

بررسی مدل‌های مختلف رئولوژیک در سوسپانسیون‌های حاوی صمغ کتیرا

وحید سمواتی^{۱*}، زهرا امام جمعه^۲ و محمد حجتی^۱

تاریخ دریافت: ۹۰/۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۱/۲/۱۱

^۱ استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان

^۲ دانشیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

*مسئول مکاتبه: E-mail: vahidsamavati@gmail.com

چکیده

روش‌های مقیاس بندی شامل روابطی است که به کمک آنها می‌توان به نمودارهای کلی برای توصیف رفتار جریانی سیستم‌های با ویسکوزیته، دانسیته و اندازه قطر ذرات متفاوت دست یافت. این روش‌ها می‌توانند به یک نمودار رفتار جریانی کلی برای همه غلظت‌ها در محیط غیرنیوتنی منجر شوند و می‌توان از این نمودار عمومی در یک نمونه برای پیش بینی نمودار رفتار جریانی ذرات و نمونه‌های مشابه در ویسکوزیته‌های مختلف استفاده کرد. هدف از این تحقیق ارزیابی مدل‌های مختلف مقیاس بندی و رئولوژیک جهت بررسی رفتار جریانی نمونه های غذایی حاوی صمغ کتیرا در دو سطح غلظت ۰/۵ و ۱ درصد وزنی، و ایزوله پروتئین آب پنیر در دو سطح غلظت ۲ و ۴ درصد وزنی، و تعیین بهترین مدل مقیاس بندی و رئولوژیک است. روش‌های مختلف مقیاس بندی شامل ویسکوزیته نسبی، عدد پکلت و عدد رینولدز بودند. رفتار جریانی تمام نمونه‌ها به طور موفقیت آمیزی با مدل‌های پاور لاور، کراس و الیس مدل سازی شدند. نتایج نشان دادند که بهترین روش مقیاس بندی، استفاده از عدد بدون بعد پکلت می باشد. مدل پاور لاور بهترین توصیف را برای رفتار جریانی دیسپرسیون‌ها را در پی داشت. با افزایش غلظت صمغ کتیرا در نمونه‌ها اندیس جریان کاهش و اندیس قوام افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: مدل سازی، سوسپانسیون، ایزوله پروتئین آب پنیر، رئولوژی

Investigation of various rheological models in suspensions containing tragacanth gum

V Samavati^{1*}, Z Emam Djomeh² and M Hojjati¹

Received: May 04, 2011 Accepted: April 30, 2012

¹Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Ramin Agriculture and Natural Resources University, Ahwaz, Iran

²Professor, Department of Food Science and Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran

*Corresponding author: E-mail: vahidsamavati@gmail.com

Abstract

Scaling methods has many equations that are used to create the general flow curve to describe flow behavior of systems with different viscosity, density and particle size. These methods can give a general flow curve for all concentrations in non-Newtonian media and a general flow curve obtained from one sample can be used to predict the flow curves of the same samples with different viscosities. The aim of this study was to evaluate various scaling and rheological model to investigate the flow curves of various suspensions consisting of tragacanth gum (TG) (0.5, 1% wt) and whey protein isolate (2, 4% wt), and to determine the best-scaling law and rheological model. The scaling methods were relative viscosity, Péclet number, and Reynolds number. The results showed that the best scaling method is Péclet number. The flow behavior of all samples was successfully modeled with the power-law, Ellis, and Cross models; the power-law model was found to the best describe the flow behavior of dispersions. The flow behavior index decreased and consistency index increased when TG concentration increased.

Keywords: Modeling, Rheology, Viscosity, Suspension, Whey protein isolate

مقدمه

شوند. اگر داده‌های مربوط به ویسکوزیته به صورت کاهش یافته رسم شود می‌تواند باعث ایجاد یک نمودار رفتار جریانی کلی برای همه غلظت‌ها در محیط غیرنیوتنی شود و می‌توان از این نمودار عمومی در غلظت یا یک محیط برای پیش‌بینی نمودار رفتار جریانی ذرات و محیط‌های مشابه در ویسکوزیته‌های مختلف استفاده شود. این موضوع می‌تواند نوید بخش کاربرد گسترده آن در پیش‌بینی خصوصیات مکانیکی سیالات گوناگون با ماهیت‌های متنوع باشد (ساواژ ۲۰۰۰). قوانین مقیاس‌بندی که توسط تجزیه و تحلیل بدون بعد انجام می‌گیرد، به عنوان اساس پیش‌بینی‌های تجربی رفتار جریانی و رئولوژیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. این قوانین می‌توانند کاربردهایی را در پیش‌بینی

امروزه علم رئولوژی کاربرد گسترده‌ای را در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی پیدا کرده است. در تعیین خصوصیات رئولوژیکی مواد غذایی عوامل متعددی نقش دارند. برای مثال دما، روش‌های عمل‌آوری نمونه‌ها، روش‌های به کار رفته جهت اندازه‌گیری‌ها، دستگاه‌های مورد استفاده از عواملی هستند که ممکن است نتایج کار را تحت تاثیر قرار دهند.

روش‌های مختلف مقیاس‌بندی (scaling) شامل روابطی می‌باشد که به کمک آنها می‌توان به نمودارهای کلی برای توصیف رفتار جریانی سیستم‌های با ویسکوزیته و خصوصیتی مانند دانسیته و اندازه قطر ذرات متفاوت دست یافت. این روش‌ها علاوه بر محیط‌های نیوتنی، در محیط‌های غیرنیوتنی نیز استفاده می‌

زمانی که اندازه ذرات به اندازه کافی بزرگ باشند، یا ویسکوزیته سیستم به اندازه کافی زیاد باشد، حرکات براونی افزایش یافته و روش مقیاس‌بندی رینولدز مناسب می‌باشد. محققان بیان داشتند که روش مناسب برای مقیاس‌بندی سیستم‌های مونودیسپرس حاوی ذرات کروی بدون اصطکاک، روش مقیاس‌بندی رینولدز می‌باشد (وودکاک و مرینگتون ۱۹۹۱).

$$Re = \frac{\gamma \rho_0 \alpha^2}{\eta_0}$$

در اینجا:

ρ_0 : دانسیته محیط (Kg/m^3)

γ : نرخ برشی ($1/s$)

η_0 : ویسکوزیته محیط در نرخ برشی خیلی پایین (Pa.s)

α : قطر ذرات (m)

در هر دوی این روش‌ها، ویسکوزیته کاهش یافته فقط به غلظت ذرات و نرخ برشی در حالت کاهش یافته وابسته است.

هدف اصلی از این پژوهش، بررسی مدل‌های مختلف رئولوژیک جهت بیان بهتر رفتار جریانی و همچنین ارزیابی روش‌های مختلف مقیاس‌بندی در سیستم‌های سوسپانسیونی مدل شامل صمغ کتیرا گونه اسفرائین و ایزوله پروتئین آب پنیر، و انتخاب بهترین روش مقیاس‌بندی می‌باشد. ترکیب هر فرمولاسیون در جدول ۱ آمده است.

مواد و روش‌ها

مواد

اسید اولئیک ، purity 65-88% ، ($\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$ ، $\rho=0.889-0.895 \text{ kg/m}^3$) از شرکت مرک آلمان خریداری شد. پودر صمغ کتیرا گونه اسفرائین از گروه صنایع غذایی دانشگاه شهید بهشتی تهیه گردید. ایزوله پروتئین آب پنیر از شرکت Davisco فرانسه تهیه گردید.

مکانیک سیالات در صنایع غذایی و شیمیایی داشته باشند.

در این روش‌ها می‌توان با بدون بعد کردن موارد متعدد شرایط مناسبی فراهم کرد و به اعدادی نظیر رینولدز و پکلت که از مهمترین اعداد بدون بعد در بحث مقیاس‌بندی می‌باشند دست یافت (پال و همکاران ۱۹۹۲؛ پال ۱۹۹۶). در سیستم‌های کلوئیدی، عدد پکلت نسبت بین نیروهای هیدرودینامیکی به سبب برش و نیروهای حرکات براونی می‌باشد و عدد رینولدز نسبت بین نیروهای درون ذره‌ای به سبب تاثیر میدان ایجاد شده توسط سرعت و نیروهای مقاوم محیط می‌باشد. هر دوی اینها نیازمند داده‌های مربوط به قطر ذرات می‌باشند. گفته شده که جهت تشخیص سیستم‌های براونی از سیستم‌های غیربراونی، اندازه تجمعات ذرات، انرژی حرارتی و تنش خارجی اعمال شده مهم می‌باشند (فیشر ۲۰۰۹). یک گروه بدون بعد به نام عدد پکلت که دارای مقیاس زمانی برای حرکات براونی و رفتار جریانی است می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

$$Pe = \frac{\gamma \eta_0 \alpha^3}{k_B T}$$

در اینجا:

γ : نرخ برشی ($1/s$)

η_0 : ویسکوزیته محیط در نرخ برشی خیلی پایین (Pa.s)

α : قطر ذرات (m)

k_B : ثابت بولتزمن ($\text{m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$)

T: دما ($^\circ\text{K}$)

اگر پکلت از یک خیلی کوچکتر باشد حرکات براونی غالب خواهد شد. با این حال در اعداد پکلت بالا تخریب ساختار توسط نیروهای برشی قابل توجه می‌شوند و دیگر، نیروهای براونی قادر به بازیابی ساختار سیستم کلوئیدی به حالت تعادلی نبوده و رقیق شوندگی یا غلیظ شوندگی با برش رخ خواهد داد. اثرات جهت‌گیری تجمعات می‌تواند در اعداد پکلت خیلی بالاتر از ۱۰ مهم باشد (لارسون ۱۹۹۹).

روش‌ها

تهیه فرمولاسیون

در ابتدا، مقادیر مشخص از صمغ کتیرا و ایزوله پروتئین آب پنیر به صورت جداگانه در آب مقطر به کمک همزن برقی (Ultra Turrax, IKA T25 Digital, Germany) با دور ۵۰۰۰ در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه تهیه گردید و جهت آگیری کامل اجازه داده شد تا

نمونه‌ها یک شب در دمای محیط (۲۰ درجه سانتی گراد) بمانند.

برای تهیه فرمولاسیون‌های نهایی مقادیر مشخص از هر یک از مخلوط‌ها به کمک یک همزن برقی با دور ۸۰۰۰ در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه باهم مخلوط شدند. سپس جهت به تعادل رسیدن میزان کشش بین سطحی تهیه شده یک شب در دمای محیط نگهداری شدند. جهت انجام آزمایشات، به طور تصادفی ۶ نمونه انتخاب شدند که ترکیب هر یک از آنها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- اجزاء تشکیل دهنده فرمولاسیون‌های مختلف

شماره فرمولاسیون	صمغ کتیرا (wt %)	پروتئین آب پنیر (wt %)
۱	۱	۴
۲	۱	۰
۳	۰/۵	۴
۴	۱	۲
۵	۰/۵	۰
۶	۰/۵	۲

اندازه گیری قطر ذرات

اندازه ذرات نمونه‌ها با استفاده از دستگاه Master sizer ساخت شرکت مالورن انگلستان در طول موج نور قرمز (۶۳۳ نانومتر) مورد بررسی قرار گرفتند (هنکوک و همکاران ۱۹۹۴).

اندازه‌گیری دانسیته نمونه‌ها

بررسی دانسیته نمونه‌ها به کمک یک پیکنومتر استاندارد با حجم ۲۵ میلی لیتر در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد انجام گرفت. این اندازه گیری‌ها جهت تعیین جزء حجمی و محاسبه عدد پلکت مورد استفاده قرار گرفتند.

بررسی های رئولوژیک

ویسکوزیته نمونه‌ها به کمک رئومتر نوسانی مدل MCR 301 ساخت شرکت Anton Paar کشور آلمان در دامنه نرخ برشی ۰/۱ تا ۵۰۰، دمای استاندارد ۲۰

درجه سانتی گراد اندازه‌گیری شد. در این تحقیق از مدل باب (با قطر ۳۲/۰۵ میلی متر و ارتفاع ۳۳/۲۹ میلی متر) و کاپ (با قطر ۳۳/۹۳ میلی متر) استفاده گردید. ویسکوزیته نسبی (η_r) به کمک رابطه زیر محاسبه شد:

$$\eta_r = \eta / \eta_0$$

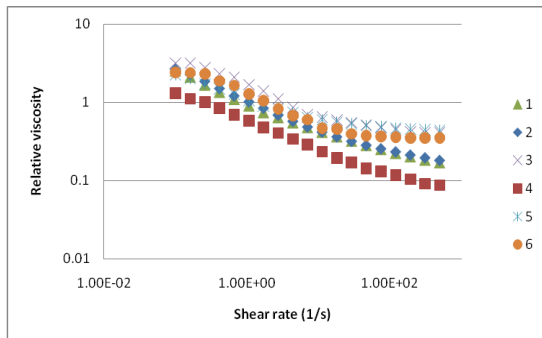
در اینجا η_0 ویسکوزیته فاز پیوسته در نرخ برشی خیلی کم (zero shear rate) می‌باشد که توسط اندازه‌گیری در نرخ‌های برشی پائین تعیین گردید. همچنین جهت توصیف بهتر رفتار جریانی نمونه‌ها، از مدل‌های مختلف رئولوژیک شامل مدل Power law، Ellis و Cross استفاده شد. روابط ریاضی این مدل‌ها به صورت زیر می‌باشد:

Power-law model $\eta = k \dot{\gamma}^{n-1}$

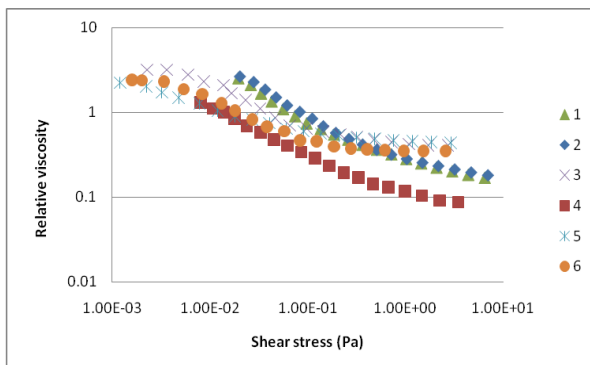
Cross model $\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + (c\dot{\gamma})^m}$

Ellis model $\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + (\sigma/\sigma_c)^m}$

نتایج، رسم منحنی ویسکوزیته به عنوان تابعی از تنش برشی به جای نرخ برشی، باعث تفکیک بهتر منحنی و ارائه نتایج با کیفیت بهتر می‌شود.



شکل ۱- منحنی رفتار جریان (ویسکوزیته نسبی- نرخ برشی) فرمولاسیون‌های مختلف (شماره‌ها مربوط به شماره فرمولاسیون‌ها در جدول ۱ می‌باشد).



شکل ۲- منحنی رفتار جریان (ویسکوزیته نسبی- تنش برشی) فرمولاسیون‌های مختلف (شماره‌ها مربوط به شماره فرمولاسیون‌ها در جدول ۱ می‌باشد).

داده‌های موجود در شکل‌های شماره ۱ و ۲ در واحد کاهش یافته ویسکوزیته نسبی (η_r) به جای ویسکوزیته ظاهری به عنوان تابعی از تنش برشی و نرخ برشی رسم گردیده است. ویسکوزیته فاز پیوسته (η_0) با توجه به محلول‌های صمغ با غلظت‌های مختلف در آب بدست آمده است. شکل شماره ۳ نشان می‌دهد که رسم چنین نمودارهایی در مقیاس کاهش یافته باعث ایجاد نتایج مناسبی در نرخ‌های برشی پایین می‌شود. این روش مقیاس‌بندی که در آن ویسکوزیته نسبی به عنوان تابعی

γ : نرخ برشی (1/s)

K: اندیس قوام (Pa.s)ⁿ

n: اندیس جریان (بدون بعد)

m: عدد ثابت (بدون بعد)

η : ویسکوزیته (Pa.s)

η_0 : ویسکوزیته در نرخ برشی کم (Pa.s)

η_∞ : ویسکوزیته در نرخ برشی بینهایت (Pa.s)

C: ثابت زمان (s)

σ : تنش برشی (Pa) σ_c : تنش بحرانی یا آستانه تنش (Pa) که می‌تواند به عنوان مقداری از تنش معرفی شود که ساختارها شروع به شکسته شدن می‌کنند تادروس (۲۰۰۴).

آنالیز آماری

جهت ارزیابی داده‌های تجربی از نرم افزار SAS (9.1) استفاده گردید. آزمون میانگین واریانس (ANOVA) جهت بررسی معنی‌دار بودن داده‌ها ($P < 0.05$) انجام گرفت. کلیه آزمایشات در سه تکرار انجام شدند.

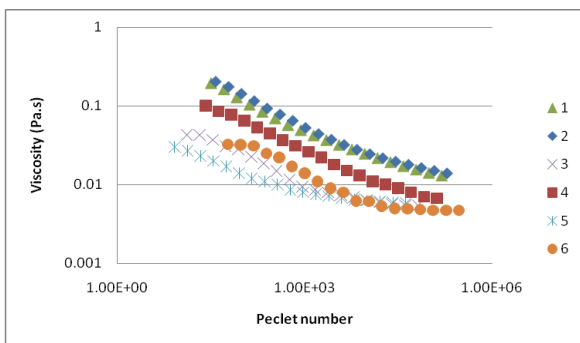
نتایج و بحث

مدل‌های مختلف مقیاس‌بندی

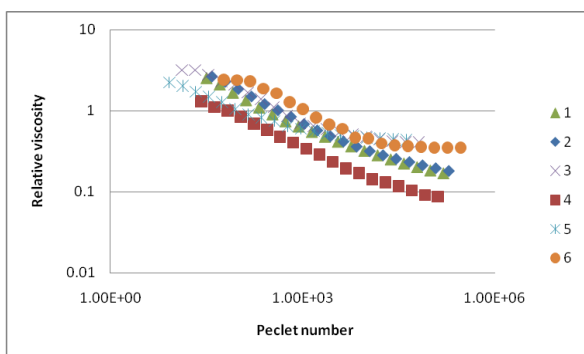
همانطور که در شکل شماره ۱ و ۲ دیده می‌شود، با افزایش نرخ و تنش برشی ویسکوزیته نمونه‌های تهیه شده کاهش می‌یابد که نشان دهنده شکسته شدن بیشتر ذرات فلوک شده در اثر برش می‌باشد. افزایش ویسکوزیته دیسپرسیون‌ها در ارتباط با فلوکولاسیون ذرات می‌باشد زیرا جزء حجمی موثر ذرات در سیستم به سبب حضور فاز پیوسته به دام افتاده بین ذرات در فلوک‌ها افزایش می‌یابد (مک کلمنت ۱۹۹۹؛ گوناسکاران و همکاران ۲۰۰۷؛ کلینکسورن و همکاران ۲۰۰۴). همانطور که مشاهده می‌شود که با افزایش میزان صمغ، ویسکوزیته افزایش می‌یابد و حساسیت دیسپرسیون‌های آبی به شکسته شدن توسط برش کمتر می‌شود زیرا مکان‌های اتصال بیشتری بوجود می‌آید. با توجه به این

نمودارهای رفتار جریان تقریباً نمودارهای مشابه در نرخ‌های برشی کم تبدیل می‌شوند که مستقل از غلظت صمغ و اندازه ذرات می‌باشند.

داده‌ها در مقیاس کاهش یافته در شکل‌های ۵ و ۶ بر طبق روش مقیاس‌بندی پکلت، با ویسکوزیته ظاهری و نسبی رسم گردیده‌اند. همانطور که در شکل شماره ۵ دیده می‌شود. روش مقیاس‌بندی پکلت با ویسکوزیته نسبی داده‌ها را با موفقیت بیشتری کاهش می‌دهد. این موضوع بخصوص در غلظت‌های بالاتر صمغ و نرخ‌های برشی پایین قابل توجه‌تر است (شکل شماره ۶).



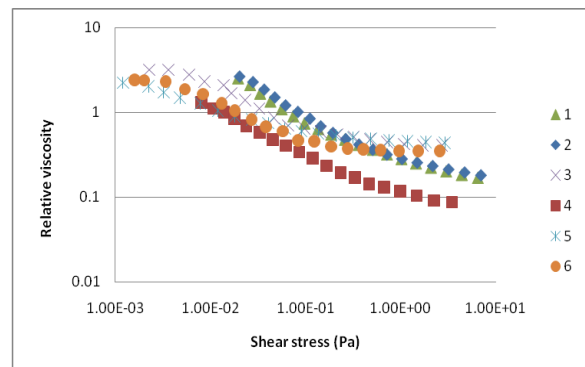
شکل ۵- منحنی رفتار جریانی (ویسکوزیته ظاهری- عدد پکلت) فرمولاسیون‌های مختلف (شماره‌ها مربوط به شماره فرمولاسیون‌ها در جدول ۱ می‌باشد).



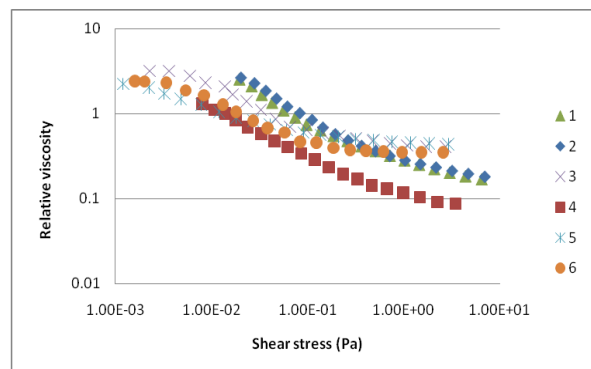
شکل ۶- منحنی رفتار جریانی (ویسکوزیته نسبی- عدد پکلت) فرمولاسیون‌های مختلف (شماره‌ها مربوط به شماره فرمولاسیون‌ها در جدول ۱ می‌باشد).

همچنین در این مورد پدیده وارونگی داده‌ها مشاهده می‌شود. زمانی که روش مقیاس‌بندی پکلت باعث نتایج وارونه می‌گردد، نشان دهنده آن است که فقط حرکات

از نرخ برشی بیان می‌شود، می‌تواند باعث وارونه شدن نتایج می‌شود یعنی نمودار مربوط به ویسکوزیته نمونه-هایی که ویسکوزیته کمتری دارند بالاتر از نمودار نمونه-های دارای ویسکوزیته بالاتر قرار می‌گیرند. نتایج مشابهی نیز توسط مرینگتون در سال ۱۹۹۲ ارائه شده است.



شکل ۳- منحنی رفتار جریانی (ویسکوزیته نسبی- نرخ برشی) فرمولاسیون‌های مختلف (شماره‌ها مربوط به شماره فرمولاسیون‌ها در جدول ۱ می‌باشد).



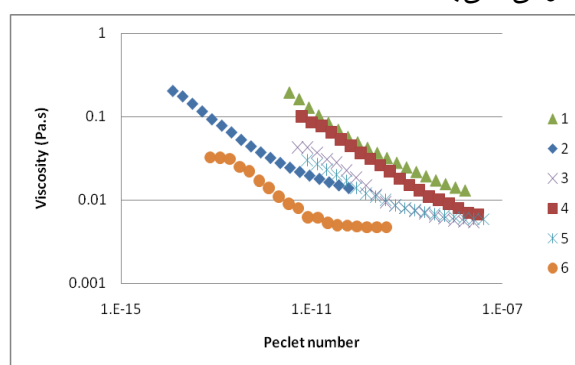
شکل ۴- منحنی رفتار جریانی (ویسکوزیته نسبی- تنش برشی) فرمولاسیون‌های مختلف (شماره‌ها مربوط به شماره فرمولاسیون‌ها در جدول ۱ می‌باشد).

در عوض، رسم ویسکوزیته نسبی به عنوان تابعی از تنش برشی، نتایج بهتری داشته و نشان می‌دهد که یک منحنی کاهش یافته رفتار جریانی عمومی برای نمونه‌ها در محیط غیرنیوتنی با مواد اصلاح‌کننده‌ای مانند صمغ بخصوص در نرخ‌های برشی پایین بدست می‌دهد (شکل شماره ۳). شکل‌های شماره ۳ و ۴ نشان می‌دهند که همه

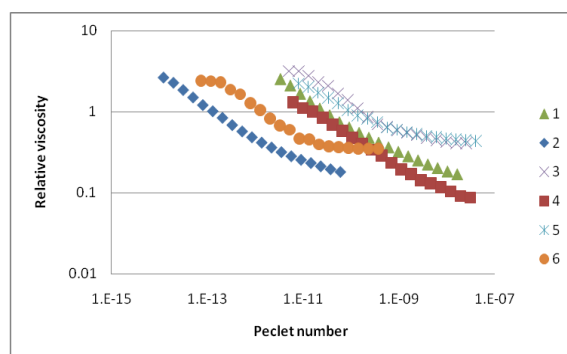
موجود در هر نمونه، رفتار رقیق شونده با برش در محدوده وسیعی از تنش برشی مشاهده می‌شود. رفتار رقیق شونده با برش نه تنها به فلوکولاسیون ذرات فاز پراکنده، بلکه به رفتار غیرنیوتنی فاز پیوسته نیز وابسته است. فرانکو و همکارانش در سال ۱۹۹۵ بیان داشتند که تنش‌های برشی بالا می‌تواند ذرات موجود در سیستم را تحریک به تجمع نماید و باعث افزایش اندازه ذرات گردد (فرانکو و همکاران ۱۹۹۵). افزایش اندازه ذرات می‌تواند به واکنش‌های ضعیفتر بین ذرات منتهی شود و در نتیجه باعث کاهش ویسکوزیته سیستم گردد (رائو و استف ۱۹۹۲). شکل شماره ۲ و جدول شماره ۲ نشان می‌دهند که مقدار ایزوله پروتئین آب پنیر تاثیر معنی‌داری بر روی رفتار جریانی سیستم ندارد و پیشنهاد می‌کند که ویسکوزیته سیستم مستقل از میزان ایزوله پروتئین آب پنیر جذب نشده در بین فازها می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که حضور صمغ صمغ کتیرا باعث افزایش فلوکولاسیون ذرات شده و در نتیجه به دام افتادن مقادیر بیشتری از فاز پیوسته در داخل این ساختارهای فلوکوله شده و باعث افزایش جزء حجمی موثر هیدرودینامیکی ذرات شده و باعث افزایش ویسکوزیته سیستم می‌شود (مک کلمنت ۱۹۹۹؛ گوناسکاران و همکاران ۲۰۰۷). از طرف دیگر ساختارهای فلوکوله شده تحت تاثیر نرخ‌های برشی بالا شکسته می‌شوند و فاز پیوسته به دام افتاده را رها می‌کنند و در نتیجه باعث رفتار رقیق شونده با برش و کاهش ویسکوزیته سیستم می‌گردد (گوناسکاران و همکاران ۲۰۰۷؛ دای اکیونسون و گلدینگ ۱۹۹۷).

با افزایش غلظت صمغ صمغ کتیرا، ویسکوزیته در نرخ‌های برشی کم در نمودار رفتار جریانی افزایش می‌یابد و روند کاهش ویسکوزیته (ناحیه رقیق شونده با برش) با شیب بیشتری رخ می‌دهد که دلیل آن افزایش تعداد نقاط اتصال بین زنجیره‌های پلیمری و افزایش تنش آستانه با افزایش غلظت صمغ صمغ کتیرا می‌باشد (لانای و همکاران ۱۹۸۶). همچنین با افزایش WPI 4%، ویسکوزیته نمونه‌ها افزایش می‌یابد ولی هیچ تغییری در

براونی و نیروهای ویسکوز، مکانیک سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهند (راسل و همکاران ۱۹۸۹). نتایج مشابهی توسط ساواژ در سال ۲۰۰۰ گزارش شده است. روش مقیاس‌بندی رینولدز داده‌ها را به طور مطلوب کاهش نمی‌دهد (شکل‌های شماره ۷ و ۸)، و در بعضی موارد نتایج را وارونه می‌کند که نشان می‌دهد روش مناسبی برای دست یافتن به یک نمودار رفتار جریانی عمومی نمی‌باشد.



شکل ۷- منحنی رفتار جریانی (ویسکوزیته ظاهری- عدد رینولدز) فرمولاسیون‌های مختلف (شماره‌ها مربوط به شماره فرمولاسیون‌ها در جدول ۱ می‌باشد).



شکل ۸- منحنی رفتار جریانی (ویسکوزیته نسبی- عدد رینولدز) فرمولاسیون‌های مختلف (شماره‌ها مربوط به شماره فرمولاسیون‌ها در جدول ۱ می‌باشد).

مدل‌های رئولوژیک

در این بخش نتایج حاصل از مدل‌های مختلف رئولوژیک جهت ارزیابی بهترین مدل که رفتار جریانی سیستم را توصیف کند بررسی می‌شوند. همانگونه که در تمام نمونه‌ها دیده می‌شود، صرفنظر از ترکیب

جدول شماره ۲، پارامترهای بدست آمده برای مدل-های مختلف رئولوژیک مورد استفاده را نشان می‌دهد. با توجه میزان خطای استاندارد و ضریب تبیین بدست آمده، بهترین مدل در اینجا برای توصیف رفتار جریان‌ی مدل Power law می‌باشد (شکل شماره ۹).

شکل نمودار رفتار جریان‌ی مشاهده نمی‌شود که این موضوع نشان می‌دهد که در محدوده غلظت‌های به کار رفته از مواد مورد نظر، تاثیر صمغ کتیرا بیشتر از WPI می‌باشد. کالیفانو در سال ۲۰۰۸ نتایج مشابهی را در مورد امولسیون‌های حاوی صمغ زانتان گزارش کردند (لورنزو و همکاران ۲۰۰۸).

جدول ۲- پارامترهای مدل Cross, Power law و Ellis در نمودارهای رفتار جریان‌ی نمونه‌ها

Samples				Model									
No.	Power Law				Ellis				Cross				
	K (Pa.s) ⁿ	n	R ²	S _{xy}	C (s)	m	R ²	S _{xy}	σ ^c (Pa)	m	R ²	S _{xy}	
1*	0.23 ^a	0.44 ^e	0.96	1.17	0.18 ^a	0.57 ^d	0.92	3.07	1.04 ^b	0.66 ^c	0.89	3.16	
2	0.21 ^a	0.49 ^d	0.97	1.02	0.14 ^b	0.81 ^b	0.91	2.88	1.12 ^a	0.71 ^b	0.91	2.85	
3	0.08 ^c	0.70 ^b	0.96	1.39	0.13 ^b	0.49 ^f	0.93	1.46	0.63 ^d	0.58 ^d	0.90	3.09	
4	0.14 ^b	0.61 ^c	0.99	0.84	0.07 ^d	0.53 ^e	0.90	2.94	1.18 ^a	0.67 ^c	0.90	2.98	
5	0.04 ^d	0.75 ^a	0.97	1.26	0.05 ^d	0.74 ^c	0.91	2.81	0.69 ^c	0.75 ^b	0.89	3.27	
6	0.07 ^c	0.72 ^{ab}	0.98	1.05	0.10 ^c	0.95 ^a	0.92	2.79	0.73 ^c	0.83 ^a	0.90	2.96	

ضریب تبیین (R²)، خطای استاندارد (S_{xy})

اعداد پر رنگ، بیشترین ضریب تبیین و کمترین خطای استاندارد را در هر مدل نشان می‌دهند

اعداد دارای علامت یکسان در هر ستون از لحاظ آماری (≥ P) معنی‌دار نمی‌باشند.

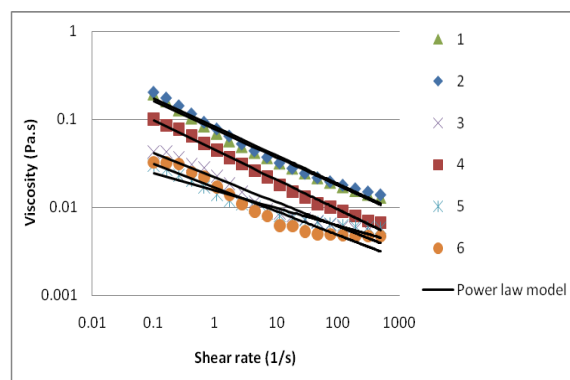
* ترکیب مربوط به هر فرمولاسیون در جدول ۱ آمده است.

کلنت (۱۹۹۹). میزان ایزوله پروتئین آب پنیر در غلظت ۲ درصد وزنی تاثیر معنی‌داری بر اندیس جریان نمونه‌ها نداشت اما در غلظت ۴ درصد وزنی باعث کاهش اندیس جریان شد.

میزان اندیس قوام (k) در مدل پاور لای با افزایش غلظت صمغ صمغ کتیرا افزایش می‌یابد که نشان دهنده واکنش‌های بیشتر بین ذره‌ای و در نتیجه ساختار یافتگی بیشتر سیستم با افزایش غلظت صمغ کتیرا می‌باشد. میزان ایزوله پروتئین آب پنیر در غلظت ۲ درصد وزنی تاثیر معنی‌داری بر اندیس قوام نمونه‌ها نداشت اما در غلظت ۴ درصد وزنی باعث افزایش اندیس قوام شد.

نتیجه گیری

روش‌های مختلف مقیاس بندی رئولوژیک در نمونه‌های مختلف حاوی پروتئین آب پنیر و صمغ کتیرا مورد



شکل ۹- منحنی رفتار جریان‌ی نمونه‌های مختلف و برازش مدل Power law

بر طبق جدول شماره ۲، با افزایش غلظت صمغ کتیرا در نمونه‌ها، میزان اندیس جریان (η) کاهش می‌یابد. این پدیده با فلوکولاسیون ذرات سیستم به کمک غلبه یافتن نیروهای جاذبه بر نیروهای دافعه که در انتها بیشتر از انرژی گرمایی سیستم می‌شوند، توجیه می‌شود (مک

سیاسگزاری

از مدیریت امور پژوهشی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین جهت پشتیبانی از اجرای طرح تحقیقاتی شماره ۲۹۰/۲ که این مقاله مستخرج از آن طرح می باشد تشکر و قدردانی می گردد.

ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش مقیاس بندی پکلت با ویسکوزیته نسبی نسبت به دیگر روش‌ها بهتر می‌باشد. همچنین مدل رئولوژیک Power law به عنوان مدل بهتر جهت بیان رفتار جریانی نمونه‌ها انتخاب گردید.

منابع مورد استفاده

- Russel WR, Savilleda and Schowalter WR, 1989. Colloidal Dispersions, Cambridge University Press, Cambridge.
- Savage RM, 2000. Effects of rheology modifiers on the flow curves of idealized and food suspensions. Food Hydrocolloids 14: 209–215.
- Pal R, 1996. in: P. Becher (Ed.), Encyclopedia of Emulsion Technology, Marcel Dekker, New York.
- Pal R, Yan Y and Masliyah JH, 1992. In: L. L. Schramm (Ed.), Emulsions: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry, American Chemical Society, Washington, DC.
- Fischer P, Pollard M, Erni P, Marti I and Padar S, 2009. Rheological approaches to food systems. Comptes Rendus Physique 10: 740–750.
- Laeson RG, 1999. The Structure and Rheology of Complex Fluids, Oxford University Press, Oxford, UK.
- Merrington A and Woodcock LV, 1991. Rheometric experiments on idealized suspensions: phase behavior and scaling laws. Liquid Solid Flows ASME, FED 118: 109–115.
- Hennock M, Rahaalkar RR and Richmond P, 1984. Effect of xanthan gum upon the rheology and stability of oil-water emulsions. Journal of Food Science 49: 1271-1274.
- Tadros T, 2004. Application of rheology for assessment and prediction of the long term physical stability of emulsions. Journal of Colloid and Interface Science 109: 227–258.
- McClements DJ, 1999. Emulsion rheology. In Food emulsions—Principles, practice, and techniques (D. J. McClements eds.) Washington, DC: CRC Press, pp.235–266.
- McClements DJ, 1999. Food Emulsions: Principles, Practice and Techniques, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Sun C, Gunasekaran S and Richards MP, 2007. Effects of xanthan gum on physicochemical properties of whey protein isolate stabilized oil-in-water emulsions. Food Hydrocolloids 21: 555–564.
- Klinkesorn U, Sophanodora P, Chinachoti P and McClements DJ, 2004. Stability and rheology of corn oil-in-water emulsions containing maltodextrin, Food Research International 37: 851–859.
- Franco JM, Berjano M, Guerrero A, Munoz J and Gallegos C, 1995. Flow behavior and stability of light mayonnaise containing a mixture of egg yolk and sucrose stearate as emulsifiers. Food Hydrocolloids 9: 111–121.
- Rao MA and Steffe JF, 1992. Viscoelastic properties of foods. London: Elsevier Applied Science Publishers.
- Dickinson E and Golding M, 1997. Rheology of sodium caseinate Stabilized oil-in-water emulsions. Journal of Colloid and Interface Science 191: 166–176.

- Launay B, Doublier JL and Cuvelier G, 1986. Flow properties of aqueous solutions and dispersions of polysaccharides. In: Functional Properties of Food Macromolecules (J. R. Mitchell).
- Lorenzo G, Zaritzky N and Califano A, 2008. Modeling rheological properties of low-in-fat o/w emulsions stabilized with xanthan/guar mixtures. Food Research International 4: 1487–494.