

## ویژگی‌های رئولوژیکی و پایداری دوغ حاوی نعناع تولید شده با فناوری ژل سیال با استفاده از ترکیب پروتئین آب پنیر واسرشته-زانتان

لیلا باقری<sup>۱</sup> و اشکان مددلو<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۶/۲ تاریخ پذیرش: ۹۲/۸/۱۵

<sup>۱</sup> استادیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سروستان

<sup>۲</sup> استادیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی دانشگاه تهران

\*مسئول مکاتبه: Email: Leilabagheri@ut.ac.ir

### چکیده

مشکل اصلی دوغ هنگام نگهداری دوفاز شدن آن به علت پایین بودن pH و توده‌ای شدن انواع کازئین‌ها است. تهیهی دوغی که دچار جدایش سرم نشده و از سوی دیگر ذرات سبزی افزوده شده به آن را بتواند برای مدتی قابل ملاحظه به صورت معلق نگه دارد مورد توجه محققین و صنایع می‌باشد. به منظور پایدارسازی نمونه‌های دوغ حاوی نعناع، زانتان به عنوان عامل تشکیل دهندهی ژل سیال در ترکیب با پروتئین آب‌پنیر واسرشته‌شده و یا پکتین و صمغ لوبیای خرنوب استفاده شد. نتایج بررسی رفتار جریان‌ی نشان داد که زانتان در نمونه‌های دوغ باعث بروز تنش تسلیم شد که ویژگی خاص ژل‌های سیال است. مقدار تنش تسلیم با روش برون‌یابی نمودارهای جریان با استفاده از مدل هرشل-بالکلی محاسبه شد و پایداری ذرات نعناع در دوغ با استفاده از موازنه‌ی نیروهای وارده بر ذرات پیش‌بینی شد. پروتئین آب پنیر، صمغ لوبیای خرنوب و پکتین در ترکیب با زانتان موجب افزایش ویسکوزیته، اندازه‌ی ذره و همچنین باعث کاهش حجم سرم جدا شده گردیدند. ترکیب سه‌جزئی پروتئین آب‌پنیر واسرشته‌شده- پکتین- زانتان به طور کامل مانع رسوب ذرات نعناع در نمونه‌های دوغ نگهداری شده به مدت ۴۰ روز شد.

واژه‌های کلیدی: پروتئین آب پنیر، دوغ، رئولوژی، زانتان، ژل سیال، معلق سازی

## مقدمه

هیدروکلوئیدها در بسیاری از مواد غذایی به منظور بهبود ویژگی‌های فیزیکی محصول مانند گرانروی، احساس دهانی، پایداری و جلوگیری از دو فاز شدن به کار می‌روند (نورتون و فوستر ۲۰۰۲؛ لورنت و بولنگر ۲۰۰۳؛ کراوچنکو و همکاران ۱۹۹۵). بسیاری از هیدروکلوئیدها مانند آگار، پکتین، کاپاکارگینان، ژلاتین و ژلان چنانچه حین ژلاسیون تحت تأثیر یک نیروی برشی مناسب قرار گیرند، ژل سیال<sup>۱</sup> تشکیل می‌دهند (موریس و همکاران ۲۰۱۲). نورتون و همکاران (۱۹۹۹) خواص مولکولی ژل‌های سیال تولید شده از آگار و آگاروز را بررسی کرده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ویسکوزیته‌ی نسبی محلول هیدروکلوئیدها به علت تجمع مارپیچ‌های دوگانه‌ی مولکول‌های آگار و آگاروز افزایش می‌یابد. اعمال تنش برشی در این حین، منجر به ایجاد ذرات ریز زیادی به عنوان هسته<sup>۲</sup> ژل و تولید ژل سیال می‌شود.

ژل سیال یا به بیان دقیق‌تر مایع ساختار دهی شده<sup>۳</sup> عبارت است از محلول هیدروکلوئیدی حاوی ذرات ریز ژل که در تنش‌های برشی پایین، رفتاری شبیه ژل نشان می‌دهد در حالی‌که در تنش‌های برشی بالا، همانند سیالات عمل می‌کند. بسیاری از این محلول‌های هیدروکلوئیدی با افزایش یا کاهش دادن دما به صورت برگشت‌پذیر از سول به ژل تغییر حالت می‌دهند که این تغییرات به ماهیت پیوندهای مولکولی غیرکوالانسی از جمله پیوندهای هیدروژنی یا هیدروفوب بستگی دارد (نشینری و همکاران ۲۰۰۰). ژل سیال، یک ژل واقعی نبوده بلکه سیال یا ماده‌ی شبه خمیری است که علاوه بر داشتن بافتی نرم و روان (همانند مایعات)، دارای تنش تسلیم (همانند جامدات الاستیک) می‌باشد. به بیان بهتر، یک مایع ساختاردار یا همان ژل سیال تا حدی از تنش را تحمل کرده، متناسب با تنش اعمال شده کرنش

نشان می‌دهد و در صورت برطرف شدن تنش اعمال شده، همانند مواد الاستیک (کشسان)، خود را بازیابی می‌کند ولی در صورتی که تنش اعمال شده فراتر از حدی بحرانی باشد که اصطلاحاً تنش تسلیم گفته می‌شود به جای آنکه همانند مواد کشسان دچار شکستگی و یا گسیختگی شود همانند مایعات جاری و روان خواهد شد. خواص ژل سیال در درجه‌ی اول به نوع بیوپلیمر انتخاب شده و غلظت آن، آهنگ برشی به-کار رفته حین سردکردن و سرعت سرد کردن بستگی دارد (نورتون و همکاران ۱۹۹۹).

سورن (۲۰۰۰) روش‌هایی بر پایه‌ی حرارت دهی و نیز با حضور کاتیون‌ها برای تولید ژل سیال با استفاده از ژلان معرفی نمود. بخش مشترک در کلیه‌ی فرآیندهای ذکر شده هیدراته کردن هیدروکلوئید در آب می‌باشد. روش اول شامل حرارت دادن محلول ژلان تا دمای ۷۰ تا ۹۵ °C و سپس خنک کردن تدریجی آن همراه همزنی و یا خنک کردن تا زیر دمای بستن ژل و سپس همزدن آن می‌باشد. روش دوم در مقاله حاضر استفاده شده است در این روش ابتدا محلول حرارت داده شده و سپس بی‌آنکه خنک شود به آب یا محلول سرد دیگری اضافه می‌شود. این امر باعث سرد شدن محلول ژلان و در نتیجه تولید ژل سیال می‌شود. روش دیگری نیز وجود دارد که در آن، صمغ در آب سرد حل شده و با افزودن یون‌ها و همزنی، ژل سیال تهیه می‌شود. افزودن کاتیون‌ها باعث ژلاسیون محلول ژلان می‌گردد که با اعمال همزنی ژل سیال تولید خواهد شد. مارتینز و همکاران (۲۰۰۴) ترکیبی از ژلان-زانتان با یک غلظت ثابت را برای تهیه‌ی ژل سیال به کار بردند. فریث و همکاران (۲۰۰۲) برای تولید ژل سیال از اعمال تنش برشی حین خنک کردن محلول حاوی صمغ آگار استفاده نمودند.

دوغ و در کل نوشیدنی‌های ماست را می‌توان دسته‌ای از ماست‌های همزده با ویسکوزیته‌ی پایین محسوب کرد (تمیم و رابینسون ۱۹۹۹). از جمله مشکلات عمده‌ی

1 - Fluid gel

2 - Nuclei

3 - Structured liquid

به شکل آمیدی یافت می‌شود (سویی ۲۰۰۵). این صمغ به دلیل درهم کنش الکتروستاتیک و از طریق ممانعت فضایی، از تمایل ذرات پروتئینی برای اتصال به هم جلوگیری کرده و موجب پایداری سامانه می‌شود (تونپیر و همکاران ۲۰۰۲). صمغ لوبیای خرنوب از ترکیبات گالاکتومانان است و از آنجا که این صمغ در دسته‌ی صمغ‌های غیرجاذب قرار دارد، با افزایش گرانی‌ی فاز پیوسته مانع دو فاز شدن می‌شود (سربی و همکاران ۱۹۹۸).

همراه شدن دوغ با گیاهان خشک معطر خوراکی مانند نعنای علاوه بر طعم طبیعی که در محصول ایجاد می‌کند، از دید خواص تغذیه‌ای و مقبولیت محصول نیز مورد توجه است. امروزه در صنعت از اسانس سبزی‌هایی مانند نعنای و پونه در دوغ استفاده می‌شود. یکی از راه‌های استفاده از این گیاهان، افزودن آنها به صورت خشک است که در حال حاضر شکل صنعتی ندارد. در صورت استفاده صنعتی از این مواد طعم زایلین هدف از لحاظ کیفیت ظاهری محصول، معلق ماندن آنها است. ژل‌های سیال محیط بسیار مناسبی برای ایجاد بافت و جلوگیری از ته‌نشینی یا صعود ذرات در نوشیدنی‌های دارای پالپ میوه، کاکائو، فیبر، ویتامین و مواد معدنی نامحلول به حساب می‌آیند (میچن و همکاران ۲۰۰۴). کیانی و همکاران (۲۰۱۰) از ژلان به منظور پایدارسازی گیاهان خشک معطر خوراکی مانند نعنای و پونه در دوغ استفاده کرده‌اند. ونگ و همکاران (۲۰۱۲) از پروتئین آب پنیر برای افزایش قوام و کاهش آب اندازی در ماست استفاده نمودند. این هیدروکلئید با منشاء حیوانی، از نظر اقتصادی بسیار مقرون به صرفه بوده و نیز قابل دسترس است. تاکنون اثر پروتئین آب پنیر بر جلوگیری از دوفاز شدن دوغ بررسی نگردیده است. از طرف دیگر زانتان به علت توانایی تشکیل ژل سیال دارای توانایی بالقوه برای

دوغ طی نگهداری، دو فاز شدن آن است. ذرات کلئیدی دوغ ذراتی درشت بوده و در صورت ساکن ماندن دوغ، بر اساس قانون استوک-انیشتین ته‌نشین شده و باعث تشکیل رسوب در دوغ می‌شوند. عامل دیگر در ایجاد رسوب، گرایش ذرات پروتئینی به هم می‌باشد که ممکن است بر اثر عوامل مختلف مثل نیروهای واندروالس، هیدروفوب و دیگر عوامل رخ دهد. این امر سبب می‌شود ذرات به هم نزدیک شده و تجمع یابند و به اصطلاح فلوکوله شوند. در نهایت، تجمع ذرات به تشکیل رسوب کمک می‌نماید. افزایش دادن ویسکوزیته‌ی دوغ به کمک عوامل بهبوددهنده‌ی رئولوژی مانند هیدروکلئیدها، ایجاد بار منفی با استفاده از پوشش دادن ذرات کلئیدی دوغ با عوامل باردار مانند پکتین، بهبود شرایط فرآیند و استفاده از عوامل بهبوددهنده‌ی جذب آب برای ایجاد گرایش به آب در ذرات پروتئینی دوغ، از جمله روش‌های ممکن برای جلوگیری از رسوب در دوغ هستند (کوکسوی و کلک ۲۰۰۴، سدپیر و همکاران ۲۰۰۴ و لورنت و بولنگر ۲۰۰۳). اغلب برای برطرف نمودن این نقص کیفی (ناپایداری و دوفاز شدن) از بهبود دهنده‌های رئولوژی مانند پکتین، گوار، صمغ لوبیای خرنوب و ژلاتین در فاز پیوسته دوغ استفاده شده است (کیانی و همکاران ۲۰۰۸؛ کوکسوی و کلک ۲۰۰۴). آذری کیا و عباسی (۲۰۱۰) اثر پکتین، صمغ لوبیای خرنوب و کتیرا را بر جلوگیری از دوفاز شدن دوغ بررسی نمودند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که بخش محلول کتیرا ( تراگاکانتین) توانست با جذب شدن در سطح کازئین‌ها به واسطه‌ی سازوکارهای ممانعت فضایی و الکترواستاتیک موجب پایداری محصول شود.

پکتین یک هتروپلی‌ساکارید متشکل از گروه‌های گالاکتورونیک اسید است که گروه کربوکسیل گالاکتورونیک اسید به صورت اسید آزاد، استر متیل، یا

تولید تا رسیدن به pH مطلوب (۴-۴/۲) در دمای °C ۴۲ گرم‌خانه‌گذاری گردیدند. ماست با استفاده از یک سوم آب مورد استفاده برای تولید دوغ با ماده‌ی جامد ۵ درصد وزنی در حین همزنی رقیق شد. از ۵/۰ درصد وزنی نمک طعام (درجه خلوص ۹۹/۵ درصد) استفاده شد.

#### تهیه‌ی محلول هیدروکلوئیدی

در این تحقیق ۴ تیمار به شرح زیر تهیه شد:

در تیمارهای ۱ و ۲ به ترتیب ترکیب پکتین-زانتان (۰/۲۵، ۰/۱۵ درصد وزنی) و صمغ لوبیای خرنوب-زانتان (۰/۲۵، ۰/۱۵ درصد وزنی)، در دو سوم آب مورد نیاز برای تهیه‌ی دوغ حل شد. در تیمارهای ۳ و ۴ به ترتیب ترکیب پروتئین آب‌پنیر-زانتان (۰/۲۵، ۰/۱۵ درصد وزنی) و پروتئین آب‌پنیر-پکتین-زانتان (۰/۲۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ درصد وزنی) در یک سوم آب مورد نیاز برای تهیه دوغ حل شدند. سپس در دمای °C ۸۰ به مدت ۲۰ دقیقه در حمام آب داغ مجهز به همزن هیدراته شدند.

#### تهیه‌ی محلول پروتئین آب‌پنیر واسرشته شده<sup>۴</sup>

ایزوله‌ی پروتئین آب‌پنیر در یک سوم آب مورد نیاز برای تهیه دو نمونه‌ی دوغ حل و مدت یک شب در دمای ۴ درجه‌ی سلسیوس آبدار شد. سپس محلول پروتئین آب‌پنیر در دمای °C ۸۵ به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب داغ مجهز به همزن حرارت داده شد (ونگ و همکاران ۲۰۱۲) و سپس نیمی از آن به مابقی محلول هیدروکلوئیدی تیمار سوم و نیمی دیگر به مابقی محلول هیدروکلوئیدی تیمار چهارم افزوده شد.

#### افزودن هیدروکلوئیدها به دوغ و تولید ژل سیال

جهت تولید ژل سیال، ۴ محلول داغ و هیدراته شده‌ی هیدروکلوئیدی بطور جداگانه و به آرامی همراه با همزنی ملایم، به ۴ نمونه محلول نیمه رقیق شده‌ی دوغ افزوده شدند. همزنی تا زیر دمای بستن هیدروکلوئید و تا رسیدن به دمای اتاق ادامه داده شد. مجموعه‌ی ژل

معلق نگه‌داشتن (سورن ۲۰۰۰) گیاهان خشک معطر خوراکی مانند نعناع در دوغ است. بنابراین هدف از این تحقیق تهیه‌ی ژل سیال بر پایه‌ی دوغ با استفاده از ترکیب پروتئین آب‌پنیر واسرشته-زانتان، پکتین-زانتان، صمغ لوبیای خرنوب-زانتان و پروتئین آب-پنیر واسرشته-پکتین-زانتان بود که از یکسو دوفاز شدن در آن برطرف شده و از سوی دیگر امکان استفاده از ذرات نعناع به صورت پراکنده و معلق در دوغ را فراهم آورد.

#### مواد و روش‌ها

##### مواد

برای تولید دوغ از ماست پاستوریزه‌ی بدون چربی (تولید شده در پایلوت لبنیات گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه تهران)، استفاده شد. هیدروکلوئیدهای مورد استفاده در این پژوهش ایزوله‌ی پروتئین آب‌پنیراز شرکت آرلا، کشور دانمارک، زانتان، پکتین با درجه متوکسیل بالا، و صمغ لوبیای خرنوب از شرکت سپی کلکو<sup>۵</sup> کشور دانمارک، نعناع از شرکت سبزان و سایر مواد شیمیایی مورد استفاده از شرکت مرک<sup>۶</sup> آلمان خریداری شدند.

##### تهیه نعناع معطر

نعناع با استفاده از آسیاب آزمایشگاهی (مدل PXL، شرکت پالمن ساخت کشور آمریکا) آسیاب شده و از الک با مش ۶، ۱۰ و ۱۸ عبور داده شد تا ذراتی یکسان و یکنواخت حاصل شود. در این بررسی پودر نعناع در ۳ اندازه ۲ تا ۳، ۱ تا ۲ و ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر استفاده شد. ابتدا نعناع با آب جوش به مدت ۳۰ دقیقه آنزیم‌بری شده و به دوغ اضافه شد.

##### روش تهیه دوغ

ماده‌ی جامد ماست بر اساس استاندارد ملی ایران شماره ۲۴۵۳ محاسبه گردید. نمونه‌های ماست در حین

<sup>۴</sup> CP Kelco

<sup>۵</sup> Merck

<sup>۶</sup> - Denatured

آزمون روبش زمان در فرکانس ثابت (۱ هرتز) برای ۳۰۰ ثانیه با کرنش<sup>۱۱</sup> ۱٪ و در دمای ۱۰ درجه سلسیوس انجام شد (آذری کیا و عباسی ۲۰۱۰).

#### اندازه‌گیری میزان دوفاز شدن دوغ

نمونه‌های دوغ به درون فالکون ۵۰ میلی‌لیتری منتقل شدند و پس از ۴۰ روز نگهداری در دمای ۵ درجه‌ی سلسیوس مقدار جدایش فازها بر حسب درصد حجمی کل نمونه اندازه‌گیری شد (کوکسوی و کلک ۲۰۰۴).

#### اندازه‌گیری چگالی نمونه‌های دوغ

چگالی نمونه‌های مختلف دوغ با استفاده از پیکنومتر در دمای ۲۰ درجه‌ی سلسیوس محاسبه گردید (استاندارد ملی شماره ۲۴۵۳). بررسی‌های آماری نشان داد که بین چگالی تیمارهای مختلف اختلاف معنی‌داری ایجاد نشده است. بنابراین میانگین کل چگالی‌ها به عنوان چگالی دوغ در نظر گرفته شد.

#### تعیین چگالی و ابعاد نعنای

سبزی معطر تا رسیدن به چگالی ثابت در آب نگهداری شدند. لازم به ذکر است که چگالی سبزی ابتدا کم بوده ولی پس از افزودن به دوغ و یا نگهداری در آب چگالی آنها افزایش یافته و ته‌نشین می‌شوند. جهت تعیین چگالی، وزن سبزی اضافه شده به آب به ازای افزایش حجم به مقدار مشخص با استفاده از ترازوی دیجیتال (مدل ALS220-4N، شرکت کرن، ساخت کشور آلمان) با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم بدست آمد. با تعیین نسبت حجم به وزن، چگالی سبزی‌ها تخمین زده شد. جهت حصول اطمینان چندین تکرار انجام گردید (کیانی و همکاران ۲۰۱۰).

#### آزمون معلق شدن نعنای

به منظور بررسی کارایی ژل سیال تولید شده در معلق نگه‌داشتن ذرات نعنای، نمونه‌های نهایی دوغ به درون

سپس با استفاده از دستگاه هموژنایزر (APV ساخت دانمارک) در فشار ۱۵۰ بار هموژن شد. در نهایت تا انجام آزمون‌ها، نمونه‌ها در یخچال نگهداری شدند. شرایط آزمایش برای کل تیمارها کاملاً یکسان در نظر گرفته شد. غلظت‌ها به گونه‌ای تنظیم گردید که ماده‌ی جامد نهایی در تمام نمونه‌ها ۵ درصد وزنی باشد (کیانی و همکاران ۲۰۰۸).

#### روش‌های آزمایش

##### اندازه‌گیری توزیع اندازه‌ی ذرات

با استفاده از روش پراکنش نور استاتیک، توزیع و قطر متوسط ذرات کلوئیدی در تیمارهای مختلف توسط دستگاه مسترسایزر<sup>۷</sup> ساخت شرکت مالورن<sup>۸</sup> انگلستان 2000S تعیین گردید. اندازه‌گیری بر اساس اصل فرانهورفر، پس از گذشت حداقل ۲۴ ساعت از زمان تولید نمونه‌ها انجام شد تا حالتی پایدار در نمونه‌ها حاصل شده باشد. جهت اطمینان بیشتر، پس از خارج شدن از یخچال دمای نمونه‌ها به دمای اتاق رسانده شد (کیانی و همکاران ۲۰۱۰).

##### اندازه‌گیری ویژگی‌های رئولوژیکی

جهت انجام آزمون‌های رئولوژیکی (ویسکومتری و نوسانی) از دستگاه رئومتر مدل بوهلین جِمنی<sup>۹</sup> Drive II از شرکت مالورن ساخت کشور انگلستان با ژئومتری استوانه‌ی هم مرکز<sup>۱۰</sup> در دمای ۱۰ درجه‌ی سلسیوس استفاده به عمل آمد. برای اندازه‌گیری تنش برشی و گرانشی به صورت تابعی از سرعت برشی در یک فاصله زمانی ۱۰ دقیقه، سرعت برشی از ۰/۱ بر ثانیه تا ۱۰۰۰ بر ثانیه افزایش یافت. تنش برشی و گرانشی در هر ۶ ثانیه یکبار اندازه‌گیری شد.

<sup>7</sup> Mastersizer

<sup>8</sup> Malvern

<sup>9</sup> Bohlin Gemini

<sup>10</sup> Concentric cylinder geometry

<sup>11</sup> strain

سیال. در مطالعه‌ی حاضر، ذرات نعناع در دوغ مورد بحث قرار می‌گیرند. نیروها عبارتند از:

۱- نیروی وزن ذره: که با چگالی ذره، حجم ذره و شتاب جاذبه رابطه دارد.

$$F^g = \rho_p V_g \quad (1)$$

۲- نیروی شناوری: که با چگالی سیال، حجم ذره و شتاب جاذبه رابطه دارد.

$$F^b = \rho_m V_g \quad (2)$$

۳- نیروی مربوط به تنش تسلیم: نیروی مربوط به تنش تسلیم با میزان تنش تسلیم و سطح ذره در یک جهت مرتبط است. یعنی فشاری که به یکی طرف ذره مسطح وارد می‌شود این نیرو را ایجاد می‌نماید. این نیرو برای یکی از نمونه‌های دوغ که حاوی ۰/۱۵ درصد زانتان و ۰/۲۵ درصد پروتئین آب پنیر بود محاسبه می‌شود.

$$F^{\sigma_0} = \sigma_0 A \quad (3)$$

### تجزیه و تحلیل آماری

برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SPSS (نسخه‌ی ۱۶) استفاده شد و برای بررسی معنی‌دار بودن اثر تیمارها، میانگین‌ها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن و جدول ANOVA در سطح ۵٪ مقایسه شدند. تمامی تیمارها در سه تکرار انجام شد و نتایج بصورت میانگین  $\pm$  انحراف معیار برای این سه تکرار گزارش می‌شوند.

### نتایج و بحث

#### اثر بر ویژگی‌های رئولوژیکی دوغ

#### خواص جریان

نمودار جریان و ویسکوزیته برای ترکیب‌های هیدروکلوئیدی مختلف بکار برده شده، در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین روابط مربوط به آهنگ برش و تنش برشی با مدل‌های نیوتنی، قانون توان، بینگهام و هرشل-بالکی برازش داده شد. با توجه به میزان برازش داده‌های رئولوژیکی، از میان ۴ مدل ریاضی

فالكون ۵۰ میلی‌لیتری منتقل شده و ذرات نعناع به میزان ۲ درصد وزنی به دوغ اضافه شد. میزان معلق‌نگه‌داشتن ذرات نعناع در تیمارها در طی ۴۰ روز نگهداری مشاهده و با نتایج محاسبات پایداری ارائه شده در بخش مربوط به معادلات پایداری مقایسه شد (کیانی و همکاران ۲۰۱۰).

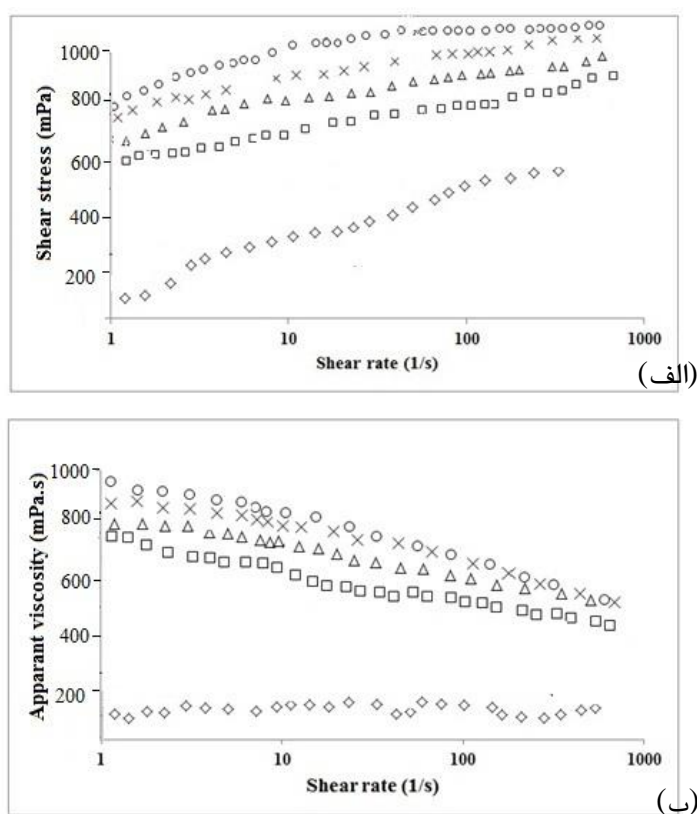
#### بررسی معادلات پایداری ذرات فاز جامد

مطابق با روش ارائه شده توسط کیانی و همکاران (۲۰۱۰) فرض بر این است که یک صفحه دارای شکل هندسی کروی، درون یک سیال قرار گرفته است و هدف، محاسبه برآیند نیروها و پیش بینی سکون و یا حرکت ذره می‌باشد. به یک ذره‌ی شناور در یک سیال چهار نیرو اعمال می‌شود که عبارتند از نیروی وزن ذره، نیروی ارشمیدس، نیروی هیدرودینامیکی و نیروی بین مولکولی. نیروی هیدرودینامیکی در مورد ذرات یا سیال در حال حرکت صادق بوده و با گرانش و سرعت نسبی بین ذره و سیال مرتبط است، بنابراین در حالت ایستا که در بحث معلق سازی مطرح است اهمیت کمتری می‌یابد. به جای آن نیروی حاصل از تنش تسلیم مطرح است که در واقع مشابه و معادل آن بوده اما در حالت ایستا می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. تنش تسلیم نیرویی است که لازم است تا شبکه یا بافت موجود در محصول را از هم گسیخته و ایجاد حرکت نماید. برآیند نیروی وزن و ارشمیدس در لحظه‌ی صفر یعنی زمانی که ذره ثابت است مقداری مثبت و یا منفی است که به ترتیب باعث شروع صعود و یا ته نشین شدن ذره می‌شود که البته با شروع حرکت، نیروی هیدرودینامیکی هم وارد خواهد شد. تنش تسلیم از شروع این حرکت جلوگیری کرده و در واقع نیروی حاصل از آن باید از برآیند این دو بیشتر باشد. از نیروی بین مولکولی نیز صرف نظر می‌شود چون ذرات، درشت و خنثی می‌باشند. بنابراین سه نیروی اصلی باید محاسبه شوند که عبارتند از نیروی وزن ذره، نیروی ارشمیدس و نیروی متناسب با تنش تسلیم

زانتان، رفتار پلاستیکی بارزی را از خود نشان دادند چرا که تحت تنش برشی از میزان گرانروی آنها به طور فرایندهای کاسته شد (شکل ۱). تشکیل ژل سیال توسط زانتان، عامل اصلی رخدھی تنش تسلیم و دلیل بالا بودن گرانروی در تنش برشی پایین است (سورن، ۲۰۰۰). همانطور که در بخش معلق سازی و معادلات پایداری بحث می‌شود توانایی زانتان در ایجاد تنش تسلیم است که موجب معلق نگه‌داشتن و پایداری دیسپرسیون جامد در مایع (نعناع در دوغ) می‌شود. نتایج (شکل ۱) نشان داد که حضور هیدروکلوئیدهای مختلف در دوغ گرانروی آن را افزایش داده است. نمونه‌ی دوغ حاوی پروتئین آب پنیر-پکتین-زانتان بیشترین گرانروی را نشان داد. شایان توجه است که هنگام تهیه‌ی محلول پروتئین آب پنیر، پروتئین آب پنیر حرارت داده شد. حرارت دادن موجب ایجاد توده‌های محلول با وزن مولکولی بالا شده، این ذرات درشت پروتئینی در افزایش گرانروی دوغ مشارکت کردند (اوورد و مکئود، ۲۰۰۵).

ارزیابی شده جهت پیش بینی ویژگی‌های رئولوژیکی نمونه‌های دوغ، مناسب‌ترین مدل برای نمونه‌ی شاهد مدل نیوتنی و برای نمونه‌های حاوی پکتین-زانتان، صمغ لویبای خرنوب-زانتان، پروتئین آب پنیر-زانتان و پروتئین آب پنیر-پکتین-زانتان، مدل هرشل-بالکلی شناخته شد. میزان گرانروی و پارامترهای مربوط به قانون هرشل-بالکلی برای نمونه‌های دوغ در جدول ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود زانتان باعث تغییر رفتار جریانی تمام نمونه‌های دوغ شد و رفتار آنها را به سمت رفتار غیر نیوتنی رقیق شونده با برش سوق داد. در نرخ‌های برش پایین، گرانروی ظاهری بالاتر بود و با افزایش نرخ برش، گرانروی به شدت کاهش یافت. در مقایسه با نمونه‌ی شاهد، نمونه دوغ حاوی پروتئین آب پنیر-پکتین-زانتان بیشترین گرانروی و تنش تسلیم را نشان داد در حالیکه کمترین گرانروی و تنش تسلیم در نمونه‌ی دوغ حاوی صمغ لویبای خرنوب-زانتان مشاهده شد. افزودن هیدروکلوئیدها به نمونه‌های دوغ در مقایسه با نمونه شاهد، باعث کاهش اندیس جریان دوغ و افزایش اندیس قوام آن گردید. نمونه دوغ حاوی پروتئین آب پنیر-پکتین-زانتان، کمترین اندیس جریان و بیشترین اندیس قوام را نشان داد (جدول ۱).

زانتان یک هیدروکلوئید خنثی است و پروتئین‌های شیر نیز که در دوغ در زیر pH ایزوالکتریک خود قرار دارند دارای بار مثبت می‌باشند. بنابراین مولکول‌های زانتان در دوغ بصورت غیرجاذب و با تشکیل شبکه‌ی سه-بعدی و به دام افتادن ذرات کلوئیدی در شبکه پلیمری عمل می‌کند (سورن، ۲۰۰۰). نمونه‌های دوغ حاوی



شکل ۱- اثر ترکیب‌های هیدروکلوئیدی بر الف) نمودار جریان دوغ در  $10^{\circ}\text{C}$  و ب) نمودار گرانیوی [۵: شاهد، □: صمغ لوبیای خرنوب-زانتان، Δ: پکتین-زانتان، ×: پروتئین آب‌پنیر-زانتان، ○: پروتئین آب‌پنیر-پکتین-زانتان، ]

جدول ۱- پارامترهای محاسبه شده مربوط به مدل هرشل-بالکی برای نمونه های دوغ حاوی هیدروکلوئیدهای مختلف

شماره نمونه	فرمولاسیون دوغ (نوع صمغ)	ضریب قوام (K) ( $\text{mPa}\cdot\text{s}^n$ )	شاخص توان (n)	تنش تسلیم (mPa)
۱	شاهد	۰/۰۱۵	۰/۷۸	۱۱۷
۲	پکتین-زانتان	۰/۱۹۱	۰/۴۶	۷۶۳
۳	صمغ لوبیای خرنوب-زانتان	۰/۱۷۹	۰/۵۱	۶۰۳
۴	پروتئین آب پنیر-زانتان	۰/۲۵۶	۰/۴۱	۷۸۳
۵	پروتئین آب پنیر-پکتین-زانتان	۰/۳۰۲	۰/۳۶	۸۰۲

$G'$  و مدول افت ( $G''$ ) به عنوان تابعی از زمان برای نمونه‌های دوغ حاوی پکتین-زانتان، صمغ لوبیای خرنوب-زانتان، پروتئین آب‌پنیر-زانتان و پروتئین آب‌پنیر-پکتین-زانتان بررسی شد. در تمام نمونه‌های دوغ، به علت تشکیل شبکه‌ی سه بعدی و ساختار ژل سیال توسط زانتان مقدار مدول ذخیره بیشتر از مدول افت بود (شکل ۲). همانطور که قبلاً ذکر شد ژل سیال

تأثیر افزودن هیدروکلوئیدها بر ویژگی‌های ویسکوالاستیک دوغ  
آزمون‌های نوسانی یکی از روش‌های متداولی است که برای بررسی ویژگی‌های ژل‌های سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد (راس-مورفی ۱۹۹۵). این روش برای شناسایی ترکیب شیمیایی و ساختار فیزیکی مواد غذایی بسیار سودمند است. بنابراین، تغییرات مدول ذخیره



را به ترتیب به میزان ۷۵، ۸۰ و ۸۸ درصد کاهش دادند و ترکیب پروتئین آب پنیر-پکتین-زانتان بطور کامل مانع دوفاز شدن دوغ گردید (شکل ۴).

دو فاز شدن نمونه‌های دوغ به گونه‌ای است که دو قسمت مجزا شامل یک فاز رویی شفاف و یک فاز زیرین کدر مشاهده می‌شود. در واقع در این نمونه‌ها رسوبی تشکیل نمی‌شود و ته‌نشینی رخ نمی‌دهد ولی مقداری از سرم دوغ به صورت شفاف از بخش کدر که فاز اصلی دوغ است جدا می‌شود (شکل ۵). علت عدم ایجاد فاز ته‌نشین شده وجود شبکه سه بعدی است که توسط زانتان تشکیل می‌شود. ذرات کلوئیدی دوغ در این شبکه به دام افتاده و ته‌نشینی نمی‌شوند. پکتین نیز بواسطه‌ی برهمکنش‌های الکتروستاتیک و اثر ممانعت فضایی بر روی ذرات کلوئیدی شیر جذب شده و از تجمع آنها جلوگیری می‌کند (لوسی و همکاران ۱۹۹۹) و هیدروکلوئیدهای خنثی و غیرجاذب صمغ لوبیای خرنوب از طرق تشکیل شبکه، محصور سازی میسل‌های کازئین و افزایش گرانشی فاز پیوسته‌ی دوغ عمل می‌کنند (سربی و همکاران ۱۹۹۸). پروتئین آب پنیر واسرشته بواسطه‌ی برهمکنش‌های هیدروفوبیک با میسل‌های کازئین شیر و تشکیل کمپلکس کازئین-پروتئین آب پنیر مانع جداسازی سرم می‌گردد.

وَنگ و همکارانش (۲۰۱۲) نیز در تحقیقی بر میزان آب اندازی ماست، مشاهده کردند که پروتئین آب پنیر واسرشته میزان آب اندازی ماست را به طور معنی‌داری کاهش داد.

محلولی است حاوی شبکه‌ای از ذرات ریز ژلی (ژل ذره ای)<sup>۱۲</sup> که در تنش‌های برشی پایین، ساختار بهم پیوسته‌ی<sup>۱۳</sup> آن از بین نمی‌رود. بنابراین رفتاری شبیه به ژل نشان می‌دهد و مدول ذخیره‌ی آن بیشتر از مدول افت است. گارک و نورتون (۲۰۱۲) رفتار مشابه برای مطلق زانتان در حضور نمک گزارش نموده‌اند. در تمام نمونه‌های دوغ مقادیر مدول ذخیره با گذشت زمان تغییرات نوسانی نشان داد (شکل ۲). نوسان در مقدار مدول ذخیره ممکن است به علت از بین رفتن و بازسازی مجدد برهمکنش‌های درون‌مولکولی و بین-مولکولی بین کمپلکس هیدروکلوئیدها-میسل‌های کازئین و زنجیره‌های جانبی آن در طول مدت زمان آزمون باشد.

#### توزیع اندازه‌ی ذرات

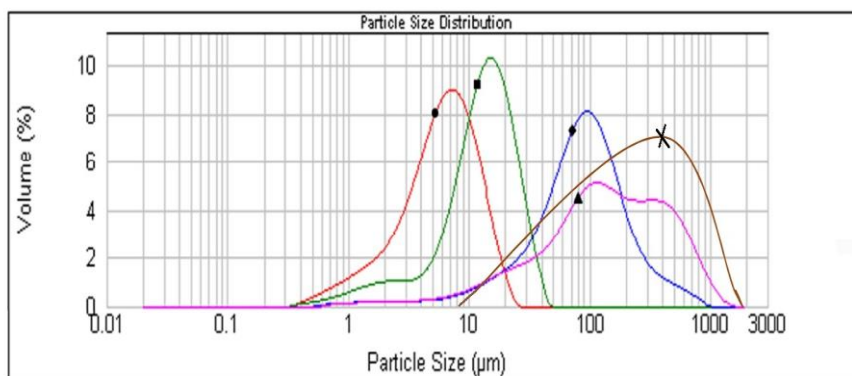
در شکل ۳ توزیع اندازه‌ی ذرات بر حسب درصد حجمی ذرات با قطرهای مختلف نشان داده شده است. زانتان در ترکیب با هیدروکلوئیدهای دیگر و پروتئین آب پنیر، به طور معنی‌داری باعث افزایش اندازه‌ی ذرات کلوئیدی شده است و نمونه‌ی دوغ حاوی پروتئین آب پنیر-پکتین-زانتان، بیشترین افزایش در اندازه‌ی را نشان داد. به نظر می‌رسد که پروتئین‌های شیر و هیدروکلوئیدهای بکار رفته با هم درهمکنش کرده و دامنه وسیع‌تری از اندازه ذرات را ایجاد نموده‌اند (کیانی و همکاران ۲۰۱۰). افزودن پروتئین آب پنیر به صورت مخلوط با زانتان باعث وسیع‌تر شدن گستره‌ی اندازه‌ی ذرات و افزایش اندازه‌ی آنها شده است. پکتین با ترکیب پروتئین آب پنیر-زانتان اثر هم‌افزایی نشان داد (شکل ۳)

#### دوفاز شدن

نتایج مربوط به دوفاز شدن نمونه‌های دوغ در شکل ۴ و ۵ قابل مشاهده است. صمغ لوبیای خرنوب-زانتان، پکتین-زانتان و پروتئین آب پنیر-زانتان دوفاز شدن دوغ

<sup>12</sup> Particle gels

<sup>13</sup> Continuous



شکل ۳- منحنی توزیع اندازه ذرات نمونه‌های دوغ ● شاهد، ■ حاوی صمغ لوبیای خرنوب-زانتان، ◆ حاوی پکتین-زانتان، ▲ حاوی پروتئین آب‌پنیر-زانتان، × حاوی پروتئین آب‌پنیر-پکتین-زانتان

### معلق‌سازی

به عنوان مثال برای یکی از نمونه‌های دوغ که حاوی ۰/۱۵ درصد زانتان و ۰/۲۵ درصد پروتئین آب‌پنیر بود می‌توان نوشت:

$\rho_m = 1017.7 \text{ kg m}^{-3}$  and  $\sigma_0 = 0.783 \text{ Pa}$   
 برای ذرات نعنای، ضخامت  $4 \times 10^{-4}$ ، شعاع  $10^{-3}$   
 ۱/۵ متر، چگالی ۱۰۵۱/۳ کیلوگرم بر مترمکعب، حجم  $10^{-12}$   
 $10 \times 3/0.28$  مترمکعب و مساحت  $10^{-9} \times 7/0.65$  متر  
 مربع است.

پس مطابق با معادلات ۱-۳ می‌توان نوشت:

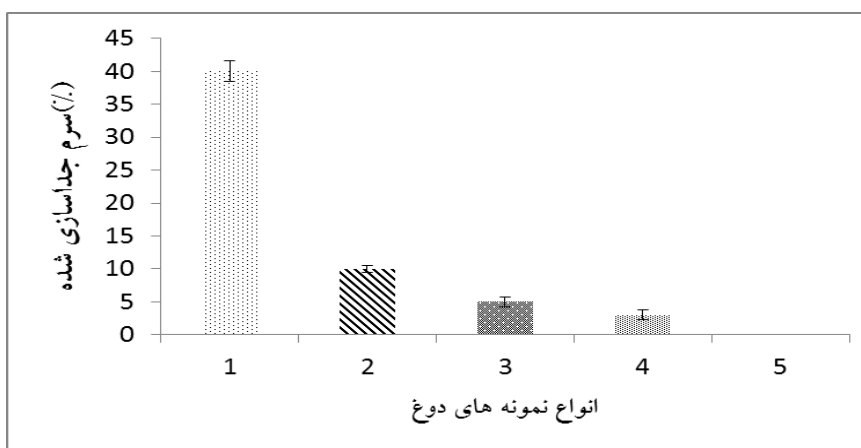
$$F^g = \rho_p V_p g = 3.13 \times 10^{-8} \text{ N}$$

$$F^b = \rho_m V_m g = 3.03 \times 10^{-8} \text{ N}$$

$$F^{\sigma_0} = 5.53 \times 10^{-9} \text{ N}$$

همانطور که در شکل ۵ نشان داده می‌شود در نمونه‌ی شاهد، ذرات کلوئیدی شیر رسوب نمودند. در این نمونه‌ها ذرات نعنای نیز همراه با ذرات کلوئیدی شیر رسوب کرده و ته‌نشین شدند. در تمام نمونه‌های دوغ حاوی زانتان، ته‌نشینی رخ نداد و ذرات نعنای به علت تشکیل شبکه سه‌بعدی و ایجاد نیرویی به نام تنش تسلیم توسط زانتان (سورن، ۲۰۰۰) به صورت معلق باقی ماندند. وجود تنش تسلیم از نتایج مربوط به رفتار جریان قابل استنتاج است.

معادلات مربوط به پایداری



شکل ۴- میزان سرم جداسازی شده در نمونه‌های دوغ پس از ۴۰ روز نگهداری

۱: شاهد، ۲: حاوی صمغ لوبیای خرنوب-زانتان، ۳: حاوی پکتین-زانتان، ۴: حاوی پروتئین آب‌پنیر-زانتان، ۵: حاوی پروتئین آب‌پنیر-پکتین-زانتان

شد. پکتین مولکولی آنیونی است و با ذرات دارای شارژ مثبت دوغ برهنش می‌دهد و با اتصال ذرات به یکدیگر، موجب تجمع آنها و ایجاد ذرات درشت‌تری می‌شود. هیدروکلوئیدهای خنثی مانند زانتان و صمغ لوبیای خرنوب از طرق تشکیل شبکه، افزایش گرانروی فاز پیوسته و به دام افتادن میسل‌های کازئین عمل می‌نمایند. پروتئین آب پنیر با ایجاد برهنش‌های هیدروفوبیک با میسل‌های کازئین موجب تشکیل کمپلکس کازئین-پروتئین آب پنیر شده و از این طریق مانع جداسازی سرم می‌گردد.

در نمونه‌های حاوی تمام هیدروکلوئیدها گرانروی و اندازه‌ی ذرات افزایش یافت در حالی‌که میزان جداسازی سرم و دوفاز شدن کاهش یافت. زانتان باعث ایجاد تنش تسلیم در نوشیدنی شده و از ته‌نشینی ذرات معلق در حالت ایستا جلوگیری نمود. ایجاد تنش تسلیم به علت وجود شبکه سه بعدی بازگشت پذیر است. از آنجایی‌که این شبکه به راحتی با اعمال تنش برشی از بین می‌رود امکان استفاده از این خاصیت در نوشیدنی‌ها وجود دارد. ذرات نعنای به عنوان مثالی از ذرات جامد به دوغ افزوده شدند. این ذرات به علت وجود تنش تسلیم و ایجاد ژل سیال، با وجود داشتن چگالی بیشتر از دوغ، به صورت معلق باقی ماندند.

همانطور که اشاره شد در حالت ایستا نیروهای وزن و شناوری به ذره وارد شده و تمایل به ایجاد حرکت در ذره را دارند. بنابراین برآیند این دو نیرو باید محاسبه شود:

$$F^{\sigma_0} \geq |F^g - F^b| \geq (3.13 \times 10^{-8}) - (3.03 \times 10^{-8}) \geq 10^{-9} N$$

بنابراین نیرویی معدل  $10^{-9}$  نیوتن به ذرات نعنای وارد می‌شود. این نیرو باعث ته‌نشین شدن این ذرات خواهد شد زیرا نیروی وزن مقدار بیشتری داشته است. چنانچه نیروی حاصل از تنش تسلیم برابر یا بیشتر از این مقدار باشد ذره معلق خواهد شد. با توجه به اینکه نیروی مربوط به تنش تسلیم در نمونه‌ی مورد محاسبه، بیشتر از این نیرو است، انتظار می‌رود ذرات نعنای در این نمونه‌ی دوغ به صورت معلق باقی بمانند. نتایج آزمایش معلق‌سازی این نمونه محاسبات را تایید می‌کند.

### نتیجه‌گیری

پروتئین آب پنیر، زانتان، صمغ لوبیای خرنوب و پکتین برای تولید دوغ پایدار حاوی ذرات نعنای معلق به کار گرفته شدند. رفتار رئولوژیکی نمونه‌های دوغ حاوی این هیدروکلوئیدها به سمت رفتار غیر نیوتنی سوق داده

### منابع مورد استفاده

موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران. ۱۳۷۰. دوغ: ویژگی‌ها و روش‌های آزمون. استاندارد شماره ۲۴۵۳.

Azarikia F, and Abbasi S, 2010. On the stabilization mechanism of Doogh (Iranian yoghurt drink) by gum tragacanth. Food Hydrocolloid, 24: 358–363.

Cui SW. 2005. Food carbohydrates: chemistry, physical properties, and applications. CRC Press LLC.

Everett D W, and McLeod R E, 2005. Interactions of polysaccharide stabilizers with casein aggregates in stirred skim-milk yoghurt. Int Dairy J, 15: 1175–1183.

Frith W J, Garijo X, Foster T J and Norton I T, 2002. Microstructural origins of the 439 rheology of fluid gels. Gums and Stabilisers for the Food Industry, 11: 95–103.

Garrec D A and Norton I T, 2012. Understanding fluid gel formation and properties Journal of Food Engineering, 12: 175–182.

- Kiani H, Mousavi, M A E, Emam-Djomeh Z and Yarmand M S, 2008. Effect of gellan gum on the stability and physical properties of acidified milk protein solutions, *Australian Journal of Dairy Technology*, 63: 94–99.
- Kiani H, Mousavi M E and Mousavi Z E, 2010. Particle Stability in Dilute Fermented Dairy Drinks: Formation of Fluid Gel and Impact on Rheological properties, *Food Sci Technol Int*, 16: 543–551.
- Koksoy A, and Kilic M, 2004. Use of hydrocolloids in textural stabilization of a yoghurt drink, ayran. *Food Hydrocolloid*, 18: 593–600.
- Kravnchenko T P and Parker A. Trespoey A, 1995. Colloidal stability and sedimentation of pectin-stabilized acid milk drinks. In: E. Dickinson, D. Lorient (Eds.), *Food macromolecules and colloids*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, pp 349–355.
- Laurent M A, and Boulenger P, 2003. Stabilization mechanism of acid dairy drinks (ADD) induced by pectin. *Food Hydrocolloid*, 17: 445–454.
- Lucey J A, Tamehana M, Singh H and Munro P A, 1999. Stability of model acid milk beverage: effect of pectin concentration, storage temperature and milk heat treatment. *J Text Studies*, 30(3): 305–318.
- Martinez P, Lopez L P, Araiza F and Tecante A, 2004. Steady and oscillatory shear behavior of fluid gels formed by binary mixtures of xanthan and gellan. *Food Hydrocolloid*, 18: 471–481.
- Michon C, Chapui C, Langendorff V, Boulenger P and Cuvelier G, 2004. Strain hardening properties of physical weak gels of biopolymers. *Food Hydrocolloid*, 18: 999–1005.
- Morris E R, Nishinari K and Rinaudo M, 2012. Gelation of gellan—A review. *Food Hydrocolloids* 28: 373–411.
- Nishinari K, Zhang H, and Ikeda S, 2000. Hydrocolloid gels of polysaccharides and proteins. *Current Opinion in Colloid and Interface Science* 5: 195–201.
- Norton I T, and Foster T J, 2002. Hydrocolloids in real food systems. *Gums and Stabilizers for the Food Industry*, 11: 187–200.
- Norton I T, Jarvis D A and Foster T J, 1999. A molecular model for the formation and properties of fluid gels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 26: 255–261.
- Ross-Murphy S B, 1995. Structure–property relationships in food biopolymer gels and 511 solutions. *Journal of Rheology*, 39: 1451–1464.
- Sedlmeyer F, Brack M, Rademacher B and Kulozik U, 2004. Effect of protein composition and homogenisation on the stability of acidified milk drinks. *International Dairy Journal*, 14: 331–336.
- Sworn, G. 2000. Gellan gum. In G.O. Phillips, P.A. Williams (Eds.), *Handbook of Hydrocolloids*. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd.
- Syrbe A, Bauer WJ, and Klostermeyer H, 1998. Polymer science concepts in dairy system—An overview of milk protein and food hydrocolloid interaction. *International Dairy Journal*, 8: 179–193.
- Tamime A Y, and Robinson R K, 1999. *Yoghurt Science and Technology*. Woodhead Publishing Ltd.
- Tuinier R, Rolin C, and de Kruif CG. 2002. Electrosorption of pectin onto casein micelles. *Biomacromolecules*, 3: 632–638.
- Wang W, Bao Y, Hendricks G M and Guo M, 2012. Consistency, microstructure and probiotic survivability of goats' milk yoghurt using polymerized whey protein as a co-thickening agent. *International Dairy Journal*, 24:113–119.

## Rheological properties and Stability of mint-enriched doogh produced by the fluid gel technology using denatured whey protein-xanthan

L Bagheri<sup>1\*</sup> and A Madadlou<sup>2</sup>

Received: August 24, 2013 Accepted: November 06, 2013

<sup>1</sup>Associate Professor, Department of Food Science, Azad University, Sarvestan Branch, Sarvestan, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Food Science and Technology, University of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

\*Corresponding author: Email: Leilabagheri@ut.ac.ir

### Abstract

Phase separation is the main problem encountered in doogh during storage due to its low pH and aggregation of caseins. It is of interest for researchers and industry to prepare a doogh that does not undergo serum separation and suspends the infused herb particles within for a long period of time. Xanthan as the fluid gel-forming agent was used in combination with denatured whey protein, pectin and locust bean gum to stabilize mint-containing doogh samples. Flow behavior studies revealed that xanthan provided a yield stress to the drink demonstrating the typical behavior of fluid gels. Yield stress was calculated by extrapolation of the flow curves using Herschel-Bulkley model. Mint stability was predicted by considering the overall balance of forces acting on the particles. Denatured whey protein, locust bean gum and pectin in the mixture of xanthan gum, increased viscosity and particle size and reduced serum separation. Mint particles sedimentation was totally suppressed by a combination of xanthan, denatured whey protein and pectin during storage of doogh for 40 days.

**Keywords:** Doogh, Fluid gel, Rheology, Suspending, Whey protein, Xanthan