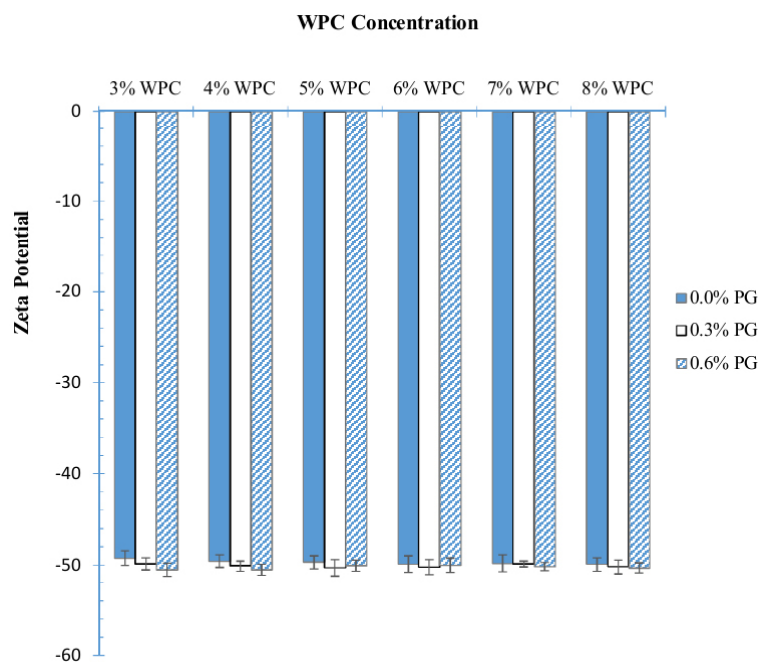
3-نتایج و بحث

3-1- بار الکتریکی سطحی

پتانسیل زتای قطرات روغن در نمونه‌های امولسیون حاوی سطوح غلظتی مختلف WPC و بخش محلول صمغ فارسی با pH خنثی نشان داد که بار الکتریکی سطحی قطرات در تمام تیمارهای مورد بررسی منفی و در گستره 49- تا 50- میلی‌ولت نوسان می‌کند (شکل 1). منفی بودن پتانسیل زتا به دلیل بار الکتریکی WPC است که در بالاتر از نقطه ایزوالکتریک (pH=4/6) منفی می‌باشد. این داده‌ها نشان می‌دهد که افزودن بخش محلول صمغ فارسی، به مقدار اندکی پتانسیل زتای قطرات امولسیون را کاهش داد اما اثر آن معنی‌دار نبود. علت عدم تغییر بار الکتریکی سطحی در حضور صمغ را می‌توان به دافعه الکترواستاتیک بین دو پلیمر نسبت داد. به عبارت دیگر از آنجایی که بار الکتریکی پروتئین و صمغ در این شرایط منفی است علیرغم وجود نواحی با بار الکتریکی مثبت بر سطح پروتئین، مطابق تئوری DLVO¹، برآیند نیروهای الکترواستاتیک دافعه‌ای است که در نتیجه مانع از اتصال صمغ و پروتئین شده و لذا بار الکتریکی سطحی قطرات تغییر

1. Derjaguin, Landau, Verwey, and Overbeek (DLVO theory)

1. Duncan



شکل (1) منحنی مقادیر پتانسیل زتا امولسیون در سطوح مختلف پروتئین WPC و بخش محلول صمغ فارسی

اندازه ذرات امولسیون تاثیرگذار است. نمودار اندازه ذره برای امولسیون پایدار شده با پروتئین آب پنیر حتی در نمونه‌های فاقد صمغ فارسی نیز به صورت تک پیک^۱ نبود (شکل ۲) که مؤید نایکنواختی اندازه قطرات می‌باشد و در مطالعات پیشین نیز این روند مشاهده و گزارش شده است. لیزاراگا و همکاران، دیوسکا، کوهن و کنها و یوسفی و همکاران نیز در مطالعات خود، نمودار توزیع اندازه ذره غیر تک پیک را برای امولسیون پایدار شده با پروتئین آب پنیر به دست آوردند. به نظر می‌رسد استفاده از نیروی‌های بسیار قوی مانند فراصوت و هموژن کردن در فشارهای بسیار بالا در تولید امولسیون پایدار شده با پروتئین آب پنیر، هرچند سبب کاهش میانگین اندازه ذرات امولسیون روغن در آب می‌شود، با این حال منجر به ایجاد چند پیک شدن^۲ طیف اندازه ذرات سیستم می‌شود [30-33].

افزایش غلظت پروتئین امولسیون در غیاب بخش محلول صمغ فارسی، به‌طور منظم و معنی‌دار سبب کاهش اندازه ذره $(D_{3,4})$ امولسیون شد (جدول ۱) به‌طوری که در غلظت‌های بالای کنسانتره پروتئین آب پنیر (در حضور ۷-۸ درصد وزنی) قطرات بسیار کوچک امولسیون ثبت شد. سایر شاخص‌های اندازه‌ای نیز روند مشابهی نشان دادند اما عدد اسپان نمونه‌ها با زیاد شدن غلظت WPC افزایش یافت. این پدیده می‌تواند به دلیل حضور پروتئین‌های آزاد در فاز پیوسته امولسیون باشد که با تجمع در کنار یکدیگر و یا ایجاد اتصال عرضی بین قطره‌ای بر روی یکنواختی توزیع کلی اندازه قطرات سیستم تاثیر گذار می‌باشند. در مطالعات گذشته نیز نتیجه مشابهی با

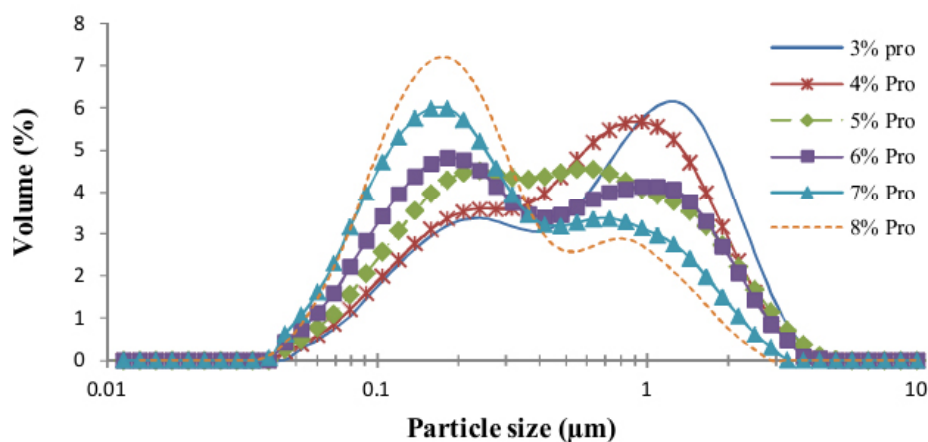
1. Monomodal
2. Polydispersity

چندانی نمی‌کند [26]. نکته حائز اهمیت دیگری که از برهم‌کنش دافعه‌ای صمغ و پروتئین می‌توان استنباط کرد این است که ملکول‌های صمغ عمدتاً در فاز پیوسته قرار دارند و سطح مشترک قطرات روغن صرفاً با ملکول‌های پروتئین پوشیده شده است.

شایان ذکر است که پتانسیل زتای کم‌تر از ۳۰- و یا بیش‌تر از ۳۰+ میلی ولت بیانگر ایجاد شرایط مناسب برای جلوگیری از وقوع پدیده‌های ناپایداری مانند به هم پیوستگی و یا در هم آمیختگی قطرات می‌باشد. در این شرایط قطرات روغن به دلیل ایجاد نیروهای دافعه‌ای تمایل به نزدیک شدن، به هم پیوستن و تجمع ندارند که این موضوع تاثیر مثبتی بر پایداری امولسیون دارد. در مطالعات انجام شده توسط سایر محققین، افزایش صمغ زانتان به امولسیون نوشیدنی پرتقال [29]، افزودن صمغ بذر کتان [7] و هم‌چنین صمغ قدومه شهری [26] به امولسیون پایدار شده با پروتئین آب پنیر تاثیر چشمگیری در پتانسیل زتای امولسیون در pH خنثی نداشت.

3-2- اندازه ذره و ریزساختار امولسیون قبل و بعد از اعمال فرایند حرارت

قطر متوسط قطره‌های امولسیون بر خصوصیات رئولوژیکی، پایداری و رنگ امولسیون‌ها تاثیرگذار است. عدد اسپان، قطر متوسط طولی-حجمی و شاخص‌های اندازه‌ای قطرات امولسیون، بعد از تولید و بعد از فرایند حرارتی نمونه مورد بررسی، در جدول (۱) آورده شده است. میزان غلظت پروتئین کنسانتره آب پنیر و بخش محلول صمغ فارسی موجود در سیستم بر



شکل (۲) منحنی توزیع اندازه ذره امولسیون در غلظت‌های ۳-۸٪ کنسانتره پروتئین آب پنیر بعد از تولید

جدول (1) عدد اسپان، قطر متوسط و شاخص‌های اندازه ای قطرات در امولسیون‌های تهیه شده با غلظت‌های مختلف WPC و صمغ فارسی بعد از تولید و بعد از فرایند حرارتی

| بعد از فرایند حرارتی | | | | | بعد از تولید امولسیون | | | | | امولسیون |
|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| Span | d(0.9) | d(0.5) | d(0.1) | D _[4,3] | Span | d(0.9) | d(0.5) | d(0.1) ^{ns} | D _[4,3] | |
| 5/336 ^a | 1/673 ^a | 0/297 ^f | 0/089 ^f | 0/931 ^{ab} | 3/623 ^h | 1/978 ^{fg} | 0/517 ^h | 0/107 ^a | 0/817 ^{gh} | 3%WPC + 0/0 %PG |
| 6/912 ^{bc} | 2/376 ^b | 0/331 ^g | 0/087 ^e | 0/903 ^a | 3/183 ^e | 2/033 ^f | 0/6 ⁱ | 0/124 ^a | 0/874 ^h | 3%WPC + 0/3 %PG |
| 10/435 ^f | 2/997 ^e | 0/279 ^{def} | 0/085 ^d | 1/031 ^{abc} | 2/257 ^a | 2/082 ^g | 0/845 ⁱ | 0/176 ^a | 1/007 ⁱ | 3%WPC + 0/6 %PG |
| 8/077 ^e | 2/419 ^b | 0/289 ^{cde} | 0/088 ^f | 1/4 ^c | 2/641 ^b | 1/593 ^e | 0/556 ^h | 0/125 ^a | 0/729 ^{efg} | 4%WPC + 0/0 %PG |
| 6/912 ^b | 2/376 ^{cd} | 0/277 ^{ef} | 0/087 ^e | 0/952 ^{ab} | 2/80 ^c | 1/645 ^e | 0/54 ^h | 0/129 ^a | 0/761 ^{fgh} | 4%WPC + 0/3 %PG |
| 11/981 ^g | 3/112 ^b | 0/217 ^b | 0/089 ^f | 2/104 ^g | 3/927 ⁱ | 1/971 ^{fg} | 0/478 ^g | 0/093 ^a | 1/893 ^j | 4%WPC + 0/6 %PG |
| 6/553 ^b | 3/348 ^f | 0/496 ^j | 0/098 ^j | 1/243 ^d | 2/924 ^d | 1/447 ^d | 0/457 ^g | 0/115 ^a | 0/689 ^{ef} | 5%WPC + 0/0 %PG |
| 6/554 ^b | 2/691 ^c | 0/394 ^b | 0/094 ^{gh} | 0/979 ^{abc} | 3/505 ^{gh} | 1/7 ^e | 0/42 ^f | 0/11 ^a | 0/715 ^{efg} | 5%WPC + 0/3 %PG |
| 7/356 ^c | 2/814 ^d | 0/428 ^k | 0/094 ^h | 2/933 ⁱ | 4/224 ^k | 2/649 ^h | 0/6 ⁱ | 0/115 ^a | 2/388 ^j | 5%WPC + 0/6 %PG |
| 14/752 ⁱ | 3/338 ^f | 0/221 ^b | 0/085 ^d | 1/208 ^c | 3/44 ^f | 1/297 ^c | 0/347 ^d | 0/102 ^a | 0/545 ^{cd} | 6%WPC + 0/0 %PG |
| 10/74 ^f | 2/795 ^{dd} | 0/253 ^c | 0/083 ^c | 0/946 ^{ab} | 3/56 ^g | 1/585 ^e | 0/414 ^f | 0/111 ^a | 0/647 ^{de} | 6%WPC + 0/3 %PG |
| 7/637 ^d | 3/756 ^g | 0/551 ^j | 0/1 ^j | 3/237 ^j | 3/946 ⁱ | 2/951 ⁱ | 0/714 ⁱ | 0/135 ^a | 2/33 ^k | 6%WPC + 0/6 %PG |
| 14/811 ^j | 3/339 ^f | 0/22 ^b | 0/08 ^b | 1/07 ^{bc} | 4/564 ^m | 1/13 ^b | 0/229 ^b | 0/083 ^a | 0/44 ^{bc} | 7%WPC + 0/0 %PG |
| 15/679 ^k | 3/08 ^e | 0/192 ^a | 0/076 ^a | 0/946 ^{ab} | 4/134 ^j | 1/199 ^c | 0/268 ^c | 0/09 ^a | 0/485 ^{bc} | 7%WPC + 0/3 %PG |
| 15/76 ^k | 4/553 ⁱ | 0/283 ^{ef} | 0/093 ^g | 2/558 ^h | 4/608 ^m | 1/806 ^f | 0/37 ^e | 0/1 ^a | 2/235 ^k | 7%WPC + 0/6 %PG |
| 12/545 ^h | 3/017 ^e | 0/234 ^b | 0/081 ^b | 1/652 ^f | 4/591 ^l | 0/797 ^a | 0/177 ^a | 0/075 ^a | 0/316 ^a | 8%WPC + 0/0 %PG |
| 15/826 ^k | 4/19 ^h | 0/259 ^{cd} | 0/084 ^c | 1/278 ^d | 3/565 ^g | 0/877 ^a | 0/277 ^c | 0/165 ^a | 0/424 ^b | 8%WPC + 0/3 %PG |
| 17/168 ^l | 7/673 ^j | 0/441 ⁱ | 0/096 ⁱ | 4/151 ^k | 4/18 ^{jk} | 3/209 ^j | 0/739 ^k | 0/119 ^a | 3/04 ^m | 8%WPC + 0/6 %PG |

ns: عدم معنی‌دار بودن آزمون در سطح 0/05

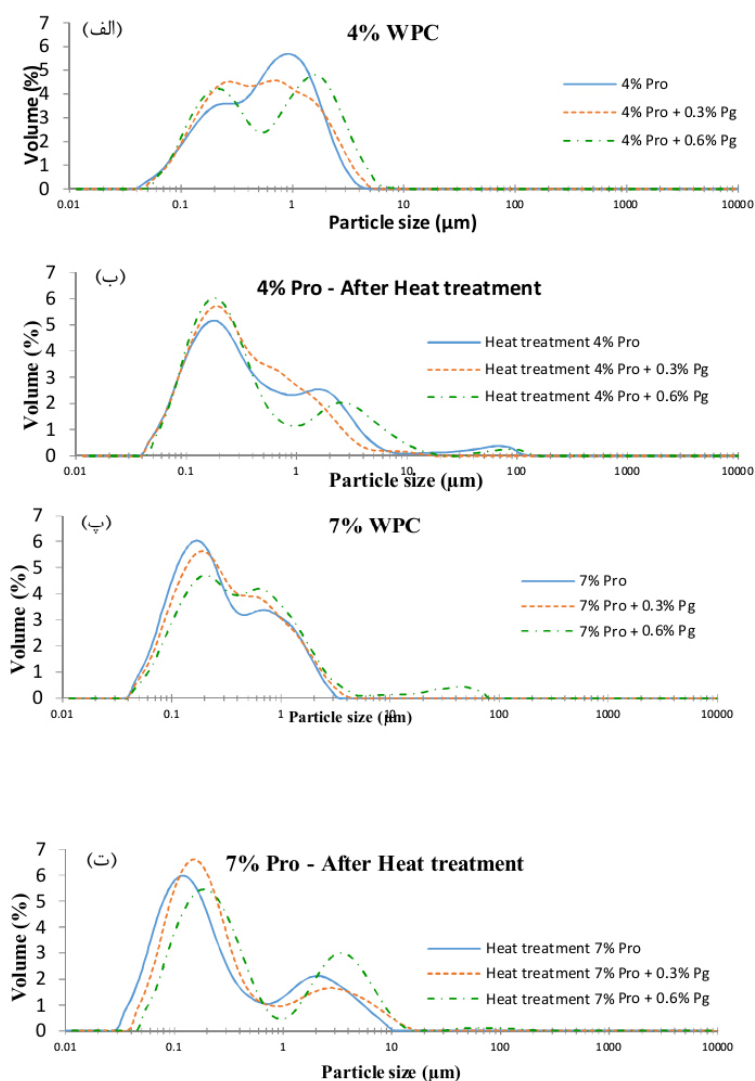
باشد که منجر به انبوهش تخلیه‌ای^۱ قطرات روغن می‌گردد. به عبارت دیگر تجمع ملکول‌های صمغ در فاز آبی و عدم حضور آن‌ها در فضاهای بین قطره‌ای باعث ایجاد اختلاف فشار اسمزی در این نواحی شده که منجر به خروج آب و نزدیک شدن قطره‌ها به یکدیگر می‌شود که نتیجه آن انبوهش گویچه‌ها و بروز اتصالات عرضی بین آن‌ها می‌باشد [2، 36].

شایان ذکر است که غلظت صمغ می‌تواند تاثیر دوگانه‌ای بر اندازه قطرات امولسیون داشته باشد. به و سینگ گزارش کردند افزودن صمغ زانتان در غلظت بالاتر از 0/12 درصد در امولسیون پایدار شده توسط ایزوله پروتئین آب پنیر (WPI)

افزایش غلظت پروتئین محلول شیر در امولسیون روغن در آب گزارش شده است [30، 34 و 35].

افزودن صمغ فارسی در سطح 0/3٪ وزنی به نمونه‌های امولسیون حاوی 3-7٪ پروتئین آب پنیر، تغییر معنی‌داری در اندازه قطرات امولسیون نسبت به نمونه‌های فاقد صمغ ایجاد نکرد. در حالی‌که نتایج نشان داد وجود صمغ فارسی در سطح 0/6٪ وزنی در تمامی نمونه‌ها سبب افزایش اندازه قطرات و بزرگ‌تر شدن عدد اسپان آن‌ها گردید (شکل 3). این پدیده می‌تواند به دلیل رانش ملکول‌های صمغ توسط پروتئین جذب شده در سطح قطرات و تجمع آن‌ها در فاز پیوسته امولسیون

1. Depletion flocculation



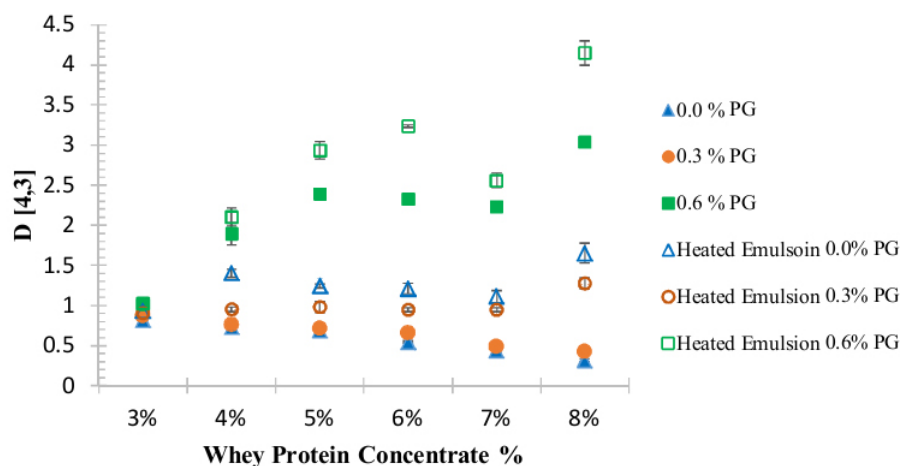
شکل (3) منحنی توزیع اندازه قطرات امولسیون، الف- غلظت 4٪ کنسانتره پروتئین آب پنیر و سطوح مختلف بخش محلول صمغ فارسی بعد از تولید، ب- نمونه (الف) بعد از فرایند حرارتی، پ- غلظت 7٪ کنسانتره پروتئین آب پنیر و سطوح مختلف صمغ بعد از تولید، ت- نمونه (پ) بعد از فرایند حرارتی

بخش محلول صمغ در جلوگیری از افزایش اندازه قطرات در حین اعمال حرارت را می‌توان بر این اساس توضیح داد که به دلیل دناتوره شدن پروتئین و باز شدن ساختمان آن نواحی با بار الکتریکی مثبت و یا گروه‌های عاملی بیش‌تری در دسترس قرار می‌گیرد که امکان برهمکنش موضعی با ملکول‌های صمغ و اتصال زنجیره‌های باردار و حجیم آن به سطح قطرات را فراهم نموده و به این ترتیب از نزدیک شدن آن‌ها به یکدیگر با اعمال دافعه فضایی و یا الکترواستاتیک ممانعت به عمل می‌آید؛ اما از آن جایی که میزان این نوع برهم‌کنش‌ها محدود است، مازاد غلظت صمغ در فاز آبی تجمع یافته و تاثیری مشابه با پیش از اعمال حرارت از خود بر جای می‌گذارد. بنابراین کاملاً طبیعی است که هر چه غلظت صمغ کم‌تر باشد مقدار مازاد آن در فاز آبی نیز کم‌تر شده و اثرات منفی حاصله نیز کاهش بیش‌تری نشان می‌دهد و لذا دور از انتظار نیست که در غلظت 0/3 درصد صمغ فارسی تغییرات اندازه قطرات در اثر اعمال حرارت ناچیز و کم‌تر از سایر نمونه‌ها باشد.

بررسی منحنی‌های توزیع اندازه قطرات امولسیون‌ها بعد از فرایند حرارتی (شکل 3) حاکی از پهن‌تر شدن آن‌ها و ایجاد دنباله، همراه با ظهور پیک سوم در ناحیه سمت راست است که مؤید امتزاج و در هم آمیختگی قطرات و بزرگ‌تر شدن آن‌ها می‌باشد و باعث نایک‌نواختی بیش‌تر سامانه می‌شود. این موضوع از مقایسه اعداد اسپان جدول (1) (بعد از تولید و بعد از فرایند حرارتی) نیز کاملاً مشهود است. نکته قابل توجه در مقایسه نمودارهای توزیع اندازه ذره به‌دست آمده در تیمار

باعث افزایش اندازه ذرات و در هم آمیختن بیش‌تر قطرات امولسیون گردید. هم‌چنین برای امولسیون (10٪ روغن کانولا) پایدارشده توسط 10٪ بیوپلیمرهای ایزوله پروتئین آب پنیر و صمغ عربی با نسبت‌های 3:1 و pH=7، پایداری بسیار بهتری نسبت به امولسیون حاصل از هر کدام از بیوپلیمرها گزارش شده است. هم‌چنین اندازه ذرات کوچک‌تر از 1 میکرومتر در امولسیون حاصل و تغییرات بسیار کم اندازه ذرات در طی یک ماه نگهداری امولسیون در دمای 25 درجه سانتی‌گراد مشاهده شد [32]. به نظر می‌رسد در پژوهش حاضر غلظت صمغ فارسی باعث شده است که تاثیر آن بر بروز انبوهش تخلیه‌ای بیش از افزایشی باشد که در اثر گرانش و کاهش میزان تحرک و جابه‌جایی قطرات ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر برآیند این تاثیرات دوگانه و ناهمسو، سبب بزرگ‌تر شدن اندازه قطرات امولسیون می‌باشد.

اعمال حرارت سبب افزایش اندازه قطرات امولسیون، در مقایسه با قبل از فرایند حرارت دهی در تمامی نمونه‌ها شد. بعد از تیمار حرارتی، مقایسه اندازه ذره امولسیون‌های پایدار شده با کنسانتره پروتئین آب پنیر در نمونه‌های فاقد و حاوی بخش محلول صمغ فارسی نتیجه جالبی را نشان می‌دهد. در این میان میزان افزایش اندازه قطرات در امولسیون‌های پایدار شده با پروتئین آب پنیر به تنهایی نسبت به نمونه‌های حاوی صمغ فارسی بیش‌تر بود. پس از حرارت دهی، مقادیر اندازه ذره $D_{4,3}$ در حضور 0/3 درصد بخش محلول صمغ فارسی در مقایسه با سایر نمونه‌ها در حداقل مقدار باقی ماند (شکل 4). تاثیر مثبت



شکل (4) مقایسه اندازه میانگین حجمی ($D_{4,3}$) قطره‌های امولسیون بعد از تولید و بعد از فرایند حرارتی

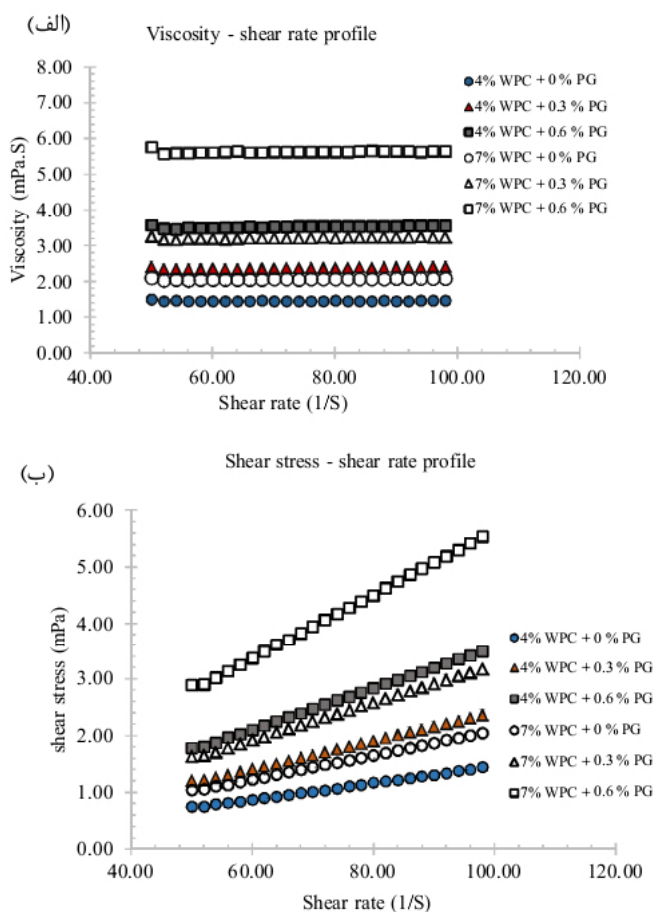
پروتئین‌های آزاد در فاز پیوسته عامل اصلی مقاومت امولسیون پایدار شده با پروتئین محلول شیر در طی تیمار حرارتی است [42]. شدت فلوکولاسیون قطرات و یا ایجاد تجمع‌های پروتئینی در فاز پیوسته طی اعمال حرارت امولسیون وابسته به فرایند حرارت دهی (دما و زمان)، شرایط pH، مقدار پروتئین جذب نشده در فاز پیوسته و نیز مولکول‌های پلی ساکارید و اکنش نداده با لایه پروتئین جذبی است [39، 43-45].

3-3- رفتار جریان امولسیون بعد از تولید و بعد از اعمال فرایند حرارت

رفتار جریان امولسیون حاصل از غلظت‌های مختلف کنسانتره پروتئین آب پنیر و بخش محلول صمغ فارسی در دو مرحله بعد از تولید نمونه و بعد از فرایند حرارتی بررسی شد. نمودار تنش برش-درجه برش و تغییرات گرانشی-درجه

حرارتی، بیشینه بودن پیک اول اندازه ذرات در گستره بین 100-300 نانومتر پس از حرارت دهی است (شکل 3) که می‌تواند به دلیل دناتوره شدن و تجمع مولکول‌های پروتئین آب پنیر تغلیظ شده در اثر فرایند حرارتی در این گستره نانومتری باشد [38].

نتیجه تحقیقات پیشین نیز حاکی از افزایش اندازه ذره امولسیون پایدار شده با پروتئین آب پنیر بعد از فرایند حرارتی است و سرعت این فرایند متناسب با غلظت پروتئین است [39، 40]. در حقیقت شرایطی مانند pH نزدیک به نقطه ایزوالکتریک پروتئین و یا میزان یون بسیار بالا در سیستم شرایطی بسیار مناسب برای نزدیک شدن و به هم پیوستن قطرات روغن است که منجر به ناپایدار شدن امولسیون می‌شود [41]. تشکیل لایه ضخیم پروتئینی اطراف قطرات امولسیون و هم‌چنین ایجاد ذرات پروتئینی بزرگ‌تر در اثر تجمع



شکل (5) الف- تغییرات تنش برش-درجه برش، ب- گرانشی-درجه برش برای امولسیون‌های تهیه شده با پروتئین تغلیظ شده آب پنیر (4 و 7٪) و بخش محلول صمغ فارسی (0، 0/3 و 0/6 درصد به ترتیب با علامت دایره، مثلث و مربع) در pH=7 و دمای 25 درجه سانتی‌گراد

آن بر این شاخص‌ها را می‌توان بر اساس انبوهش تخلیه‌ای و نیز تجمع ملکول‌های صمغ در فاز پیوسته توضیح داد. تحقیقات مختلفی تاثیر ملکول‌های جذب نشده در سطح مشترک قطرات و غلظت صمغ‌ها را در افزایش گرانشی سیستم امولسیونی را گزارش کردند. شایان ذکر است هیدروکلوئیدها وزن مولکولی بالایی دارند و نسبت به جریان به خصوص در سرعت برشی کم مقاومت می‌کنند و بنابراین گرانشی را افزایش می‌دهند. این پدیده تاثیر مثبتی بر پایداری امولسیون دارد [8، 24، 26، 36، 38 و 47].

بعد از اعمال حرارت، گرانشی تمامی نمونه‌ها در مقایسه با قبل از فرایند افزایش یافت. این پدیده را می‌توان به انبوهش قطرات و نیز دناتورده شدن WPC نسبت داد. تجمع قطرات امولسیون در کنار یکدیگر باعث بزرگ‌تر شدن حجم موثر توده شده که با احتساب آب به دام افتاده در آن، ضمن کاهش جزء حجمی فاز پیوسته طبق رابطه کریگر-دوئرتی موجب بیش‌تر شدن گرانشی می‌گردد. از طرف دیگر برهم کنش‌های آبگریزی و نیز تشکیل پیوندهای کووالانسی بین ذرات پروتئین دناتورده شده در فاز پیوسته باعث بوجود آمدن شبکه ژل ماندنی می‌شود که با احتساب ملکول‌های آب، روانی کل سامانه را کاهش داده و به این ترتیب گرانشی را افزایش می‌دهد [34، 39، 40]. مدل قانون توان برای بررسی رفتار جریان هجده نمونه امولسیون حرارت دیده انتخاب و پارامترهای مدل با ضریب همبستگی بالا ($R^2=0/99$) محاسبه شد. نمونه‌های امولسیون بسته به غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر و بخش محلول صمغ فارسی رفتار نیوتونی و یا رقیق شونده با برش را در محدوده درجه برش مورد بررسی نشان دادند (جدول 2) و با افزایش غلظت بیوپلیمرها، رفته رفته نشانه‌های رفتار شبه پلاستیک بیش‌تر شد. انبوهش تخلیه‌ای شدید و تجمعات پروتئینی دناتورده شده حاوی پروتئین تغلیظ شده آب پنیر و صمغ فارسی

برش برای شش امولسیون به‌طور نمونه در شکل (5) نشان داده شده است. با افزایش درجه برش، تغییرات تنش برشی امولسیون‌ها به‌صورت خطی افزایش یافت. هم‌چنین گرانشی ظاهری نمونه‌ها نیز ثابت و مستقل از تغییرات درجه برش بود. این نتایج بیانگر رفتار شبه نیوتونی نمونه‌ها در گستره درجه برش مورد مطالعه است. این در حالی است که انتظار می‌رفت با توجه به تغییرات اندازه قطرات در حضور صمغ که مؤید وقوع پدیده انبوهش تخلیه‌ای بود، نمونه‌های امولسیونی رفتار غیرنیوتنی و رقیق شونده با برش از خود نشان دهند. احتمال داده می‌شود که دلیل بروز رفتار نیوتنی، پایین بودن جزء حجمی فاز روغنی و غلظت صمغ باشد. دلیل دیگری که می‌توان برای این نوع رفتار متصور شد، مقاومت اتصالات عرضی پروتئینی بین قطره‌ای در برابر تنش برشی است که با حفظ اجتماع قطرات و جلوگیری از شکست آن‌ها مانع از افت گرانشی با افزایش درجه برش گردید. رفتار نیوتونی با اندازه ذرات بسیار ریز (900-340 نانومتر) برای امولسیون‌های حاوی مقادیر پایین چربی شیر ($<5\%$) و پایدار شده با ایزوله پروتئین آب پنیر در pH خنثی را گزارش شده است. مانع‌آوری و همکاران نیز رفتار جریان امولسیون حاوی 30٪ روغن سویا و پایدار شده با 5٪ ایزوله پروتئین آب پنیر را نیوتونی گزارش کردند. رفتار نیوتونی برای امولسیون‌های پایدار شده با 3٪ پروتئین آب پنیر و حاوی 50٪ روغن، نیز مشاهده شده است [10، 30].

در تمامی نمونه‌های امولسیونی با افزایش غلظت WPC و بخش محلول صمغ فارسی گرانشی ظاهری افزایش یافت (شکل 5-ب). بیش‌تر شدن گرانشی نمونه‌های فاقد صمغ با افزایش غلظت WPC کاملاً طبیعی است و به کاهش اندازه قطرات مربوط می‌شود. افزایش گرانشی در نمونه‌های حاوی صمغ و پروتئین، علیرغم بزرگ‌تر شدن اندازه قطرات و اثر منفی

جدول (2) ویژگی‌های رئولوژیکی امولسیون‌های

| امولسیون | n | K (mPa.s) ^a | R ² |
|-----------------|---------------|------------------------|----------------|
| 6%WPC + 0/6 %PG | 0/959 ± 0/005 | 0/133 ± 0/002 | 0/999 |
| 7%WPC + 0/3 %PG | 0/975 ± 0/016 | 0/063 ± 0/004 | 0/999 |
| 7%WPC + 0/6 %PG | 0/903 ± 0/024 | 0/247 ± 0/005 | 0/999 |
| 8%WPC + 0/3 %PG | 0/96 ± 0/015 | 0/162 ± 0/003 | 0/999 |
| 8%WPC + 0/6 %PG | 0/686 ± 0/011 | 2/451 ± 0/044 | 0/999 |

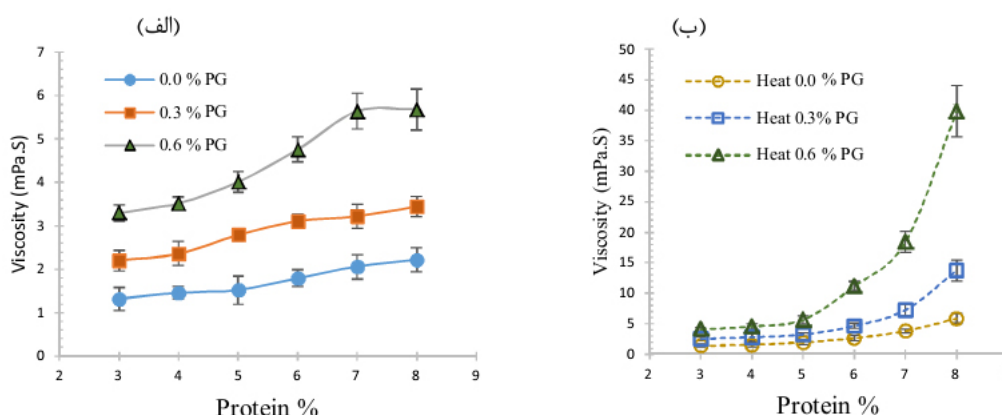
پروتئین‌های تجمع یافته از طریق افزایش گرانیوی فاز پیوسته امولسیون، تغییرات بار الکتریکی سطحی در سیستم و هم‌چنین مشارکت در تشکیل لایه دوم پروتئینی بر سطح قطرات روغن، اثر مثبتی بر مقاومت امولسیون طی فرایند حرارتی دارد [38]، [41]. به نظر می‌رسد میزان بخش محلول صمغ فارسی موجود در سیستم علاوه بر تغییر گرانیوی فاز پیوسته امولسیون، به دلیل قابلیت جذب آب و تغییرات ترمودینامیکی در مقدار ایجاد این ذرات تجمع یافته پروتئینی نیز تاثیرگذار است.

3-4- مشاهدات میکروسکوپی قبل و بعد از اعمال فرایند حرارت

بررسی میکروسکوپی نمونه‌ها حاکی از این بود که در غلظت‌های پایین WPC، افزودن 0/3 درصد صمغ فارسی تفاوت محسوسی را در اندازه قطرات امولسیون‌های حرارت داده نشده ایجاد نکرد؛ اما در غلظت 0/6 درصد باعث درشت‌تر شدن آن‌ها گردید. ضمن این که اثر چندانی از انبوهش نیز مشاهده نشد (شکل 7). این تصاویر علاوه بر این که نتایج سنجش اندازه قطرات را تایید می‌کند، بیانگر ناکافی بودن مقدار پروتئین در پوشش‌دهی کامل سطح قطرات است که بلافاصله پس از انبوهش تخلیه‌ای در حضور صمغ، درهم آمیختگی نیز در آن‌ها به وقوع پیوسته است. از سوی دیگر در غلظت‌های بالاتر پروتئین به تنهایی نشانه‌هایی از انبوهش ملاحظه شد که با افزودن صمغ به‌ویژه در غلظت 0/6% کاملاً تشدید شد و ضمن ایجاد تجمعات پراکنده موجب

در این شرایط می‌تواند توجیه کننده حالت رقیق شونده با برش در این نمونه‌های امولسیونی باشد [38].

نتیجه جالبی در روند تغییرات گرانیوی نمونه‌ها مشاهده شد. شکل (6) نشان می‌دهد تغییرات گرانیوی قبل و بعد از اعمال حرارت برای نمونه‌های حاوی بیش از 5% پروتئین، بسیار بالاتر از نمونه‌هایی با مقادیر کم‌تر پروتئین است. فرایند حرارتی سبب دناتوره شدن و ایجاد ذرات تجمع یافته حاصل از پروتئین‌های محلول شیر می‌شود. به همین دلیل این پدیده در نمونه‌های حاوی پروتئین آزاد بیش‌تر، شدیدتر است. علاوه بر این، تغییرات گرانیوی سیستم طی فرایند حرارتی با وجود بخش محلول صمغ فارسی در نمونه‌های دارای بیش از 5% پروتئین آب پنیر، تشدید شد. این در حالی است که نتیجه اندازه قطرات امولسیون‌های حاوی 0/3% بخش محلول صمغ فارسی کم‌تر از نمونه‌های فاقد صمغ است. بنابراین افزایش گرانیوی در این نمونه‌ها تنها به دلیل تجمع قطره‌های روغن نیست. ارتباط نتیجه رفتار جریان، میزان گرانیوی و اندازه ذرات در نمونه‌های امولسیونی، تأییدکننده این نکته است که حضور بخش محلول صمغ فارسی بر میزان تغییرات دناتوره شدن کنسانتره پروتئین آب پنیر طی فرایند حرارت دهی اثرگذار است. پروتئین‌های تجمع یافته در اثر تیمار حرارتی می‌تواند به‌عنوان پایدارکننده‌ای بدون ویژگی فعال سطحی در پایه امولسیون محسوب شوند. این ذرات پروتئینی طی حرارت دهی در شرایط خاص (pH خنثی و قدرت یونی کم) ایجاد می‌شوند و قابلیت بهبود پایداری امولسیون را دارند.



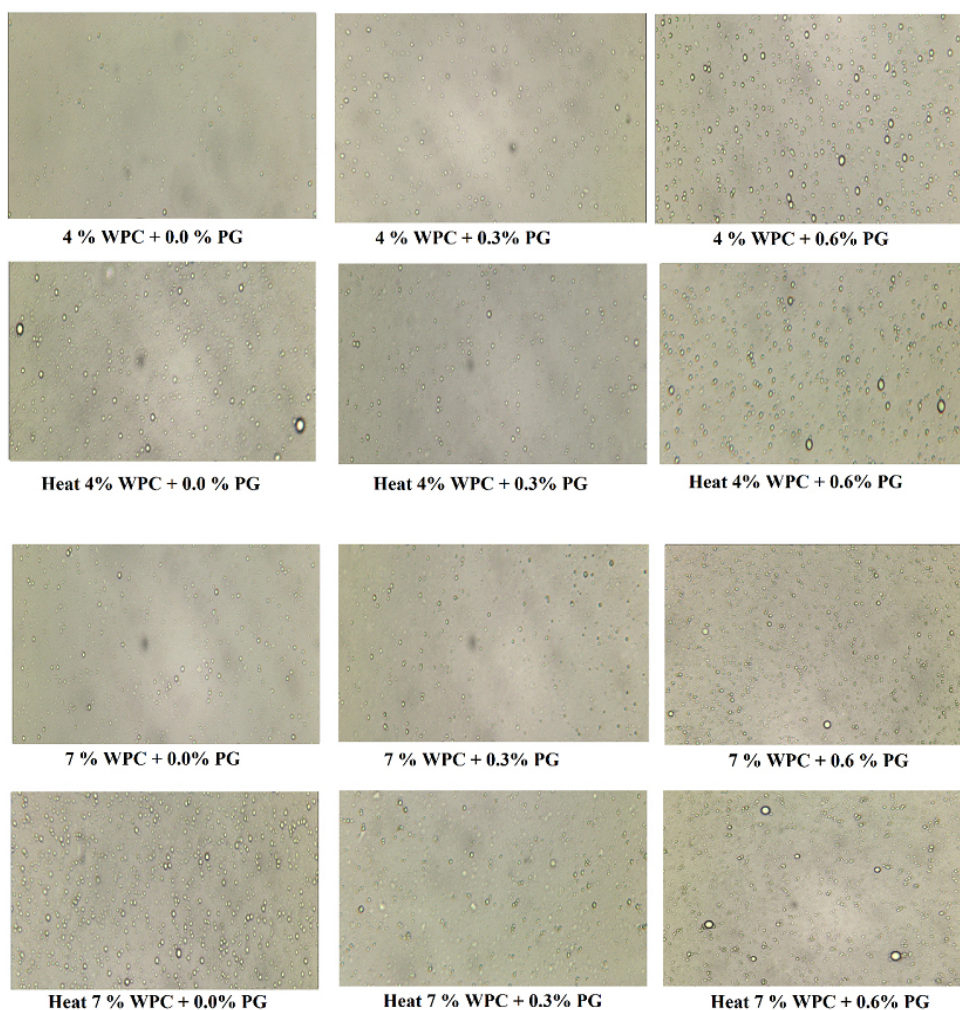
شکل (6) گرانیوی نمونه‌های امولسیون در سطوح مختلف پروتئین آب پنیر و بخش محلول صمغ فارسی در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، الف- بعد از تولید، ب- بعد از فرایند حرارتی

در هم آمیختگی و بزرگ‌تر شدن اندازه قطرات گردید. حرارت دادن نمونه‌های امولسیونی چنان‌که در تصاویر میکروسکوپی شکل (7) نیز ملاحظه می‌شود در همه موارد باعث بروز انبوهش و درشت‌تر شدن قطرات گردید و با بیش‌تر شدن غلظت WPC و صمغ به‌طور چشمگیری افزایش یافت. البته ذکر این نکته نیز ضروری است که در غلظت‌های بالای پروتئین، اعم از نمونه‌های حرارت داده شده و نشده، اگرچه با افزودن صمغ، انبوهش قطرات اتفاق افتاد اما به علت پوشش‌دهی کامل سطح آن‌ها که با توجه به فزونی غلظت WPC تشکیل غشای دو یا چند لایه هم‌چندان دور از انتظار نبود، درهم آمیختگی جز به صورت موضعی مشاهده نشد. بعد از فرایند حرارتی، تصاویر امولسیون‌های حاوی 0/3٪ بخش

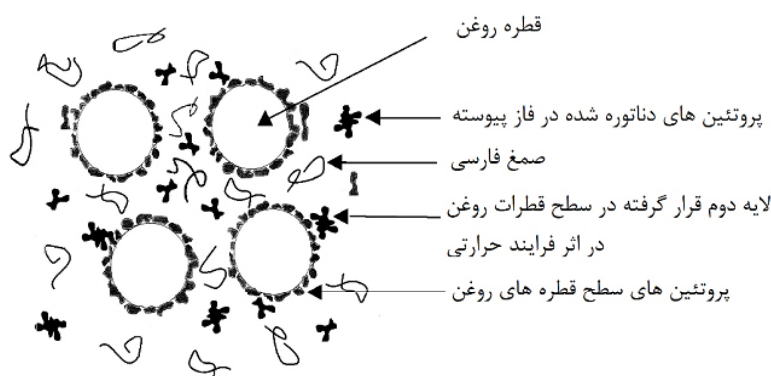
4- نتیجه‌گیری

شناخت برهم کنش بین پروتئین WPC و صمغ فارسی در تولید امولسیون و هم‌چنین طی فرایند حرارت دهی از اهمیت زیادی برخوردار است. یافته‌های این پژوهش نشان داد

محلول صمغ فارسی ریز ساختار یکنواخت‌تری را نسبت به سایر نمونه‌ها نشان دادند. به گونه‌ای که در هم آمیختن قطرات در تصاویر میکروسکوپی این نمونه‌ها کم‌تر وجود داشت. اعمال حرارت و دنا توره شدن پروتئین باعث ایجاد ذرات نامحلولی می‌شود که ضمن تغییر رفتار رئولوژیکی فاز پیوسته و کند کردن سرعت حرکت قطرات روغن باعث پایداری آن‌ها نیز می‌شود [48].



شکل (7) تصاویر میکروسکوپی امولسیون حاوی مقادیر مختلف پروتئین و بخش محلول صمغ فارسی بعد از تولید و بعد از فرایند حرارتی



شکل (8) طرح شماتیک بیوپلیمرها در فضای پیوسته و بین سطحی امولسیون حرارت دیده در $pH=7$

توزیع اندازه و قطر متوسط قطرات امولسیون در نسبت ثابت روغن به آب، وابسته به غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر و بخش محلول صمغ فارسی است. با افزایش غلظت پروتئین در امولسیون‌های فاقد صمغ، اندازه قطرات کاهش یافت. از طرف دیگر افزودن بخش محلول صمغ تا سطح 0/6 درصد سبب افزایش اندازه قطرات و پهن‌تر شدن گستره پراکندگی آن‌ها گردید. اعمال حرارت به سامانه امولسیونی بر انبوهش قطرات افزود و باعث بزرگ‌تر شدن اندازه آن‌ها گردید. علاوه بر این گرانروی کلیه نمونه‌ها نیز پس از حرارت دهی افزایش یافت و در امولسیون‌های حاوی غلظت‌های بالای بخش محلول صمغ و پروتئین آب پنیر رفتار شبه نیوتنی را به رقیق شونده با برش تغییر داد که نشان دهنده تجمع قطره‌ها و نیز ایجاد تجمعات پروتئینی دناتوره شده است. کم‌ترین اندازه قطرات امولسیون بعد از تیمار حرارتی به‌طور معنی‌داری در نمونه‌های حاوی

وزنی بخش محلول صمغ فارسی نسبت به سایر نمونه‌ها به‌دست آمد. بر اساس نتایج به‌دست آمده در این مطالعه، توزیع ملکول‌های WPC و صمغ فارسی در فاز بین سطحی و پیوسته امولسیون بعد از اعمال فرایند حرارتی به صورت شماتیک در شکل (8) به تصویر کشیده شده است. به نظر می‌رسد حضور بخش محلول صمغ فارسی و تجمعات حاصل از دناتوره شدن پروتئین آب پنیر طی فرایند حرارتی می‌توانند از طریق مشارکت در تشکیل لایه دوم بر سطح قطرات روغن و افزایش گرانروی در فاز پیوسته بر مقاومت حرارتی امولسیون تاثیرگذار باشند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری بخاطر تأمین بخشی از هزینه‌های مالی جهت انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

- [1] Jafari, S.M., Assadpoor, E., He, Y., Bhandari, B. (2008). Re-coalescence of emulsion droplets during high-energy emulsification. *Food Hydrocolloid.*, 22, 1191-1202.
- [2] McClements, D.J. (2005). *Food Emulsions: Principles, Practice and Techniques*. CRC Press, New York. pp 21-45.
- [3] Tadros, T.F. (2009). *Emulsion Science and Technology*. Vol. 1, Wiley-VCH, 1-56.
- [4] Garti, N. (1999). What can nature offer from an emulsifier point of view: trends and progress? *Colloids and Surf A*, 152, 125-146.
- [5] Lutz, R., Aserin, A., Wicker, L., Garti, N. (2009). Double emulsions stabilized by a charged complex of modified pectin and whey protein isolate. *Colloids Surf. B*, 72, 121-127.
- [6] Dickinson, E. (2003). Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed sys-

- Static headspace analysis of volatile compounds released from β -lactoglobulin-stabilized emulsions determined by the phase ratio variation method, *Food Res. Int.*, 44, 417-424.
- [16] Muschiolik, G. (2007). Multiple emulsions for food use. *Cocis.*, 12, 213-220.
- [17] Abbasi, S., Rahimi, S. (2014). Persian gum. In M. Mishra (Ed.), *Encyclopedia of Biomedical Polymers and Polymeric Biomaterials*. New York: Taylor and Francis Group LLC, 5919-5929.
- [18] Fadavi, G., Mohammadifar, M.A., Zargarran, A., Mortazavian, A.M., Komeili, R. (2014). Composition and physicochemical properties of Zedo gum exudates from *Amygdalus scoparia*. *Carbohydr Polym.*, 10, 1074-1080.
- [19] Golkar, A., Nasirpour, A., Keramat, J. (2014). B-lactoglobulin-Angum Gum (*Amygdalus Scoparia* Spach) Complexes: Preparation and Emulsion Stabilization. *J. Disper Sci. Technol.*, 36, 5, 685-694.
- [20] Jafari, S.M., Beheshti, P., Assadpour, E. (2012). Rheological behavior and stability of D-limonene emulsions made by a novel hydrocolloid (Angum gum) compared with Arabic gum. *J. Food Eng.*, 109, 1, 1-8.
- [21] Ghasempour, Z., Alizadeh, M., Bari, M.R. (2012). Optimisation of probiotic yoghurt production containing Zedo gum. *Int. J. Dairy Technol.*, 65, 1, 118-125.
- [22] میرمجیدی، ع.؛ عباسی، س.؛ حمیدی اصفهانی، ز.؛ عزیزی، م. (1395) تهیه مقاله پژوهشی برای چاپ در مجله علمی-پژوهشی. *مجله علوم و صنایع غذایی ایران*، جلد 13، شماره 12، ص 11-24.
- [23] Azarikia, F., Abbasi, S. (2016). Mechanism of soluble complex formation of milk proteins with native gums (tragacanth and Persian gum). *Food Hydrocolloid.*, 59, 35-44.
- [24] Koocheki, A., Kadkhodae, R., Mortazavi, S.A., Shahidi, F., Taherian, A.R. (2009). Influence of Alys-tems. *Food Hydrocolloid.*, 17, 25-39.
- [7] Khalloufi, S., Corredig, M., Goff, H.D., Alexander, M. (2008). Flaxseed gums and their adsorption on whey protein-stabilized oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloid.*, 23, 3, 611-618.
- [8] Wang, Y., Li, D., Wang, L., Adhikari, B. (2011). The effect of addition of flaxseed gum on the emulsion properties of soybean protein isolate (SPI). *J. Food Eng.*, 104, 56-62.
- [9] Ye, A., Hemar, Y., Singh, H. (2004). Enhancement of coalescence by xanthan addition to oil-in-water emulsions formed with extensively hydrolysed whey proteins. *Food Hydrocolloid.*, 18, 737-746.
- [10] Boutin, C.H., Giroux, H.J., Paquin, P., Britten, M. (2007). Characterization and acid-induced gelation of butter oil emulsions produced from heated whey protein dispersions, *Int. Dairy J.*, 17, 696-703.
- [11] Juliano, P., Kutter, A., Cheng, L.J., Swiergon, P., Mawson, R., Augustin, M.A. (2011). Enhanced creaming of milk fat globules in milk emulsions by the application of ultrasound and detection by means of optical methods, *Ultrasonics Sonochemistry*, 18, 963-973.
- [12] Truong, T., Bansal, N., Bhandari, B. (2014). Effect of Emulsion Droplet Size on Foaming Properties of Milk Fat Emulsions, *Food and Bioprocess Technology*, 7, 12, 3416-3428.
- [13] Segall, K.I., Goff, H.D. (1999). Influence of adsorbed milk protein type and surface concentration on the quiescent and shear stability of butter oil emulsions, *Int. Dairy J.*, 9, 683-691.
- [14] Akhtar, M., Murray, B.S., Dickinson, E. (2006). Perception of creaminess of model oil-in-water dairy emulsions: Influence of the shear-thinning nature of a viscosity-controlling hydrocolloid, *Food Hydrocolloid.*, 20, 6, 839-847.
- [15] Benjamin, O., Leus, M., Everett, D.W. (2011).

و نوآوری در علوم و صنایع غذایی، دوره ۱، شماره ۳، ص ۲۱۸-۱۹۹.

[34] Ye, A., Singh, H. (2006). Heat stability of oil-in-water emulsions formed with intact or hydrolysed whey proteins: influence of polysaccharides. *Food Hydrocolloid.*, 20, 269–276.

[35] Li, X., Fang, Y., Al-Assaf, S., Phillips, G.O., Yao, X., Zhang, Y., Zhao, M., Zhang, K., Jiang, F. (2012). Complexation of Bovine Serum Albumin and Sugar Beet Pectin: Structural Transitions and Phase Diagram. *Langmuir*, 28, 27, 10164–10176.

[36] Nor Hayati, I., Bin Che Man, Y., Ping Tan, C., Noraini, I. (2009). Droplet characterization and stability of soybean oil/palm kernel olein O/W emulsions with the presence of selected polysaccharides. *Food Hydrocolloid.*, 23, 2, 233-243.

[37] Klein, M., Aserin, A., Svitov, I., Garti, N. (2010). Enhanced stabilization of cloudy emulsions with gum Arabic and whey protein isolate. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 77, 75–81.

[38] Sun, C., Gunasekaran, S., Richards, M.P. (2007). Effect of xanthan gum on physicochemical properties of whey protein isolate stabilized oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloid.*, 21, 555–564.

[39] Euston, S.R., Finnigan, S.R., Hirst, R.L. (2000). Aggregation kinetics of heated whey protein-stabilized emulsions. *Food Hydrocolloid.*, 14, 155–161.

[40] Sliwinski, E.L., Roubos, P.J., Zoet, F.D., Van Boekel, M.A.J.S., Wouters, J.T.M. (2003). Effects of heat on physicochemical properties of whey protein-stabilized emulsions. *Colloids Surf. B*, 31, 231-242.

[41] Kim, H.J., Decker, E.A., McClements, D.J. (2002). Role of postadsorption conformation changes of α -lactoglobulin on its ability to stabilize oil droplets against flocculation during heating at neutral pH. *Langmuir*, 18, 7577–7583.

sum homolocarum seed gum on the stability and flow properties of O/W emulsion prepared by high intensity ultrasound. *Food Hydrocolloid.*, 23, 2416-2424.

[25] Koocheki, A., Kadkhodae, R. (2011). Effect of Alyssum homolocarum seed gum, Tween 80 and NaCl on droplets characteristics, flow properties and physical stability of ultrasonically prepared corn oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloid.*, 25, 1149-1157.

[26] Soleimanpour, M., Koocheki, A., Kadkhodae, R. (2013). Effect of Lepidium perfoliatum seed gum addition on whey protein concentrate stabilized emulsions stored at cold and ambient temperature, *Food Hydrocolloid.*, 30, 292-301.

[27] Maskan, M., Gogus, F. (2000). Effect of sugar on the rheological properties of sunflower oil-water emulsions. *J. Food Eng.*, 43, 173-177.

[28] بارنس، ه؛ عباسی، س. (1387) هندبوک رئولوژی مقدماتی، چاپ اول، نشر مرز دانش، ص 211.

[29] Mirhosseini, H., Tan, C.P., Hamid, N.S.A., Yousof, S. (2008). Effect of Arabic gum, xanthan gum and orange oil contents on zeta potential, conductivity, stability, size index and pH of orange beverage emulsion. *Colloids Surf. A*, 107, 1161-1172.

[30] Lizarraga, M.S., Pan, L.G., Anon, M.C., Santiago, L.G. (2008). Stability of concentrated emulsions measured by optical and rheological methods. Effect of processing conditions—I. Whey protein concentrate. *Food Hydrocolloid.*, 22, 868–878.

[31] Dybowska, B.E. (2011). Whey protein-stabilized emulsion properties in relation to thermal modification of the continuous phase. *J. Food Eng.*, 104, 81–88.

[32] Kuhn, K.R., Cunha, R.L. (2012). Flaxseed oil – Whey protein isolate emulsions: Effect of high-pressure homogenization. *J. Food Eng.* 111, 449–457.

[33] یوسفی، ف؛ عباسی، س؛ عزت پناه، ح. (1391) تهیه مقاله پژوهشی برای چاپ در مجله علمی-پژوهشی. پژوهش

- [42] Dybowska, B.E. (2011). Whey protein-stabilized emulsion properties in relation to thermal modification of the continuous phase. *J. Food Eng.*, 104, 81–88.
- [43] Koupantsis, T., Kiosseoglou, V. (2009). Whey protein–carboxymethylcellulose interaction in solution and in oil-in-water emulsion systems. Effect on emulsion stability. *Food Hydrocolloid.*, 23, 1156–1163.
- [44] Dickinson, E., Parkinson, E. (2004). Heat-induced aggregation of milk protein-stabilized emulsions: sensitivity to processing and composition. *Int. Dairy J.*, 14, 635–645.
- [45] Kika, K., Korlos, F., Kiosseoglou, V. (2007). Improvement, by dry-heating, of the emulsion-stabilizing properties of a whey protein concentrate obtained through carboxymethylcellulose complexation. *Food Chem.*, 104, 1153–1159.
- [46] Mantovani, R.A., Cavallieri, A.L. F., Cunha, R.L. (2016). Gelation of oil-in-water emulsions stabilized by whey protein. *J. Food Eng.*, 175, 108–116.
- [47] Ibanoglu, E. (2002). Rheological behaviour of whey protein stabilized emulsions in the presence of gum Arabic. *J. Food Eng.*, 52, 273–277.
- [48] Dickinson, E. (2008). Hydrocolloids as emulsifiers and emulsions. *Food Hydrocolloid.*, 23, 1473–1482.