

# بررسی تأثیر پارامترهای زمان هموژنیزاسیون و غلظت بر ویژگی‌های امولسیون‌کنندگی پروتئین آب پنیر تغلیظ شده

امین قهرمانی فر<sup>۱\*</sup>، علی محمدی ثانی<sup>۲</sup>، مسعود نجف نجفی<sup>۳</sup>، تکتّم محمدی مقدم<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد قوچان

<sup>۲</sup> استادیار گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد قوچان

<sup>۳</sup> عضو هیأت علمی مرکز آموزش عالی جهاد کشاورزی خراسان رضوی

<sup>۴</sup> دانش آموخته‌ی دکترای علوم و صنایع غذایی دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹ / ۶ / ۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹ / ۸ / ۱۲

## چکیده

در این تحقیق، خصوصیات امولسیون‌های تثبیت شده با غلظت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد (وزنی/وزنی) پروتئین آب پنیر تغلیظ شده و د-لیمون که در زمان‌های ۳، ۶ و ۹ دقیقه هموژن گردیدند، با یکدیگر مقایسه شد. ویژگی امولسیون‌ها شامل اندازه‌ی ذرات امولسیون، شاخص بس پاشیدگی ذرات و ویژگی‌های رئولوژیکی، مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج به دست آمده، اندازه‌ی ذرات امولسیون با افزایش غلظت امولسیون از ۱۰ تا ۲۰ درصد به طور معنی دار افزایش یافت، در حالی که با افزایش زمان هموژنیزاسیون از ۳ تا ۹ دقیقه اندازه‌ی ذرات امولسیون کاهش یافت. ویژگی‌های رئولوژیکی امولسیون‌ها از طریق برازش مدل هرشل بالکلی بر داده‌های تنش برشی در برابر سرعت برش، محاسبه گردید. نتایج، نشان داد امولسیون‌ها در کلیه‌ی غلظت‌ها و زمان‌های همگن‌سازی رفتار غلیظ شونده با برش دارند. افزایش غلظت پروتئین آب پنیر تغلیظ شده و زمان همگن‌سازی موجب افزایش ویسکوزیته‌ی امولسیون‌ها گردید.

**واژه‌های کلیدی:** امولسیون، پروتئین آب پنیر تغلیظ شده، شاخص بس پاشیدگی، ویژگی‌های رئولوژیکی.

## ۱- مقدمه

پیتیدهای تکه‌تکه شده می‌کنند؛ در نتیجه، این تغییرات باعث تغییر معنی‌ار در ویژگی‌های رئولوژیکی سیستم می‌گردد (۱۱، ۱۴، ۱۸، ۳۵). ویژگی‌های رئولوژیکی و ترموفیزیکی ترکیبات بر پایه پروتئین آب پنیر در محاسبه پارامترهای فرایند، دارای اهمیت می‌باشند. آگاهی از این ویژگی‌ها در پیشگویی پایداری محصول در طول نگه‌داری، بسیار مهم می‌باشد (۲۰). هدف از این تحقیق، بررسی اثر غلظت و زمان هموژنیزاسیون بر اندازه‌ی ذرات امولسیون، شاخص بس پاشیدگی و خصوصیات رئولوژیکی امولسیون‌های تثبیت شده با پروتئین آب پنیر تغلیظ شده بوده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- مواد شیمیایی

پودر آب پنیر تغلیظ شده، د-لیمونن و Tween 80 (سوربیتال منو-۹-اکتادکنونات) از شرکت سیگما-آلدریج آلمان خریداری و برای تهیه کلیه محلول‌ها از آب دیونیزه استفاده گردید.

## ۲-۲- روش‌ها

## ۲-۲-۱- تهیه سوسپانسیون‌های کلوئیدی

نسبت‌های وزنی مناسبی از پروتئین آب پنیر تغلیظ شده به آب دیونیزه اضافه شدند و سپس با استفاده از یک همزن مغناطیسی به مدت یک ساعت مخلوط گردیدند تا محلول‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد (وزنی/وزنی) تهیه شود. پس از آن، سوسپانسیون‌های کلوئیدی مذکور به مدت ۲۴ ساعت در یخچال نگه‌داری شدند تا آبدگیری به طور کامل انجام پذیرد.

## ۲-۲-۲- تهیه امولسیون

امولسیون روغن در آب حاوی ۵ درصد وزنی د-لیمونن در ۱۰۰ گرم پروتئین آب پنیر تغلیظ شده (WPC) و ۰/۱ درصد Tween 80 بدین صورت تهیه گردیدند که ابتدا تمامی اجزاء با استفاده از یک همزن مغناطیسی به مدت ۱۵ دقیقه مخلوط شدند. سپس، امولسیون اولیه با استفاده از همگن ساز التراتوراکس مدل T25 (شرکت IKA، ساخت آلمان) با سرعت ۲۴۰۰۰ دور در دقیقه و در زمان‌های ۳، ۶ و ۹ دقیقه در دمای اتاق هموژن گردید (۲۰).

امولسیون، عبارت است از دو مایع غیر قابل اختلاط (معمولاً آب در روغن) که یکی از مایعات به شکل قطرات کوچک در مایع دیگر پراکنده شده است (۳، ۶، ۲۲). امولسیون‌ها از لحاظ ترمودینامیکی، غیر پایدار می‌باشند. از این‌رو، معمولاً از پروتئین‌ها برای افزایش ثبات و پایداری امولسیون‌ها استفاده می‌شود (۸، ۹، ۳۶). با توجه به این که پروتئین‌ها مولکول‌های آمفی‌فیلیک<sup>۱</sup> می‌باشند بنابراین، به طور گسترده برای تولید امولسیون، بهبود پایداری امولسیون و ایجاد ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مطلوب در امولسیون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲۲، ۲۶، ۲۷). زمانی که ترکیبی از آب و روغن (امولسیون روغن در آب) به همراه مولکول‌های پروتئینی تحت فرایند همگن‌سازی قرار می‌گیرند مولکول‌های پروتئینی جذب قطرات تازه تشکیل شده حاصل از فرایند شده و با تشکیل یک لایه‌ی محافظ موجب کاهش تنش سطحی بین مولکول‌های آب و روغن می‌شوند و از به هم چسبیدن و تجمع قطرات جلوگیری می‌کنند (۱، ۵، ۷، ۲۲). پروتئین‌های آب پنیر به دلیل دارا بودن خواص عملکردی مناسب به صورت گسترده برای پایداری امولسیون‌هایی نظیر نوشیدنی‌ها، بستنی، دسرهای منجمد، فرمولاسیون غذای کودک و مکمل‌های ورزشی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲۵، ۳۱). مهم‌ترین خواص عملکردی پروتئین آب پنیر عبارتند از: قابلیت حل، ویسکوزیته، ظرفیت نگه‌داری آب، تشکیل ژل، تشکیل امولسیون و تشکیل کف (۴، ۱۲، ۱۳). خواص عملکردی محلول‌های پروتئینی تابع ترکیب، جرم مولکولی، اندازه، شکل، انعطاف‌پذیری، درجه‌ی هیدراسیون و واکنش بین ذرات می‌باشد که بسیاری از این عوامل به نوبه‌ی خود تحت تاثیر دما، pH، قدرت یونی و اعمال پیش‌فرایندهایی نظیر فشار بالا، التراسوند، تابش اشعه فرابنفش و فرایندهای مکانیکی می‌باشند (۴).

پروتئین‌های آب پنیر، ترکیباتی کروی شکل با توزیع نسبتاً یکنواخت از زنجیره قطبی (هیدروفوب) و غیر قطبی (خنثی) و اسیدهای آمینه باردار و بدون بار می‌باشند (۳۴). در طول فرایند هموژنیزاسیون گلبول‌های پروتئینی (WPC) بروش مکانیکی از هم گسسته می‌شوند و تولید مقادیر زیادی از پروتئین‌ها و

در این روابط  $\tau$ ، تنش برشی (Pa)،  $\dot{\gamma}$  سرعت برشی ( $S^{-1}$ )،  $n$  شاخص رفتار جریان (بدون بعد)،  $K$  ضریب قوام ( $mpa.s^n$ ) و  $\tau_0$  تنش تسلیم (Pa) است.

### ۳-۲- تجزیه آماری

برای تعیین پارامترهای رئولوژیکی از نرم‌افزار Slidewrite استفاده شد. برای انجام محاسبات از نرم‌افزار Excel استفاده گردید. به منظور تجزیه واریانس نتایج، نرم‌افزار Minitab مورد استفاده قرار گرفت. میانگین تکرارها توسط نرم‌افزار MSTATC در قالب آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح آماری ۰.۰۵٪ مورد مقایسه قرار گرفتند.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تأثیر غلظت ماده دیواره بر اندازه ذرات امولسیون و شاخص بس پاشیدگی

نتایج تجزیه واریانس تغییرات اندازه قطرات در پاسخ به فاکتورهای مورد بررسی نشان داد که تأثیر غلظت ادهی دیواره بر قطر متوسط قطرات کاملاً معنی‌دار می‌باشد ( $P < 0.05$ ) به طوری که با افزایش غلظت پروتئین آب پنیر تغلیظ شده در تمامی زمان‌های همگن‌سازی، اندازه ذرات امولسیون بزرگ‌تر گردید (جدول ۱). این افزایش در اندازه ذرات می‌تواند مربوط به تشدید برهم‌کنش بین پلیمرهای جذب شده در سطح مشترک آب-روغن با یکدیگر یا با مولکول‌هایی باشد که به طور آزادانه در فاز پیوسته پراکنده‌اند. تحت این شرایط احتمال انجام برهم‌کنش‌های قطره-قطره و تشکیل شبکه از طریق ایجاد پل عرضی<sup>۲</sup> یا تشکیل خوشه<sup>۳</sup> تشدید می‌شود. در نتیجه‌ی این فرایندها، رشد قابل ملاحظه‌ای در اندازه ذرات مشاهده می‌گردد (جدول ۱). نتایج حاصل با نتایج وانگ و همکاران (۲۰۱۰) مبنی بر این که با افزایش غلظت پروتئین تغلیظ شده از ۰/۵ به ۱/۲۵ درصد اندازه ذرات امولسیون به طور معنی‌دار افزایش یافته است، مطابقت دارد. در تحقیق دیگری که توسط سون و گناسکارا (۲۰۰۹) به منظور بررسی اثر غلظت پروتئین آب پنیر بر اندازه ذرات امولسیون صورت گرفت، مشخص شد که با افزایش غلظت پروتئین آب پنیر،

#### ۲-۳- اندازه گیری اندازه ذرات امولسیون و شاخص بس پاشیدگی

متوسط قطر و توزیع اندازه‌ی امولسیون به کمک دستگاه انگسار نور لیزر (مدل Nano-Zeta sizer، شرکت Malvern، ساخت انگلستان) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. قطر متوسط ذرات که با نماد  $d_{3,4}$  (قطر حجم به طول) نمایش داده می‌شود، با استفاده از معادله‌ی (۱) محاسبه گردید.

$$D_{43} = \frac{\sum z_i d_i^4}{\sum z_i d_i^3} \quad (1)$$

در معادله‌ی مذکور،  $z_i$  تعداد ذرات با قطر  $d_i$  می‌باشد. شاخص بس پاشیدگی با توجه به منحنی توزیع اندازه‌ی ذرات، توسط نرم افزار دستگاه محاسبه گردید. تمامی اندازه‌گیری‌ها در دمای اتاق ( $25^\circ C$ ) و ظرف مدت ۲ ساعت بعد از تهیه‌ی امولسیون و با ۲ تکرار انجام شد (۱۵).

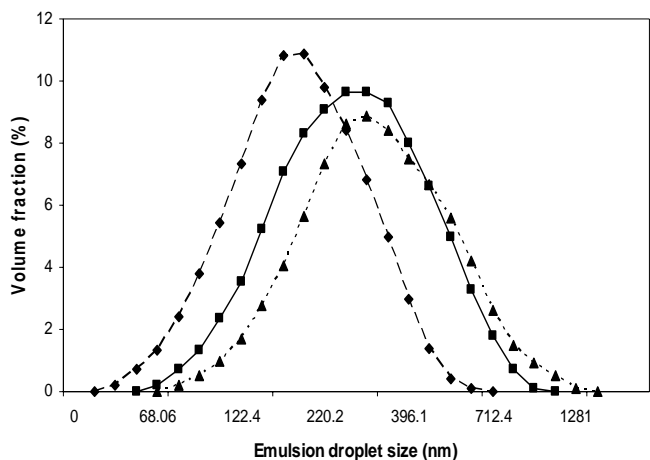
#### ۲-۲-۴- اندازه‌گیری ویسکوزیته‌ی ظاهری و رفتار جریان امولسیون

اندازه‌گیری ویسکوزیته‌ی ظاهری امولسیون‌ها بلافاصله پس از تهیه‌ی آن‌ها با استفاده از ویسکومتر چرخشی بوهلین (مدل ویسکو، ۸۸ ساخت بریتانیا) مجهز به یک سیرکولاتور حرارتی (جولابو، مدل F12-MC، ساخت آلمان) انجام گرفت. برای تمامی نمونه‌ها از هندسه نوع استوانه‌های هم‌مرکز<sup>۱</sup> و پروب C30 استفاده گردید. جهت اندازه‌گیری پارامترهای رئولوژیکی، ابتدا مقدار مناسبی از امولسیون در استوانه‌ی خارجی ریخته شده، سپس در محل مورد نظر و در تماس با استوانه‌ی داخلی قرار می‌گرفت. پس از رسیدن به دمای  $25^\circ C$  توسط سیرکولاتور، استوانه‌ی داخلی تحت یک دامنه مشخص و برنامه‌ریزی شده از سرعت برشی در مقیاس لگاریتمی که از ۱۴/۲ تا ۱۲۱۰ افزایش می‌یافت، قرار می‌گرفت. پارامترهای رئولوژیکی از طریق برآزش مدل قانون توان (رابطه‌ی ۲) و مدل هرشل بالکلی (رابطه‌ی ۳) بر داده‌های آزمون (تنش برشی-سرعت برش) محاسبه شد.

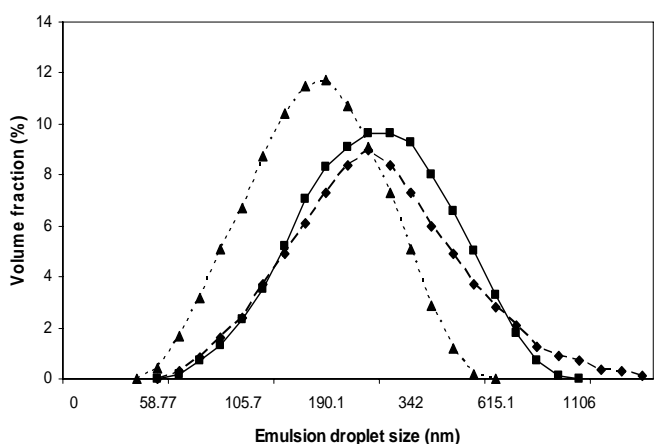
$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (2)$$

$$\tau = K\dot{\gamma}^n + \tau_0 \quad (3)$$

اندازه‌ی ذرات امولسیون بزرگ‌تر می‌گردد (۳۰). طاهریان و همکاران (۲۰۰۶) نیز گزارش کردند که با زیاد شدن غلظت فاز پیوسته در امولسیون روغن در آب، اندازه‌ی ذرات امولسیون افزایش می‌یابد (۳۲). نتایج گزارش شده در مورد شاخص بس پاشیدگی<sup>۱</sup> در جدول ۱ نشان می‌دهد که با افزایش غلظت پروتئین آب پنیر تغلیظ شده (در زمان هموژنیزاسیون مشابه)، شاخص بس پاشیدگی به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد ( $P < 0/05$ ). این امر احتمالاً به دلیل تأثیرات ناشی از فعل و انفعالات مربوط به برهم کنش پلیمر - پلیمر در اندازه‌ی ذرات می‌باشد. علاوه بر این، اثر نیروهای ویسکوز نیز در این خصوص قابل ملاحظه است. معمولاً با زیاد شدن ویسکوزیته‌ی فاز پیوسته، حداقل نیروی برشی لازم برای شکستن ذرات، افزایش می‌یابد. در این شرایط انرژی که در داخل پیش مخلوط امولسیونی پخش می‌شود، معمولاً به اندازه‌ای نیست که بتواند سبب از هم گسیختگی کامل قطرات گردد، در نتیجه، تعداد قطرات درشت‌تر و نیز دامنه‌ی توزیع اندازه آن‌ها افزایش می‌یابد. این یافته‌ها با نتایج گزارش شده توسط کوچکی و همکاران (۲۰۰۹)، بهرنند و شوپرت (۲۰۰۰) مطابقت دارد (۲، ۱۹). این پژوهشگران، دریافتند که افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته منجر به بزرگ شدن اندازه‌ی قطرات و تغییر شکل منحنی توزیع اندازه‌ی ذرات می‌گردد. شکل ۱ تأثیر غلظت فاز پیوسته بر منحنی توزیع اندازه‌ی ذرات امولسیون‌های تهیه شده با غلظت‌های مختلف پروتئین آب پنیر تغلیظ شده در زمان ۶ دقیقه را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت پروتئین آب پنیر تغلیظ شده، منحنی به سمت راست جابه‌جا می‌شود که نشان دهنده‌ی بزرگ‌تر شدن اندازه‌ی ذرات می‌باشد.



شکل ۱- تأثیر غلظت پروتئین آب پنیر تغلیظ شده (۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪) بر توزیع اندازه‌ی ذرات امولسیون همگن شده در زمان ۶ دقیقه.



شکل ۲- تأثیر زمان هموژنیزاسیون (۳، ۶، ۹ دقیقه) بر توزیع اندازه‌ی ذرات امولسیون با غلظت ۱۵٪ پروتئین آب پنیر تغلیظ شده.

جدول ۱- تأثیر غلظت پروتئین آب پنیر تغلیظ شده و زمان هموژنیزاسیون بر قطر متوسط قطرات و شاخص بس پاشیدگی امولسیون‌ها

غلظت (%)	زمان هموژنیزاسیون (دقیقه)	قطر ذرات (نانومتر)	شاخص بس پاشیدگی
۱۰	۳	$169/2 \pm 0/3$	$0/198 \pm 0/003$
	۶	$162/3 \pm 0/2$	$0/195 \pm 0/007$
	۹	$160/0 \pm 0/4$	$0/184 \pm 0/007$
۱۵	۳	$178/1 \pm 0/3$	$0/223 \pm 0/005$
	۶	$168/1 \pm 0/2$	$0/201 \pm 0/005$
	۹	$165/7 \pm 0/3$	$0/197 \pm 0/005$
۲۰	۳	$186/8 \pm 0/4$	$0/224 \pm 0/004$
	۶	$179/6 \pm 0/3$	$0/221 \pm 0/006$
	۹	$176/1 \pm 0/4$	$0/202 \pm 0/003$

جدول ۲- خصوصیات رئولوژیکی امولسیون‌های حاوی غلظت‌های مختلف پروتئین آب پنیر تغلیظ شده و زمان‌های همگن سازی مختلف (ویسکوزیته‌ی ظاهری در سرعت برش  $S=1$  ۱۲۱۰ محاسبه شده است).

غلظت (%)	زمان همگن سازی (دقیقه)	n	K (Pa.s <sup>n</sup> )	$\tau_0$ (Pa)	R <sup>2</sup>	ویسکوزیته ظاهری (Pa.s)
۱۰	۳	۱/۷۸	$0/00003$	$0/46$	$0/9991$	$0/009$
	۶	۱/۹۱	$0/00002$	$0/54$	$0/9974$	$0/010$
	۹	۱/۸۲	$0/00003$	$0/55$	$0/9984$	$0/012$
۱۵	۳	۱/۶۷	$0/00010$	$0/47$	$0/9985$	$0/012$
	۶	۱/۵۹	$0/00018$	$0/62$	$0/9970$	$0/014$
	۹	۱/۶۹	$0/00009$	$0/56$	$0/9989$	$0/016$
۲۰	۳	۱/۵۴	$0/00034$	$0/57$	$0/9967$	$0/016$
	۶	۱/۵۵	$0/00035$	$0/64$	$0/9969$	$0/018$
	۳	۱/۳۹	$0/00160$	$0/90$	$0/9959$	$0/026$

### ۲-۳- تأثیر زمان هموژنیزاسیون بر اندازه ذرات امولسیون و شاخص بس پاشیدگی

همان طور که در جدول ۱ ملاحظه می‌گردد، افزایش زمان هموژنیزاسیون اثر قابل ملاحظه‌ای بر اندازه ذرات امولسیون داشت. شکل ۲ تأثیر زمان هموژنیزاسیون بر منحنی توزیع اندازه ذرات امولسیون‌های تهیه شده با غلظت ۱۵ درصد پروتئین آب پنیر تغلیظ شده را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت پروتئین آب پنیر تغلیظ شده، منحنی به سمت راست جابه‌جا می‌شود که نشان دهنده بزرگ تر شدن اندازه ذرات می‌باشد. کوچک‌ترین اندازه ذرات در غلظت‌های مختلف پروتئین آب پنیر تغلیظ شده، مربوط به نمونه‌های تهیه شده در مدت هموژنیزاسیون ۹ دقیقه بود. به عنوان مثال، ذرات امولسیون حاوی ۱۰٪ پروتئین آب پنیر تغلیظ شده که به مدت ۳ دقیقه همگن شده بود؛ دارای اندازه متوسط ۱۶۹/۲ نانومتر بودند، در حالی که با افزایش زمان هموژنیزاسیون به ۹ دقیقه، این اندازه به ۱۶۰ نانومتر کاهش یافت. افزایش زمان هموژنیزاسیون باعث افزایش انرژی اعمال شده (توسط هموژنایزر) به امولسیون می‌شود. از طرفی چون مقادیر کافی از امولسیون کننده (پروتئین آب پنیر تغلیظ شده) در محیط امولسیون برای پوشش دادن سطح ذرات جدید حاصل از خرد شدن ذرات بزرگ تر امولسیون وجود دارد، بنابراین، افزایش زمان هموژنیزاسیون از ۳ به ۹ دقیقه باعث کوچک تر شدن اندازه ذرات می‌شود. نتایج مشابهی توسط تورنبرگ و هرمانسون (۱۹۷۷)، کاریستین و شوبرت (۱۹۹۵) و لینارز و همکاران (۲۰۰۱) نیز گزارش شده است (۱۷، ۲۱، ۳۳). این محققان، مشاهده کردند افزایش زمان هموژنیزاسیون باعث کاهش اندازه ذرات امولسیون شده و موجب بهبود ویژگی‌های رئولوژیکی امولسیون‌ها می‌گردد. آن‌ها عنوان کردند که اندازه ذرات امولسیون‌ها را می‌توان با افزایش انرژی اعمال شده در طول فرایند هموژنیزاسیون کاهش داد. در هموژنایزرهای با سرعت بسیار بالا<sup>۱</sup>، انرژی اعمال شده را به روش‌های مختلفی نظیر افزایش سرعت هموژنایزر یا زمان هموژنیزاسیون می‌توان افزایش داد (۲۲، ۲۳). رومرو و همکاران (۲۰۰۸) و مک کلمنتس (۲۰۰۴) گزارش کردند اندازه ذرات امولسیون با افزایش زمان

و شدت انرژی برشی اعمال شده توسط هموژنایزر در طول فرایند هموژنیزاسیون و در صورتی که امولسیون کننده به مقدار کافی وجود داشته باشد، کاهش می‌یابد (۲۴، ۲۵، ۲۹). یافته‌های جعفری و همکاران (۲۰۰۷ و ۲۰۰۸) نیز حاکی از آن است که افزایش انرژی اعمال شده در طول فرایند هموژنیزاسیون (میکروفلودیزاسیون)<sup>۲</sup> موجب کاهش قطر متوسط ذرات امولسیون‌ها می‌گردد (۱۵، ۱۶).

تأثیر زمان هموژنیزاسیون بر شاخص بس پاشیدگی امولسیون‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. همان گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، افزایش زمان هموژنیزاسیون در کلیه غلظت‌های پروتئین آب پنیر تغلیظ شده اثر معنی داری بر شاخص بس پاشیدگی نمونه‌ها داشت ( $P < 0.05$ )، به طوری که با افزایش زمان هموژنیزاسیون مقدار شاخص بس پاشیدگی نمونه‌ها کاهش یافت. در این بررسی، شاخص بس پاشیدگی ذرات امولسیون‌ها در دامنه‌ی ۰/۱۸۴ تا ۰/۲۶۱ قرار داشت. کوچک‌ترین شاخص بس پاشیدگی در غلظت‌های مختلف پروتئین آب پنیر تغلیظ شده مربوط به نمونه‌هایی بود که در زمان ۹ دقیقه هموژن گردیده بودند. بیش‌ترین شاخص بس پاشیدگی نیز مربوط به نمونه‌هایی با زمان هموژنیزاسیون ۳ دقیقه بود. کاهش شاخص بس پاشیدگی ذرات امولسیون با افزایش زمان هموژنیزاسیون به این دلیل است که افزایش زمان هموژنیزاسیون باعث کوچک شدن اندازه ذرات و افزایش ظرفیت اتصال آب به قسمت‌های هیدروفیل اسیدهای آمینه پروتئین‌های آب پنیر تغلیظ شده و موجب افزایش یکنواختی کل سیستم می‌شود (۲۸). از طرفی با توجه به این که شاخص بس پاشیدگی معیاری از میزان یکنواختی ذرات امولسیون می‌باشد، بنابراین، افزایش زمان هموژنیزاسیون از طریق کاهش اندازه ذرات امولسیون، باعث بهبود ویژگی‌های امولسیون (۱۰) و موجب کاهش شاخص بس پاشیدگی ذرات امولسیون می‌شود.

### ۲-۳- خصوصیات رئولوژیکی امولسیون

شکل ۳ نمودار سرعت برشی- تنش برشی را در غلظت‌های مختلف پروتئین آب پنیر تغلیظ شده و در زمان‌های

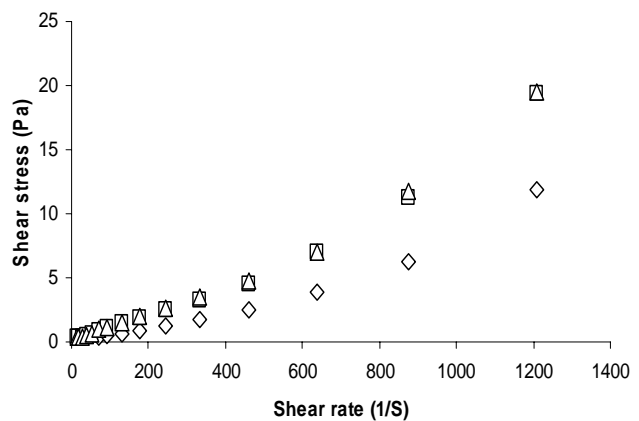
شاخص رفتار جریان و افزایش ضریب قوام و تنش تسلیم نمونه‌ها شده است. در واقع با افزایش ضریب قوام و سفت تر شدن نمونه‌ها، مقدار تنش تسلیم اولیه برای جریان یافتن نمونه‌ها افزایش پیدا کرد.

در رابطه با تأثیر زمان هموژنیزاسیون بر ویژگی‌های رئولوژیکی امولسیون، می‌توان گفت پروتئین‌های آب پنیر مولکول‌هایی کروی شکل با توزیع نسبتاً یکنواخت از زنجیره‌ی قطبی (هیدروفوب)، غیر قطبی (خشتی) و اسیدهای آمینه باردار یا بدون بار می‌باشند. در طول فرایند هموژنیزاسیون، گلبول‌های پروتئینی می‌شکنند و تولید مقادیر زیادی از پروتئین‌ها و پپتیدهای کوچک‌تر را می‌کنند. مهم‌ترین تغییرات ساختمان سوم پروتئین‌ها اتفاق می‌افتد. این قبیل تغییرات می‌تواند موجب تغییرات معنی‌دار در ویژگی‌های رئولوژیکی سیستم‌ها گردد (هرش و لیلانز، ۲۰۰۵). بررسی جدول ۲ نشان می‌دهد با افزایش زمان هموژنیزاسیون، روند مشخصی در تغییر ضریب قوام و شاخص رفتار جریان مشاهده نمی‌شود، اما افزایش زمان هموژنیزاسیون باعث افزایش مقدار تنش تسلیم شده است.

### ۳-۲-۲- تأثیر غلظت و زمان هموژنیزاسیون امولسیون بر ویسکوزیته‌ی ظاهری

ویسکوزیته‌ی ظاهری نمونه‌های امولسیون تثبیت شده با غلظت‌های مختلف پروتئین آب پنیر تغلیظ شده در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و سرعت برش ۱۲۱۰ در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد افزایش غلظت پروتئین آب پنیر تغلیظ شده موجب افزایش ویسکوزیته‌ی ظاهری امولسیون‌ها شده است. بیش‌ترین مقدار ویسکوزیته‌ی ظاهری مربوط به نمونه‌ی با غلظت ۲۰٪ و کم‌ترین مقدار ویسکوزیته نیز مربوط به نمونه‌ی با غلظت ۱۰٪ می‌باشد. در رابطه با افزایش ویسکوزیته‌ی امولسیون با افزایش غلظت پروتئین آب پنیر تغلیظ شده، می‌توان گفت افزایش غلظت پروتئین آب پنیر تغلیظ شده، موجب افزایش تعداد نقاط فعال یا به عبارت دیگر بخش هیدروفیل اسیدهای آمینه می‌شود. بنابراین، ظرفیت اتصال آب نیز افزایش می‌یابد که نتیجه‌ی این تغییرات، افزایش ویسکوزیته‌ی امولسیون می‌باشد.

هموژنیزاسیون مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود رابطه‌ی بین تنش برشی و سرعت برشی غیرخطی است که بیانگر غیرنیوتنی بودن رفتار امولسیون است. هم‌چنین ملاحظه می‌گردد با افزایش سرعت برشی، میزان تنش برشی افزایش پیدا می‌کند. لذا پیش‌بینی می‌شود که سیال مورد بحث دارای خواص سیالات دایلاتانت (سفت شونده با برش) باشد.



شکل ۳ - نمودار سرعت برشی - تنش برشی امولسیون‌ها در غلظت‌های مختلف پروتئین آب پنیر (۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪، ۲۵٪) و زمان هموژنیزاسیون ۶ دقیقه.

جهت بررسی رفتار رئولوژیکی امولسیون‌ها از مدل قانون توان و هرشل بالکلی استفاده شد. نتایج، نشان دادند مدل قانون توان فاقد کارایی لازم برای برازش داده‌ها است. مقادیر مربوط به ضریب قوام و شاخص رفتار جریان نمونه‌های امولسیون از برازش مدل هرشل بالکلی در جدول ۲ آورده شده است. ضریب قوام (K)<sup>۱</sup> و شاخص رفتار جریان (n)<sup>۲</sup> نمونه‌ها به ترتیب در محدوده‌ی  $0.0016 \text{ Pa.s}^n - 0.00003$  و  $1/91$  -  $1/39$  قرار داشت. ویسکوزیته‌ی ظاهری و تنش تسلیم نمونه‌ها هم به ترتیب در محدوده‌ی  $0.026 \text{ Pa.s} - 0.009$  و  $0.46 \text{ Pa} - 0.90$  قرار داشتند.

### ۳-۲-۱- تأثیر غلظت و زمان هموژنیزاسیون بر ویژگی‌های رئولوژیکی امولسیون

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود افزایش غلظت پروتئین آب پنیر تغلیظ شده در تمامی موارد باعث کاهش

ظاهری امولسیون‌ها افزایش یافت. بررسی خصوصیات رئولوژیکی امولسیون‌ها نیز نشان داد امولسیون‌ها رفتار غلیظ شونده با برش دارند.

#### ۵- منابع

- 1- Aken, G.A.V. 2004. Coalescence mechanisms in protein stabilized emulsions. In Food Emulsions, edited by Friberg, Larsson and Sjoblom, pp. 299–326. New York: Marcel Dekker.
- 2- Behrend, O., Ax, K. and Schubert, H.2000. Influence of continuous phase viscosity on emulsification by ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 7, 77–85.
- 3- Binks, B.P. 1998. Emulsion Type and the system Hydrophile-Lipophil Balance. in: Modern Aspects of Emulsion Science. Royal Society of chemistry, London, pp. 1-48.
- 4- Corradini, C. 1998. Functional properties of whey protein in food. *Scienza e Technica Lattiero Casearia*, 49, 204–213.
- 5- Dalgleish, D.G. 1997. Adsorption of protein and the stability of emulsions. *Trends Food Sci Technol*. 8:1–6.
- 6- Dalgleish, D.G. 2004. Food Emulsions: Their Structures and Properties. in: Food Emulsions. Marcel Dekker, New York, Chapter 1.
- 7- Dickinson, E. 1992. An Introduction to Food Colloids. Oxford: Oxford Science.
- 8- Dickinson, E. and Golding, M., 1997. Depletion flocculation of emulsions containing unadsorbed sodium caseinate. *Food Hydrocolloids*, 11: 13–18.
- 9- Dickinson, E. and Golding, M., 1997. Rheology of sodium caseinate stabilized oil-in-water emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 191: 166–176.
- 10- Franco, J. M., Raymundo, A., Sousa, I. and Gallegos, C. 1998. Influence of processing variables on the rheological and textural properties of lupin protein-stabilized emulsions. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 46, 3109–3115.
- 11- Herceg, Z., Hegeusic, V. and Rimac, S. 2000. Influence of hydrocolloid addition on the rheological properties of whey model solutions. *Acta Alimentaria*, 29: 89–103.
- 12- Herceg, Z. and Lelas, V. 2005. The influence of temperature and solid matter content on the viscosity of whey protein concentrates and skim milk powder before and after

هم‌چنین با افزایش زمان هموزنی‌اسیون از ۳ به ۹ دقیقه، ویسکوزیته‌ی امولسیون‌ها افزایش یافت. کم‌ترین مقدار ویسکوزیته مربوط به نمونه‌هایی بود که به مدت ۳ دقیقه هموزن گردیده بودند و بیش‌ترین مقدار ویسکوزیته نیز مربوط به امولسیون‌هایی بود که در زمان ۹ دقیقه هموزن شده بودند. افزایش ویسکوزیته‌ی امولسیون با افزایش زمان هموزنی‌اسیون به این دلیل است که اعمال فرایند هموزنی‌اسیون باعث تکه تکه شدن مولکول پروتئین شده و ظرفیت اتصال آب با مولکول‌های پروتئینی افزایش می‌یابد (۱۱، ۱۴). در بررسی مشابهی هرش و لیلانز (۲۰۰۵) گزارش کردند اعمال فرایند هموزنی‌اسیون، باعث افزایش ظرفیت اتصال آب به ذرات امولسیون‌های تثبیت شده با پروتئین آب پنیر تغلیظ شده-WPC 60 و پروتئین آب پنیر تغلیظ شده-WPC 80 شده و موجب افزایش معنی دار در ویسکوزیته‌ی امولسیون‌ها گردید. دلیل دیگر افزایش ویسکوزیته را می‌توان بر اساس قانون استوک<sup>۱</sup> بیان کرد. طبق قانون استوک، سرعت حرکت قطرات متناسب با مربع شعاع آن‌ها می‌باشد (رابطه‌ی ۳-۱) به عبارت دیگر، با کوچک تر شدن اندازه‌ی ذرات امولسیون، سرعت حرکت قطرات کاهش و ویسکوزیته‌ی امولسیون افزایش می‌یابد.

$$V_{Stokes} = -\frac{2gr^2(\rho_2 - \rho_1)}{9\eta_1} \quad (1-3)$$

در این رابطه  $r$  شعاع قطره،  $g$  شتاب گرانش،  $\rho_1$  دانسیته‌ی فاز پراکنده،  $\rho_2$  دانسیته‌ی فاز پیوسته و  $\eta$  ویسکوزیته‌ی برشی می‌باشد (۱).

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده، نشان داد غلظت و زمان هموزنی‌اسیون تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های امولسیون‌های تثبیت شده با پروتئین آب پنیر تغلیظ شده داشت. در این بررسی، افزایش غلظت پروتئین آب پنیر موجب افزایش اندازه‌ی ذرات و ویسکوزیته‌ی امولسیون‌ها گردید در حالی که شاخص بش پاشیدگی نمونه‌ها کاهش یافت. علاوه بر این، با افزایش زمان هموزنی‌اسیون اندازه‌ی ذرات و شاخص بس پاشیدگی امولسیون‌ها به طور معنی دار کاهش یافت، اما ویسکوزیته‌ی



- 24- McClements, D. J. 2004. Protein-stabilized emulsions. *Current Opinion in Colloid and Interfaces Science*, 9, 305–313.
- 25- McClements, D. J. 2004. Food emulsions: principles, practice and techniques. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- 26- Norde, W. 2003. Colloids and Interfaces in Life Sciences. New York: Marcel Dekker.
- 27- Onwulata, C.L. and Huth, P.J. 2008. Whey protein-stabilized emulsions in whey processing, functionality and health benefits. Wiley-Blackwell. USA. 400.
- 28- Phillips, G. O. and Williams, P. A. 1995. Interaction of hydrocolloids in food systems. In A. G. Gaonkar (Ed.), *Ingredient interactions* (pp. 131–169). New York: Marcel Dekker
- 29- Romero, A., Cordobes, F., Puppo, M.C., Guerrero, A. and Bengoechea, C. 2008. Rheology and droplet size distribution of emulsions stabilized by crayfish flour. *Food Hydrocolloids*, 22 :1033–1043.
- 30- Sun, C., Gunasekaran, S. 2009. Effects of protein concentration and oil-phase volume fraction on the stability and rheology of menhaden oil-in-water emulsions stabilized by whey protein isolate with xanthan gum. *Food Hydrocolloids*, 23 : 165–174.
- 31- Swaisgood, H. E. 1996. Characteristics of milk. In O. R. Fennema (Ed.), *Food chemistry* (3rd ed.) (pp. 841–878). New York: Marcel Dekker.
- 32- Taherian, A.R., Fustier, P. and Ramaswamy, H.S. 2005. Effect of added oil and modified starch on rheological properties, droplet size distribution, opacity and stability of beverage cloud emulsions. *Food Engineering*, 77 :687–696.
- 33- Tornberg, E. and Hermansson, A. M. 1977. Functional characterization of protein stabilised emulsions: effect of processing. *Journal of Food Science*, 42, 468–472.
- 34- Tratnik, L. 1998. Milk-technology, biochemistry and microbiology (pp. 345–380). Zagreb, Croatia: Croatian Milk Society.
- 35- Verheul, M. and Roefs, S. P. F. M. 1998. Structure of whey proteingels, studies by permeability, scanning electron microscopy and rheology. *Food Hydrocolloids*, 12, 17–24.
- 36- Wang, B., Li, D., Wang, L.W., Adhikari, B. and Shi, J. 2010. Ability of flaxseed and soybean protein concentrates to stabilize oil-in-water emulsions. *Food Engineering*, 100 :417–426.
- tribomechanical treatment. *Food Engineering*, 66 ,433–438.
- 13- Huffman, L. M. 1996. Processing whey protein for use as a food ingredient. *Food Technology*, 50: 49–52.
- 14- Ipsen, R., Otte, J., Dominguez, E. and Qvist, K. B. 2000. Gelation of whey protein induced by proteolysis or high pressure treatment. *Australian Journal of Dairy Technology*, 55: 49–52.
- 15- Jafari, S.M., Assadpoor, E. and Bhandari, B. 2007. Effectiveness of encapsulating biopolymers to produce sub-micron emulsions by high energy emulsification techniques. *Food Research International*, 40 :862–873.
- 16- Jafari, S.M., Assadpoor, E., He, Y. and Bhandari, B. 2008. Re-coalescence of emulsion droplets during high-energy emulsification. *Food Hydrocolloids*, 22 :1191–1202.
- 17- Karbstein, H. and Schubert, H. 1995. Developments in the continuous mechanical production of oil-in-water macro-emulsions. *Chemical Engineering and Processing*, 34(3), 205–211.
- 18- Kolakowski, P., Dumay, E. and Cheftel, J. C. 2001. Effects of high pressure and low temperature on beta-lactoglobulin unfolding and aggregation. *Food Hydrocolloids*, 15, 215–232.
- 19- Koocheki, A., Kadkhodae, R., Mortazavi, S.A., Shahidi, F. and Taherian, A.R. 2009. Influence of Alyssum homolocarpum seed gum on the stability and flow properties of O/W emulsion prepared by high intensity ultrasound. *Food Hydrocolloids*, 1–9.
- 20- Kresic, G., Lelas, V., Jambrak, A.N., Herceg, Z. and Brncic, S.R. 2008. Influence of novel food processing technologies on the rheological and thermophysical properties of whey proteins. *Food Engineering*, 87 ,64–73.
- 21- Linares, E., Larre, C. and Popineau, Y. 2001. Freeze- or spray-dried gluten hydrolysates. 2. Effect of emulsification process on droplet size and emulsion stability. *Food Engineering*, 48 :137–146.
- 22- McClements, J.M. 1999. General Characteristics of Food Emulsions. in: *Food Emulsions*. CRC Press, Florida, Chapter 1.
- 23- McClements, D. J. 1999. Appearance and flavor. *Food emulsions. Principles, practice, and techniques* (pp. 267–294). Boca Raton, FL: CRC Press.