



## بررسی خصوصیات جریان پذیری خمیر خرما

حجت کاراژیان<sup>۱</sup>، محمد علی رضوی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> عضو هیات علمی گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تربت حیدریه (مسوول مکاتبات)

پست الکترونیک: hojjat\_karazhiyan@yahoo.com

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۸۸/۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۸۸/۳/۲۶

### چکیده

نوع خمای ایران در میان تعداد اندک کشورهای تولید کننده بی نظیر است و یکی از فرآورده های صادراتی به شمار می رود. با هسته گیری و در ادامه اکستروود کردن خرماهای نرم شده می توان یک محصول نیمه جامد به نام خمیر خرما تهیه کرد. از خواص مهم فیزیکیوشیمیایی این محصول ویژگی های رئولوژیکی و جریان پذیری این فرآورده می باشد. هدف از این تحقیق بررسی خواص جریان پذیری خمیر خمای تولیدی در کشورمان می باشد. ویژگی های جریان و پارامترهای رئولوژیکی با استفاده از ویسکومتر دورانی مجهز به یک سیرکولاتور حرارتی انجام پذیرفت. داده های تنش برشی در برابر سرعت برشی با ۶ مدل مشهور به نام های قانون توان (Power law)، پلاستیک بینگهام (Bingham plastic)، مدل هرشل بالکلی (Herschel-Bulkley)، مدل کاسون (Casson)، مدل سیسکو (Sisko) و مدل ووکادلو (Vocadlo) برآزش شدند. وابستگی ویسکوزیته به دما با استفاده از مدل آرنیوس مورد بررسی قرار گرفت. خمیر خرما یک رفتار غیر نیوتنی مشخصا شل شونده با برش از خود نشان داد. ویسکوزیته با افزایش دما کاهش پیدا کرد. همچنین بهترین مدلی که در تمام دماها نمونه ها را توصیف کرد مدل کاسون بود.

واژه های کلیدی: خمیر خرما، رفتار جریان، خواص رئولوژیکی، مدل آرنیوس

### ۱- مقدمه

خواص رئولوژیکی مواد غذایی بر پایه ی تغییر شکل یا جریان یافتن آن ها به هنگامی که در معرض تنش قرار می گیرند، استوار می باشد (۸). مواد غذایی را می توان بر اساس حالت آن ها به جامد، نیمه جامد و مایع تقسیم بندی نمود. مواد غذایی مایع و نیمه جامد، گستره ی وسیعی از محصولات غذایی را با رفتارهای رئولوژیکی گوناگون تحت پوشش قرار می دهند (۴). داده های رئولوژیکی در عرصه های مختلف صنعت مواد غذایی استفاده می شود که از آن جمله می توان به موارد زیر اشاره کرد (۹).

۱- محاسبات مهندسی فرآیند شامل دامنه ی گسترده ای از تجهیزات نظیر لوله ها، پمپ ها، اکسترودرها، همزن ها، مبدل های حرارتی، هموژنایزرها و غیره



۲- تعیین عملکرد اجزای مواد غذایی در تولید محصول جدید

۳- کنترل کیفیت محصول میانی یا نهایی

۴- تعیین زمان ماندگاری مواد غذایی

۵- ارزیابی بافت مواد غذایی براساس همبستگی با داده‌های حسی

در بسیاری از عملیات فرآوری مواد غذایی، دانستن ویسکوزیته ی سیال در حال فرآوری ضروری است. چون با دانستن آن می‌توان مناسب ترین دستگاه را انتخاب کرد. ویسکوزیته طی برخی عملیات فرآوری ممکن است به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر یابد. این موضوع در فرآیندهای صنعتی مانند گرمایش، سرمایش، هموژنیزاسیون، تغلیظ و همچنین در بسیاری از تخمیرهای صنعتی توسط قارچ‌ها مشاهده می‌شود. بنابراین باید در طراحی این فرآیندها تغییرات ویسکوزیته در نظر گرفته شود. از دیدگاه کنترل کیفی، اندازه‌گیری ویسکوزیته ی مواد غذایی بو یزه آن‌هایی که ما انتظار داریم دارای قوام ویژه‌ای باشند، از اهمیت بسزایی برخوردار است. به عنوان مثال در این مورد می‌توان از خامه، ماست، رب گوجه‌فرنگی و سس خردل نام برد (۴).

خواص رئولوژیکی پالپ خمیرخرما در بریکس‌های ۱۵ و ۴۵ درجه و کنسانتره خرما در بریکس ۷۳ درجه آنالیز شد. پارامترهای رفتار جریان با مدل‌های رئولوژیکی مختلفی از قبیل مدل قانون توان و مدل بینگهام تعیین شدند. همچنین اثر دما بر روی خواص رئولوژیکی کنسانتره و پالپ خرما هم بررسی شد و انرژی فعال‌سازی برطبق مدل آرنیوس محاسبه شد. نتایج تحقیقات نشان داد که پالپ خرما رفتار سودوپلاستیکی از خود نشان می‌دهد و شاخص رفتار جریان آن بین ۰ و ۱ است و ضریب ثابت  $K$  با افزایش مواد جامد محلول به طور نمایی افزایش می‌یابد و در دماهای بالاتر به سرعت کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که درجه حرارت اثر نسبتاً کمی بر شاخص رفتار جریان سیالات غیرنیوتنی سودوپلاستیک دارد. همچنین نتایج تحقیقات در زمینه ی کنسانتره خرما با بریکس ۷۳، نشان داد که مقادیر  $K$  (شاخص قوام) و  $n$  (اندیس رفتار جریان) به تدریج با افزایش دما کاهش می‌یابند و همچنین مقادیر ویسکوزیته ی پلاستیک و تنش تسلیم با افزایش دما کاهش پیدا می‌کنند. همچنین نتایج حاصل از مدل آرنیوس نشان داد که با افزایش مواد جامد محلول پالپ خرما، انرژی فعال‌سازی هم افزایش می‌یابد. (۳) خواص فیزیکوشیمیایی خمیرهای خرما هم توسط احمد و راماسوامی ارزیابی شد. آن‌ها پارامترهای مختلفی را مورد بررسی قرار دادند. اندازه‌گیری‌های رئولوژیکی بیانگر طبیعت ویسکوالاستیک خمیر خرما بود (۱).

نتایج حاصل از بررسی منابع بیانگر این مطلب است که اطلاعات کمی در زمینه خصوصیات رئولوژیکی و خمیر خرما وجود دارد. هدف کلی از اجرای این پژوهش بررسی رفتار رئولوژیکی خمیر خرما ی ایرانی و تعیین مدل رئولوژیکی مناسب



برای توصیف رفتار آن می‌باشد که می‌تواند در مباحث مهندسی تولید و نگه‌داری صحیح و مناسب این محصول مفید باشد. به طور دقیق‌تر اهداف موردانتظار از این پژوهش عبارتند از:

۱- بررسی رفتار مستقل از زمان خمیر خرما به کمک مدل‌های رئولوژیکی مختلف و تعیین مناسب‌ترین مدل جهت توصیف این رفتار.

۲- بررسی رفتار جریان و اثر دما بر خصوصیات رئولوژیکی خمیر خرما و مطالعه‌ی وابستگی دمایی نمونه‌ها

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد

واریته‌ی خرما به نام مرداب سنگ از استان کرمان ایران جمع‌آوری شده و خمیر آن توسط شرکت صابری در مشهد تولید شد.

### ۲-۲- آزمون‌ها

#### ۲-۲-۱- آزمون‌های شیمیایی

مواد جامد محلول (بریکس) توسط یک رفرکتومتر دستی (مدل  $PAL-\alpha$  آتاگو کره) و مواد جامد کل (TS) توسط روش خشک کردن تحت خلأ در دمای  $70^{\circ}C$  درجه‌ی سانتیگراد به مدت ۴۸ ساعت و در فشار ۲۵ میلی‌متر جیوه اندازه‌گیری شد. pH نمونه‌ها هم توسط یک pH متر (مدل جنوی 3020 انگلستان) آنالیز شدند.

#### ۲-۲-۲- اندازه‌گیری ویژگی‌های جریان

اندازه‌گیری پارامترهای رئولوژیکی با استفاده از ویسکومتر دورانی (مدل بوهلین، ویسکو ۸۸، بریتانیا) مجهز به یک سیرکولاتور حرارتی (جولابو، مدل F12-MC، آلمان) انجام پذیرفت. برای تمام نمونه‌ها و در تمامی سطوح دمایی از هندسه نوع مخروط و صفحه (مخروط به قطر ۳۰ میلی‌متر و زاویه  $5^{\circ}$ ) استفاده گردید. نوع پروب مورد استفاده با توجه به دامنه‌ی ویسکوزیته‌ی نمونه انتخاب گردید. لازم به ذکر است که دستگاه ویسکومتر مجهز به نرم‌افزار کامپیوتری بوده، شرایط کاری دستگاه کاملاً قابل کنترل می‌باشد. از قابلیت‌های دستگاه ویسکومتر بوهلین می‌توان به ترسیم همزمان منحنی‌های سرعت برشی - تنش برشی و سرعت برشی - ویسکوزیته‌ی ظاهری اشاره نمود. همچنین دستگاه مذکور این قابلیت را دارد که آزمون ویسکومتری را در سرعت برشی ثابت با زمان اعمال برش متغیر و یا در دامنه‌های مختلفی از



سرعت برشی و با فواصل زمانی ثابت انجام دهد. همزمان با انجام آزمون ویسکومتری، تمامی داده‌های مربوطه از جمله سرعت برشی، تنش برشی، ویسکوزیته‌ی ظاهری، دمای آزمون، سرعت دورانی پروب اندازه‌گیری و همچنین تعداد نقاط آزمایشی (تعداد دفعات اعمال نیروی برشی) توسط دستگاه بر روی صفحه‌ی نمایش قابل پیگیری می‌باشد.

منحنی‌های جریان در ۴ سطح دمایی ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۷۰ درجه‌ی سانتیگراد با افزایش سرعت برشی از ۱۴ به ۵۰۰ S-1 تعیین شدند. سپس داده‌های تنش برشی در برابر سرعت برشی با ۶ مدل مشهور به نام‌های قانون توان (Power law) (معادله ۱)، پلاستیک بینگهام (Bingham plastic) (معادله ۲)، مدل هرشل بالکلی (Herschel-Bulkley) (معادله ۳)، مدل کاسون (Casson) (معادله ۴)، مدل سیسکو (Sisko) (معادله ۵) و مدل ووکادلو (Vocadlo) (معادله ۶) برازش شدند (۸).

جهت تعیین بهترین مدلی که قادر به توصیف ویژگی‌های جریان مستقل از زمان نمونه‌های خمیرهای خرما می‌باشد از ضریب تعیین (R2) به دست آمده از مدل‌های رئولوژیکی فوق‌الذکر استفاده شد.

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

که  $\tau$  تنش برشی (Pa) است و  $\dot{\gamma}$  سرعت برشی (S-1) و  $k$  ضریب قوام (Pa.sn) و  $n$  شاخص رفتار جریان (بدون بعد) است.

$$\tau = \tau_{0B} + \eta_B \dot{\gamma} \quad (2)$$

که  $\tau_{0B}$  تنش تسلیم بینگهام (Pa) و  $\eta_B$  ویسکوزیته‌ی پلاستیک بینگهام (Pa.s) است.

$$\tau = \tau_{0H} + k_H \dot{\gamma}^{n_H} \quad (3)$$

که  $\tau_{0H}$  تنش تسلیم هرشل بالکلی،  $k_H$  شاخص قوام مدل هرشل بالکلی و  $n_H$  شاخص رفتار جریان این مدل می‌باشد.

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{k_{0C}} + k_C \sqrt{\dot{\gamma}} \quad (4)$$

که  $k_{0C}$  و  $k_C$  به ترتیب عرض از مبدا و شیب منحنی  $(\dot{\gamma})^{0.5}$  در برابر  $(\tau)^{0.5}$  می‌باشند. از این رو تنش تسلیم

کاسون (Pa,  $\tau_{0C}$ ) و ویسکوزیته‌ی کاسون (Pa.s,  $\eta_C$ ) به ترتیب از مجذور عرض از مبدا و شیب خط محاسبه شدند

$$[\tau_{0C}=(k_{0C})^2, \eta_C=(k_C)^2].$$

$$\eta = \eta_{\infty} + k \dot{\gamma}^{n-1} \quad (5)$$

که  $\eta$  ویسکوزیته‌ی ظاهری (Pa.s) و  $\eta_{\infty}$  ویسکوزیته در سرعت برشی بالا است (Pa.s).

$$\tau = \left( \tau_0^{1/n_v} + k_v \dot{\gamma} \right)^{n_v} \quad (6)$$

که  $k_v$  شاخص قوام برای مدل ووکادلو است و  $n_v$  شاخص رفتار جریان این مدل می‌باشد.



همچنین بررسی تاثیر دما بر ویسکوزیته ی مواد غذایی نیمه جامد می تواند با مدل آرنیوس به خوبی قابل توصیف باشد:

$$\eta = \eta_0 \exp(E_a / RT) \quad (7)$$

که  $\eta_0$  ضریب ثابت یا ویسکوزیته در دمای بینهایت (Pa.s) است.  $E_a$  انرژی فعال سازی (KJ/Kmol) و  $T$  دمای مطلق (K) و  $R$  ثابت عمومی گازها (KJ/Kmol.K) می باشد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ویژگیهای شیمیایی خمیر خرما

نتایج ویژگی های شیمیایی نمونه های خمیر خرما در جدول ۱ آورده شده است.

#### ۳-۲- رفتار جریان

پارامترهای رئولوژیکی خمیر خرما در دماهای مختلف اندازه گیری و داده های تنش برشی - سرعت برشی خمیرهای خرما با مدل های رئولوژیکی مختلف بررسی شد (جدول ۲). از جدول مشاهده می شود که مدل سیکو و ووکادلو برای خمیر خرما در دماهای مختلف و در داده های رئولوژیکی قابل برازش نیستند. مدل های قانون توان و بینگهام در دماهای پایین به خوبی داده های رفتار جریان را برازش کردند ولی در دماهای بالا نمی توانند رفتار جریان را توصیف کنند. مدل هرش - بالکلی برای توصیف خمیر خرما در دماهای بالامناسب نبود. در حالی که مدل کاسون به خوبی داده های به دست آمده تنش برشی - سرعت برشی خمیر خرما را توصیف می کند. تنش تسلیم کاسون ( $\tau_{0C}$ ) با افزایش دما کاهش پیدا کرد. افزایش دما، تنش تسلیم بینگهام ( $\tau_{0B}$ ) و ویسکوزیته ی بینگهام ( $\eta_B$ ) را برای خمیر خرما کاهش داد (جدول ۲). مقادیر ویسکوزیته ی ظاهری نمونه ی خمیر خرما در سرعت های برشی مختلف در شکل ۱ به عنوان تابعی از دما نشان داده شده است. این شکل مبین رفتار رقیق شونده با برش (شل شونده یا سودوپلاستیک) خمیر خرما است. ویسکوزیته نمونه خمیر خرما با افزایش سرعت برشی کاهش یافت. کاهش ویسکوزیته با افزایش سرعت برشی به عدم درگیری زنجیره های ماکرومولکولی تحت اثر میدان برشی (هم راستا شدن با جهت برش) و همچنین شکستن احتمالی ساختار در محلول بستگی دارد. مقدار ویسکوزیته در سرعت برش پایین مسوول ایجاد قوام در فرآورده غذایی است (۶). در حالی که مقدار ویسکوزیته در سرعت برش بالا بیانگر ویسکوزیته ی فرآورده در مراحل مختلف فرایند است. از آن جا که ویسکوزیته ی محلول با افزایش سرعت برشی کاهش می یابد، کارایی پمپ کردن این گونه سیالات با افزایش سرعت جریان پمپ افزایش می یابد (۷). در شکل ۱، کاهش ویسکوزیته با افزایش دما مشاهده می شود. این رفتار ممکن است به دلیل افزایش در تحرک و جنبش ماکرومولکولها در صمغ دانه شاهی باشد که مقاومت کم تری به جریان را نشان می دهند.



همچنین سست شدن اتصالات بین مولکول‌های موجود در محلول در دماهای بالا نیز می‌تواند دلیل دیگری برای توضیح این رفتار باشد.

ال سماهی و همکاران (۲۰۰۶) ویژگی‌های رئولوژیکی پالپ خرما و کنسانتره خرما را آنالیز کردند. آن‌ها گزارش کردند که پالپ خرما یک سیال سودوپلاستیک است و نشان دادند که شاخص قوام  $K$  با افزایش میزان مواد جامد محلول عصاره به طور نمایی افزایش پیدا می‌کند و در دماهای بالاتر به سرعت کاهش می‌یابد. دما اثر کمی بر شاخص رفتار جریان ( $n$ ) نمونه‌های پالپ خرما می‌گذارد (۳). وابستگی ویسکوزیته به دما با استفاده از مدل آرنیوس مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲ رفتار مدل آرنیوس را بین داده‌های ویسکوزیته ی ظاهری و عکس دمای مطلق نشان می‌دهد. شکل نشان می‌دهد که تغییر در ویسکوزیته ی ظاهری با دما از مدل آرنیوس تبعیت می‌کند. پذیرش خوبی ( $R^2$ ) همراه با رابطه ی خطی ملاحظه شد. انرژی فعال‌سازی نشان دهنده ی مانع (سد) انرژی است که باید قبل این که پروسه ی جریان ابتدایی اتفاق بیفتد، بر آن غلبه کند (۸). انرژی فعال‌سازی ( $E_a$ ) حساسیت ویسکوزیته به تغییرات دمایی را نشان می‌دهد.

ال سماهی و همکاران (۲۰۰۶) انرژی فعال‌سازی را برای پالپ خرما و کنسانتره خرما تعیین کردند و گزارش کردند که همچنان که مواد جامد محلول پالپ‌های خرما افزایش می‌یابد، انرژی فعال‌سازی افزایش می‌یابد. کنسانتره‌های خرما انرژی فعال‌سازی بیش تری را در مقایسه با مقادیر به دست آمده برای خمیرهای خرما نشان دادند. انرژی‌های فعال‌سازی مشاهده شده در این تحقیق بسیار بیش تر از پالپ‌های خرما در بریکس‌های ۱۵ و ۴۵ درجه و کم تر از کنسانتره‌های خرمایی بودند که توسط ال سماهی و همکاران (۲۰۰۶) گزارش شده بود.

داده‌های انرژی فعال‌سازی و  $\eta_0$  که در این پژوهش به دست آمدند هم بیش تر از داده‌هایی بودند که برای عصاره‌های تمبر هندی گزارش شده است (۲). به هر حال مقادیر ثابت‌ها با داده‌های حاصل از آنالیز نشاسته در غلظت ۴٪ و پکتین در غلظت ۵٪ بسیار نزدیک بودند (۵).

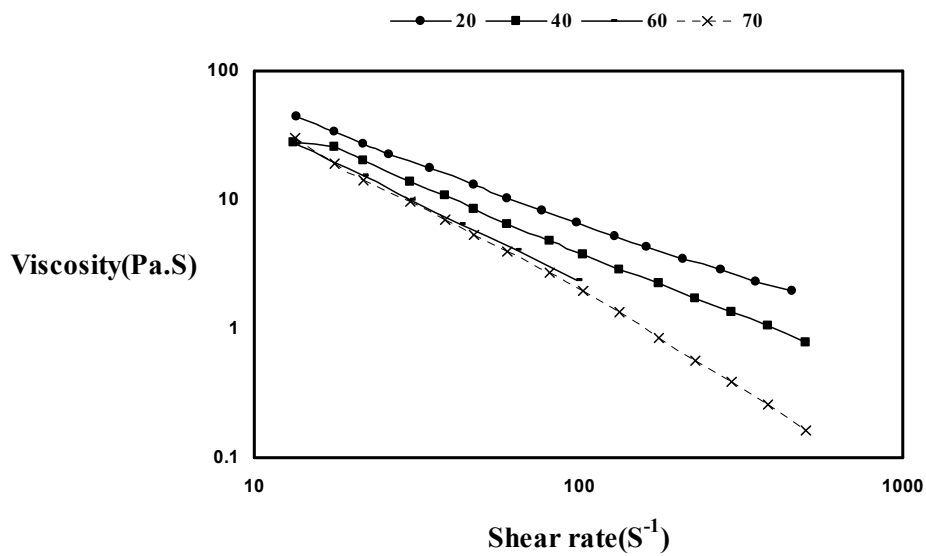
جدول ۱- نتایج آنالیز مواد جامد کل، مواد جامد محلول و pH

پارامترها	خمیر خرما
مواد جامد کل	۷۰/۵
مواد جامد محلول	۶۰
pH	۴/۸

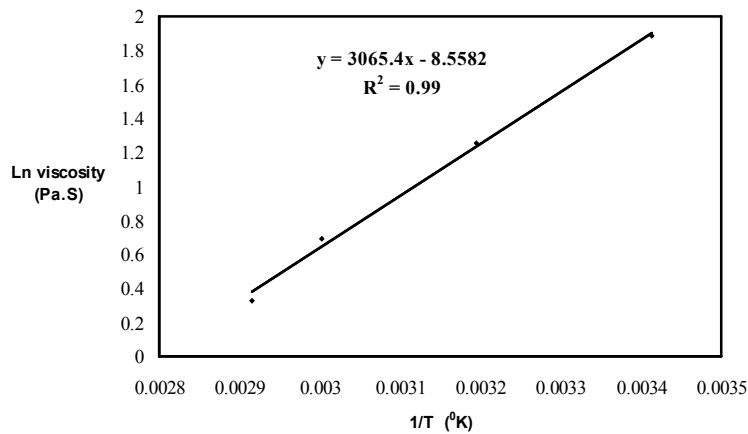
جدول ۲- پارامترهای رفتار جریان خمیر خرمای به دست آمده توسط مدل‌های رئولوژیکی در دماهای مختلف

مدل قانون توان			مدل هرشل-بالکلی			مدل کاسون			مدل بینگهام			دما	
$R^2$	n	k	$R^2$	nH	kH	$\tau_{0H}$	$R^2$	$\eta C$	$\tau_{0C}$	$R^2$	$\eta B$	$\tau_{0B}$	
۰/۸۷	۰/۱۰۸	۴۱۷/۴	۰/۹۹	۰/۹۰	۱/۴۲	۵۷۴/۰۶	۰/۹۷	۰/۰۹	۵۱۹/۰	۰/۹۸	۰/۶۹	۵۸۳/۷	۲۰
۰/۵۸	۰/۰۵۵	۴۴۸/۱	۰/۸۱	۰/۸۱	۱/۳۴	۲۵۹/۵	۰/۶۳	۰/۰۱	۴۱۷/۵	۰/۷۷	۰/۱۹	۴۰۸/۱	۴۰
F	F	F	F	F	F	F	۰/۶۶	۰/۰۹	۳۶۵/۳	F	F	F	۶۰
F	F	F	F	F	F	F	۰/۷۸	۰/۱۹	۲۷۰/۶	F	F	F	۷۰

F به معنای عدم توانایی توصیف مدل رئولوژیکی مورد نظر با داده‌های نمونه‌ها می‌باشد.



شکل ۱- داده‌های ویسکوزیته‌ی ظاهری - سرعت برشی خمیر خرما در دماهای مورد بررسی



شکل ۲- اثر دما بر ویسکوزیته‌ی خمیر خرما

(مقادیر انرژی فعال‌سازی در محدوده‌ی دمایی ۲۰-۷۰°C محاسبه شده است).



#### ۴- نتیجه گیری

خمیر خرما یک رفتار غیر نیوتنی از خود نشان داد. ارتباط بین ویسکوزیته و سرعت برشی غیرخطی بود. خمیرهای خرما رفتار شل شونده با برش و سودوپلاستیک از خود نشان دادند. بهترین مدلی که در تمام دماها نمونه‌ها را توصیف کرد مدل کاسون بود. ویسکوزیته با افزایش دما کاهش می‌یابد.

#### ۵- منابع

- 1-Ahmed, J. and Ramaswamy, H. S. 2006. Physico-chemical properties of commercial date pastes (*Phoenix dactylifera*). *Journal of Food Engineering*, 76, 348–352.
- 2-Ahmed, J., Ramaswamy, H. S. and Sashidhar, K. C. 2007. Rheological characteristics of tamarind (*Tamarindus indica* L.) juice concentrates. *Lebensmittel- Wissenschaft und-Technologie (LWT)*, 40, 225–231.
- 3-El-Samahy, S.K., Abd El-Hady, E.A., Mostafa, G.A. and Youssef, K.M.2006. Rheological properties of date pulp and concentrate. *Proceedings of the 4th International Symposium on Food Rheology and Structure*, 583-584.
- 4-Lewis M.J.1990. *physical properties of foods and food processing systems*. Ellis Horwood limited, England
- 5-Marcotte, M.and Ramaswamy, H.S. 2001. Rheological properties of selected hydrocolloids as a function of concentration and temperature. *Food Research International*, 34, 695-703.
- 6-Morris, E.R., and Taylor, L.J. 1982. Oral perception of fluid viscosity. *Progress in Food and Nutrition Science*, 6: 285-296.
- 7-Race, S.W. 1991. Improved product quality through viscosity measurement. *Food Technology*, 45: 86-88.
- 8-Rao, M.A., 1999. *Rheology of Fluids and Semisolid Foods: Principles and Applications*. Aspen Publishers. Gaithersburg. MD. USA, pp. 1-24.
- 9-Steffe, J.F.1996.*Rheological methods in food process engineering*. Freeman press, USA.