

## The Effect of Milling Process and Particle Size Distribution on the Rheological Properties and Structure of Sesame Paste

HOSSEIN KIANI<sup>1\*</sup>, AIDA SAATCHI<sup>2</sup>, NEGIN JAAFARI<sup>3</sup>, MOTAHAREH HAGHSHENAS<sup>4</sup>, MOHSEN LABBAFI<sup>5</sup>

1. Assistant Professor, Bioprocessing and Biodetection Lab (BBL), Department of Food Science and Technology, College of Agriculture and Natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2. PhD Student, Department of Food Science and Technology, College of Agriculture and Natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran
3. BSc Student, Department of Food Science and Technology, College of Agriculture and Natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran
4. BSc Student, Department of Food Science and Technology, College of Agriculture and Natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran
5. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, College of Agriculture and Natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: Feb. 5, 2019- Revised: Apr. 16, 2019- Accepted: Apr. 24, 2019)

### ABSTRACT

In this paper the effect of different milling processes (high shear blender, ceramic mill and ball mill, and stone mill) on the structure and size distribution of sesame paste particles was investigated and rheological properties of the resulting paste samples were analyzed. Sesame paste was a fluid suspension of protein–oil. The results indicated that the stone mill for 10 min in comparison to other mill processing can significantly affect on size reduction of the particles in sesame paste, improving the rheological properties and stability of the product. The results indicated that the colloidal stability of sesame paste was improved by decreasing the median particle size to values below 5  $\mu\text{m}$ . Shear thinning behaviors were observed for different sesame paste samples. Creep test showed that the elastic structure of sesame paste changed to a viscous behavior with decreasing particle size that was also related to the milling method. Whiteness (L-values) of sesame paste decreased with the reduction of particle size.

**Keywords:** Rheological properties, Mill, Stability, Sesame, Tahini

## اثر نوع فرایند آسیاب بر اندازه ذرات و ویژگی‌های رئولوژی و ساختاری ارده

حسین کیانی<sup>۱</sup>، آیدا ساعتچی<sup>۲</sup>، نگین جعفری<sup>۳</sup>، مطهره حق شناس<sup>۴</sup> محسن لبافی<sup>۵</sup>

۱. استادیار، آزمایشگاه زیست فراوری و زیست سنجش، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. دانشجوی دکتری، آزمایشگاه زیست فراوری و زیست سنجش، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. دانشجوی کارشناسی، آزمایشگاه زیست فراوری و زیست سنجش، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴. دانشجوی کارشناسی، آزمایشگاه زیست فراوری و زیست سنجش، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۵. دانشیار، آزمایشگاه زیست فراوری و زیست سنجش، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۶ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۲/۴)

### چکیده

در این مقاله اثر فرایندهای مختلف آسیاب دانه کنجد (پره‌ای، سرامیکی، ساچمه‌ای، و سنگی) بر ریزساختار، توزیع اندازه ذرات و ویژگی‌های رئولوژیکی ارده مطالعه گردید. ارده یک سیال سوسپانسیون بر پایه روغن بود و در آن ذرات حاوی پروتئین با شکل‌های مختلف در فاز پیوسته روغنی معلق بودند. فرایند آسیاب سنگی بزرگ در مقایسه با سایر روش‌های آسیاب کردن بر روی کاهش اندازه ذرات، بهبود خواص رئولوژیکی و پایداری ارده در سطح احتمال ۵٪ تاثیر معنی داری داشت. پایداری کلونیدی با کاهش اندازه متوسط ذرات به زیر ۵ میکرون بهبود یافت. رفتار رقیق‌شوندگی با برش برای همه نمونه‌های ارده دیده شد که به ساختار کلونیدی ذرات آسیاب شده مرتبط بود. آزمون خزش نشان داد که ساختار الاستیک ارده با کاهش اندازه ذرات به رفتار ویسکوز تغییر یافت و این رفتار وابسته به روش آسیاب کردن بود. میزان سفیدی ارده با کاهش اندازه ذرات کاهش پیدا کرد.

واژه‌های کلیدی: خواص رئولوژیک، آسیاب، پایداری، کنجد، ارده

### مقدمه

دانه کنجد یکی از مهمترین محصولات ناحیه استوایی است که در آسیا و آفریقا کشت می‌شود. در سال ۲۰۰۹ تولید جهانی دانه کنجد نزدیک به ۴ هزار تن بود. در آن سال بیشترین تولید مربوط به آسیا با تولید حدود ۲/۵ هزار تن و بعد از آن آفریقا با تولید حدود ۱/۳ هزار تن بود که به ترتیب ۶۲٪ و ۳۳٪ تولید جهانی را تشکیل دادند (Anilakumar et al., 2010). این محصول به عنوان منبع روغن به کار می‌رود و همچنین از دانه آن فراورده‌های مختلف مانند کنجد آسیاب شده تهیه می‌گردد.

در ایران از کنجد در تزئین فراورده‌هایی نظیر انواع نان‌ها، بیسکوئیت، کراکر و کیک، و یا در تهیه شیرینی‌جات مختلف استفاده می‌گردد. یکی از مصارف اصلی کنجد، تولید محصولاتی است که در آنها از ارده (کنجد آسیاب شده) استفاده می‌گردد. ارده یک غذای سنتی در ایران، ترکیه و کشورهای عربی است و به

دلیل میزان انرژی و ارزش تغذیه‌ای بالای آن، استفاده‌های گسترده‌ای به خصوص در فصل زمستان دارد. برای تولید ارده، دانه کنجد پوست‌گیری می‌شود و سپس قبل از استفاده در دمای ۱۲۰ تا ۱۵۰ درجه سلسیوس بو داده می‌شود. این کار سبب بهبود خصوصیات عملکردی و حسی محصول و همچنین طعم و رنگ می‌گردد. پوست‌گیری، مقدار زیادی از مواد ضد تغذیه‌ای موجود در پوست از قبیل اسید اگزالیک را کاهش می‌دهد، رنگ روشنتری ایجاد می‌کند و سبب کاهش طعم تلخ در محصول می‌گردد. خمیر کنجد یا همان ارده ارزش تغذیه‌ای بالایی دارد و حاوی چربی (۵۴-۶۵ درصد وزنی)، پروتئین (۲۷-۱۷ درصد وزنی)، کربوهیدرات (۴-۶/۲۱ درصد وزنی) و ویتامین‌هایی از قبیل تیامین، نیاسین و بعضی مواد معدنی از قبیل کلسیم، آهن و فسفر است (Elleuch et al., 2007).

ارده از آسیاب کردن دانه کنجد به دست می‌آید. از آنجایی

ترکیب شیره انگور به نسبت ۲۰-۳۲٪ با ارده در دماهای ۳۵-۶۵ درجه سانتی گراد بررسی کردند. اندیس جریان در محدوده ۰/۸۵-۰/۷ قرار داشت و ضریب قوام در محدوده  $282 \text{ mPas}$  -۲۸۲-۲۵۴۷ قرار داشتند. هر دو پارامتر به صورت قابل مشاهده‌ای تحت تاثیر دما قرار می‌گیرند. اثر دما بر روی اندیس جریان روند مشخصی ندارد ولی ارتباط ضریب قوام و دما به وسیله معادله آرنیوس توصیف می‌شود. انرژی فعالسازی نیز با افزایش غلظت شیره انگور در محدوده ۲۸۵۹۲-۱۳۳۶ ژول بر مول قرار داشت. انرژی فعالسازی حساسیت ویسکوزیته ترکیب را به دما نشان می‌دهد و افزایش غلظت ارده سبب افزایش انرژی فعالسازی می‌شود (Arslan *et al.*, 2005). در تحقیقی دیگر رفتار رئولوژیکی ترکیب ارده با چربی کاهش یافته و شیره خرما با استفاده از ویسکومتر چرخشی بروکفیلد بررسی شد و اثر جایگزین‌های چربی (صمغ گوار، صمغ گزانتان و نشاسته) در سه سطح و در دماهای ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد بررسی شد. همه نمونه‌های ارده و شیره خرما رفتار شبیه یک سیال غیر نیوتنی و سودوپلاستیک را در همه دماها و سطح‌های مختلف جایگزین چربی از خود نشان دادند. داده‌های تنش برشی در برابر سرعت برشی با مدل پاورلا متناسب بود. اندیس رفتار جریان (n) در محدود ۰/۵۱-۰/۳۵ و ضریب قوام (k) در محدوده  $240 \text{ Pas}$  -۲۴۰-۱۰۸ قرار داشت. علاوه بر این با افزایش غلظت جایگزین‌های چربی سبب افزایش ویسکوزیته در همه دماها در مقایسه با نمونه شاهد شدند، حضور جایگزین‌های چربی سبب افزایش ویسکوزیته و رفتار تیکسوتروپی مخلوط ارده و شربت خرما شد درحالی که اندیس جریان با افزایش غلظت جایگزین‌های چربی کاهش پیدا کرد. اثر نشاسته بر روی ضریب قوام در مقایسه با دو جایگزین چربی دیگر بیشتر بود. معادله آرنیوس اثر دما را توصیف کرده و نشان داد انرژی فعالسازی در محدوده ۲۴۳۳۰-۱۶۰۱۰ ژول بر مول قرار دارد، انرژی فعالسازی با قابلیت مالش‌پذیری محصول در ارتباط است و استفاده از جایگزین چربی این انرژی را در مقایسه با نمونه شاهد کاهش داد (Razavi *et al.*, 2007).

بهبود توزیع اندازه ذرات در سوسپانسیون‌ها اثر مثبتی در پایداری ذرات، پمپ کردن، مخلوط کردن و خصوصیات کیفیت حسی دارد (Alpaslan *et al.*, 2002). سرعت ته نشینی یکی از عوامل مهم در کیفیت و مطلوبیت ارده برای نگهداری است. خصوصیت فیزیکی همانند مساحت، قطر، شکل ذرات و ویسکوزیته در سرعت ته نشینی موثرند که به تحلیل این موارد اشاره خواهد شد هدف از این تحقیق این است اثر اندازه ذرات بر روی ساختار و رئولوژی ارده نهایی بررسی نماییم. استفاده از روش‌های مختلف آسیاب کردن و تهیه ارده با اندازه ذرات متفاوت از

که این دانه حاوی مقادیر بالایی روغن است، آسیاب سبب خروج روغن از بافت دانه و قرار گرفتن آن در فاز پیوسته می‌گردد. ذرات آسیاب شده دانه در روغن معلق می‌شوند. خواص این سوسپانسیون به ویژگی‌های فاز پیوسته و ذرات پراکنده بستگی دارد. مهمترین مشکل صنعت ارده‌سازی، تولید و نگهداری محصول با قوام، پایداری، رنگ و بافت مناسب و پایدار است (Abu-Jdayil, 2004). همانطور که اشاره شد، ارده در واقع یک سوسپانسیون حاوی ذرات جامد معلق است و از لحاظ فیزیکی پایدار نمی‌باشد و در معرض جداسازی فاز در طول زمان قرار دارد. مشکل جدا شدن روغن در ارده بعد از تولید شروع می‌شود و در طی انبارداری افزایش پیدا می‌کند. این مشکل سبب می‌شود که مواد بسته بندی با روغن آغشته شوند، رنگ محصول تغییر کند و ذرات پروتئینی رسوب کنند. در تحقیقات و صنعت از افزودنی‌های مختلفی برای رفع این مشکل استفاده شده است ولی هنوز مشکل به صورت کامل برطرف نشده است (Guneser and Zorba, 2014). از سوی دیگر خصوصیات رئولوژیکی مخلوط‌های غذایی مورد توجه تولیدکنندگان محصولاتی که در آنها از ارده استفاده می‌شود و نحت مخلوط کردن، پمپ کردن و انتقال قرار می‌گیرد است. علاوه بر این، پایداری انبارداری در طولانی مدت و بافت مرتبط با احساس دهانی تحت تاثیر رفتار رئولوژیکی محصول قرار می‌گیرد و اهمیت زیادی در مقبولیت مصرف کننده دارد. بنابراین با شناخت رئولوژی محصول می‌توان مواد و تجهیزات مورد نیاز برای طراحی و فراوری محصول را پیش بینی نمود (Çiftçi *et al.*, 2008). در تحقیقات قبلی خصوصیات رئولوژیکی ارده در محدوده دمایی ۲۰-۷۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت برشی  $500 \text{ s}^{-1}$  -۵۰۰ بررسی شد. حلقه هیستریسیس در اولین مرحله از منحنی جریان دیده شد. در تنش برشی ثابت رفتار ارده سودوپلاستیک بود و به وسیله مدل قانون پاور تعریف شد. مطالعات این محقق نشان داد که رئولوژی ارده به خصوصیات و میزان فاز پیوسته و ذرات پراکنده (روغن و ذرات جامد) و اندازه ذرات بستگی دارد. وقتی میزان ذرات جامد زیر ۲۰٪ است، اندازه ذرات تاثیری روی ویسکوزیته مخلوط حاصل ندارند (Altay *et al.*, 2005). در تحقیقی دیگر خصوصیات رئولوژیکی ترکیب ارده و شیره با غلظت‌های ۲، ۴، ۶٪ در دماهای ۳۰-۴۰-۵۰-۶۰-۷۵ درجه سانتی‌گراد بررسی شد. تمام ترکیبات خصوصیت سودوپلاستیک از خود نشان دادند. میزان شیره انگور و دما روی ضریب قوام و رفتار رئولوژیکی محصول تاثیر داشت. افزودن شیره انگور پایداری امولسیون را افزایش داد. بالاترین نمره مقبولیت کلی از لحاظ ارزیابی حسی و پایداری به ترکیب ۶٪ شیره انگور داده شد (Alpslan *et al.*, ۲۰۰۲). در مقاله‌ای مشابه خصوصیات رئولوژیکی

مختلف تصاویر به دست آمده فاکتور \*L ( نشان دهنده روشنی و تیرگی می باشد و هر بیشتر باشد بیانگر روشن تر بودن نمونه است) خوانده شد. فاکتور فوق برای همه نمونه‌ها در سه تکرار اندازه‌گیری شد.

#### اندازه‌گیری اندازه ذرات

میکروسکوپ نوری برای بررسی ریزساختار نمونه های ارده مورد استفاده قرار گرفت. آنالیز اندازه ذرات با استفاده از پردازش تصویر در سه تکرار انجام شد. جهت انجام این آزمون بعد از تهیه نمونه های ارده، به نسبت یک به ده با روغن کنجد رقیق گردید و سپس ۱۰ میکرولیتر از آن در اسلاید میکروسکوپ قرار گرفت و سپس با لامل پوشانده شد. در نهایت تصاویر ذرات با بزرگنمایی ۴۰ مشاهده شد. در حقیقت اندازه ذرات مشاهده شده توسط برنامه Image pro plus بر اساس میانگین سطحی قطر (d3,2) و میانگین حجمی قطر (d4,3) گزارش شد:

$$d_{3,2} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \quad d_{4,3} = \frac{\sum n_i d_i^4}{\sum n_i d_i^3} \quad (\text{رابطه ۲})$$

#### روش انجام آزمون‌های رئولوژیکی

کلید آزمون های رئولوژیکی توسط دستگاه رئومتر مدل R/S Plus با رئومتري cc40 یا استوانه متحد المركز به قطر ۴۰ میلی متر و طول ۵۵ میلی متر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای نمونه ها انجام شد.

#### آزمون رفتار جریان

جهت دستیابی به ویژگیهای جریان پایا، ۵۰ میلی لیتر از نمونه تحت نرخ برش (s<sup>-1</sup>) ۱۰۰-۰ قرار گرفت و روند تغییرات تنش به نرخ برش بررسی شد. در آزمایشات رئولوژیک پایا وابستگی ویسکوزیته ظاهری به نرخ برش مورد بررسی قرار گرفت. از نمودارهای به دست آمده در این آزمون ویسکوزیته ظاهری، ضریب قوام و اندیس جریان برای هر نمونه تعیین شد. برای انطباق داده های حاصل از آزمون رفتار جریان از مدل هرشل بالکی بر اساس رابطه زیر استفاده شد.

$$\tau = K\gamma^n + ss0 \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این رابطه  $\tau$  تنش برشی (Pa)،  $ss0$  تنش تسلیم (Pa)،  $\gamma$  نرخ برشی (s<sup>-1</sup>)،  $k$  ضریب قوام (Pa.s<sup>-1</sup>) و  $n$  اندیس جریان می‌باشد. پارامترهای به دست آمده از برازش مدل، مورد بررسی قرار گرفتند.

#### آزمون خزش ( تغییرات کرنش بر حسب زمان)

در آزمون خزش به نمونه مورد بررسی، تنش ثابت وارد می‌شود و میزان تغییر شکل در نمونه با گذشت زمان ثبت می‌شود. به تغییرات کرنش ( یا تغییر شکل) در یک ماده با گذشت زمان و

مواد اولیه یکسان با خصوصیات شیمیایی مشابه تاثیر زیادی روی خصوصیات رئولوژیکی ارده می‌گذارد. در نتیجه از نقطه نظر عملی کنترل مرحله آسیاب کردن تهیه ارده نقش مهمی برای محققین غذا و تکنولوژیست‌ها جهت بهبود پایداری ارده بدون استفاده از افزودنی‌ها و یا امولیسفایرها خواهد داشت.

#### روش آزمون

##### تهیه نمونه:

ابتدا دانه کنجد به صورت مکانیکی پوست‌گیری شد و در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بو داده شد و با استفاده از آسیاب‌های مختلف، آسیاب شد تا خمیر کنجد به دست آید. در نمونه‌های ۱ تا ۳ خمیر کنجد با استفاده از همزن پره ای با زمان‌های مختلف شامل ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه آسیاب شد. نمونه ۴ با استفاده از آسیاب سرامیکی و در نهایت با آسیاب ساچمه ای به مدت ۱۰ دقیقه، آسیاب شد. نمونه ۵ و ۶ با آسیاب سنگی بزرگ با سرعت کم آسیاب شدند که یکی با سنگ آسیاب نو و دیگری با سنگ آسیاب با دو سال کارکرد به مدت ۱۰ دقیقه فراوری شدند. (Muresan et al., 2013).

اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پروتئین استخراجی میزان رطوبت با استفاده از روش آون با فشار اتمسفری در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد، پروتئین با استفاده از روش کلدال، اسیدیته، خاکستر با استفاده از روش کوره در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، چربی با استفاده از روش سوکسله و استخراج با هگزان، میزان نمک و پراکسید ارده ها بر اساس روش استاندارد تعیین شد. همه موارد ذکر شده در بالا در سه تکرار انجام شده و نتایج به صورت میانگین  $\pm$  انحراف از استاندارد بیان شده است (AOAC, 2002; 1937, AOCS, 1997a, b, 2000).

#### پایداری کلوئیدی

مقدار ارده درون فالكونهای به قطر ۲ سانتی‌متر و طول ۱۰ سانتی-متر ریخته شده و میزان روغن اندازه‌گیری نمونه‌ها طی ۹۰ روز نگهداری در دمای اتاق اندازه‌گیری شده و میزان پایداری نمونه‌ها با استفاده از معادله زیر تعیین شد (Wu, 2001).

(رابطه ۱)

$$\text{پایداری کلوئیدی (\%)} = \frac{\text{ارتفاع کلی} - \text{ارتفاع فاز روغنی}}{\text{ارتفاع کلی}} \times 100$$

#### اندازه‌گیری رنگ

جهت انجام آزمون رنگ سنجی از روش پردازش تصویر استفاده شد. نمونه ارده به میزان معین در جایگاه مخصوص قرار گرفت و توسط دوربین دیجیتال اسکن شد. جهت جلوگیری از تداخل نور محیطی، درب جایگاه مورد نظر بسته شد. سپس از چهار نقطه

جهت تعیین معنی داری در هر مرحله زمانی بین نمونه‌ها از آنالیز واریانس یک طرفه (ANOVA) استفاده شد. کلیه آزمون‌ها در سه تکرار انجام شد.

## نتایج و بحث

### ترکیبات شیمیایی ارده

خصوصیات شیمیایی ارده در جدول ۱ نشان داده شده است. قابل ذکر است که ترکیبات شیمیایی ارده تحت تاثیر تکنولوژی تولید قرار می‌گیرد. برای مثال (El-Adawy *et al.*) در سال ۲۰۰۰ گزارش کرد که میزان روغن خام ارده بر اساس وزن با توجه به انواع فرایندهایی حرارتی مورد استفاده برای برشته کردن متفاوت است. در این مطالعه همه نمونه‌ها خصوصیات شیمیایی یکسانی نشان دادند زیرا همه نمونه‌ها تحت شرایط یکسان برشته کردن قرار داشتند. همان طور که مشاهده می‌کنید میزان رطوبت ارده کمتر از ۱٪ است زیرا در طی حرارت رطوبت دانه کنجد کاهش یافته و رطوبت پایین سبب می‌شود از نظر میکروبی محصول نهایی پایدار بماند.

تحت تاثیر یک تنش ثابت خزش می‌گویند. در این پژوهش برای بررسی خصوصیات ویسکوالاستیک نمونه‌های ارده، آزمون خزش توسط دستگاه رثومتر R/S Plus انجام شد. به گونه‌ای که در این آزمون تنشی به میزان ۲ پاسکال به مدت ۳۰۰ ثانیه ثابت نگه داشته شد و سپس در مرحله بازیافت خزش تنش برداشته شده و در مدت ۳۰۰ ثانیه روند تغییرات به زمان مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های تغییر شکل و زمان حاصل از آزمون خزش برای هر نمونه در مدل مکانیکی برگر بر اساس رابطه ۴ برآورد شده و ضرایب  $G_0$ ،  $G_1$ ،  $\mu$  با استفاده از نرم افزار مطلب ۲۰۱۰ حاصل شد.

رابطه ۴)  $f(t) = \left( \left( \frac{2}{G'} \right) + \left( \frac{2}{G''} \right) * \left( 1 - \exp \left( -t \text{Data} * \left( \frac{G''}{\mu} \right) \right) \right) \right)$   
این روابط بیانگر تغییر شکل کلی،  $G'$  مدول الاستیک،  $G''$  مدول تاخیری و  $\mu$  ویسکوزیته نیوتنی در تنش برشی صفر می‌باشد.

### روش آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم افزار مینی تب ۱۶ و در سطح معنی داری  $p < 0.05$  انجام گرفت.

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی ارده مورد استفاده

نمونه	پروتئین (%)	رطوبت (%)	چربی (%)	خاکستر (%)	نمک (%)	اسیدیته برحسب (اسید اولئیک) (میلی اکی والان بر کیلوگرم)	پراکسید
ارده	۱۹/۰±۵/۳۵	۰/۰±۸۹/۰۳۵	۳۳/۰±۲/۲	۲/۰±۵/۰۵	۰/۰±۱۶/۰۱۲	۰/۰±۱/۰۲	۱/۰±۲۹/۴

جدول ۲- اندازه ذرات و پایداری کلئیدی ارده تحت شرایط مختلف آسیاب بعد از ۹۰ روز در دمای اتاق

نمونه	$d_{3,2}$ (میکرومتر)	$d_{4,3}$ (میکرومتر)	پایداری کلئیدی (%)
۱	۲۲/۰±۴۳/۳۴ <sup>a</sup>	۲۴/۰±۵۲/۴۸ <sup>a</sup>	۲±۵۹/۴۴
۲	۱۱/۰±۹۲/۲۶ <sup>b</sup>	۱۳/۰±۴۸/۳۱ <sup>b</sup>	۲±۶۵/۹۴
۳	۱۰/۰±۶۶/۲۱ <sup>b</sup>	۱۲/۰±۰۲/۲۶ <sup>b</sup>	۳±۷۳/۶۴
۴	۴/۰±۷۸/۱۶ <sup>c</sup>	۵/۰±۱۶/۱۹ <sup>c</sup>	۵±۸۶/۱۰
۵	۳/۰±۳۴/۱۳ <sup>d</sup>	۳/۰±۸۹/۱۸ <sup>d</sup>	۴±۹۰/۵۵
۶	۲/۰±۰۹/۰۷ <sup>e</sup>	۲/۰±۷۶/۰۷ <sup>e</sup>	۵±۹۴/۹۵

اعدادی که در یک ستون با حروف متفاوت نشان داده شده اند تفاوت معنی دار با یکدیگر دارند ( $p < 0.05$ )

### تغییر رنگ

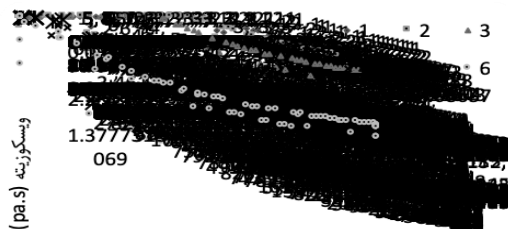
همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است با کاهش اندازه ذرات میزان روشنایی (L-value) کاهش یافت. میزان روشنایی برای ارده شماره ۶ با کوچکترین اندازه ذره برابر ۷۰ و برای ارده شماره ۱ با بزرگترین اندازه ذره برابر ۹۰ بود. رنگ ارده تحت تاثیر ترکیبات اصلی و حضور مواد رنگی (کاروتن، رنگدانه‌های سبز، کلروفیل) قرار دارد و با برشته کردن و پوست گیری روی رنگ اثر بیشتری دارند. ظاهر کلی غذا با ترکیب پراکندگی نور و پدیده

میزان چربی و پروتئین ارده‌های مورد مطالعه به ترتیب ۳۳٪ و ۱۹/۵٪ بر اساس وزن خشک گزارش شده است که به نوع واریته و شرایط آب و هوایی، تکنیک تولید بستگی دارد. میزان ترکیبات شیمیایی ارده مورد استفاده در این مطالعه با تحقیقات قبلی محققین دیگر هم‌خوانی خوبی دارد (Abou-Gharbia *et al.*, 1996). از آنجایی که برای همه فرایندها از یک منبع دانه استفاده شد، در نمونه‌های مختلف نتایج یکسان بود.

### پایداری کلئیدی

تفاوت در پایداری کلئیدی ارده با اندازه ذرات متفاوت در جدول ۲ داده شده است. همان طور که مشاهده می‌کنید کاهش اندازه ذرات پایداری کلئیدی را افزایش می‌دهد. کاهش اندازه ذرات پراکندگی فاز جامد در فاز روغنی و واکنش بین این دو فاز را بهبود می‌دهد و چسبندگی افزایش می‌یابد. در واقع ذرات با اندازه بزرگتر در میزان زیاد پایداری را در مقایسه با ذرات کوچکتر کاهش می‌دهند. نتایج مشابه‌ای نیز در تحقیقی دیگر که بر روی حلوا آفتابگردان انجام شده بود به دست آمد (Mureşan *et al.*, 2015).

علاوه بر این ویسکوزیته ظاهری برای همه نمونه‌ها با افزایش سرعت برشی کاهش یافته که نشان می‌دهد ارده‌های مورد مطالعه خاصیت سودوپلاستیک دارند. منحنی ویسکوزیته در برابر سرعت برشی در شکل ۳ نشان داده شده است.



سرعت برشی (s/1)

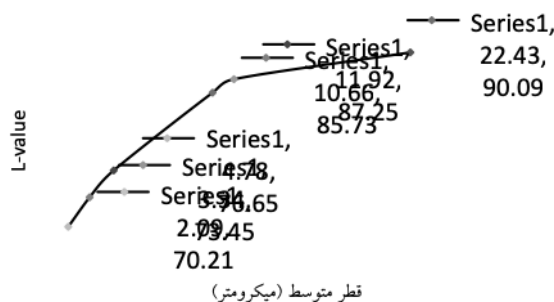
شکل ۳- تغییرات ویسکوزیته در برابر سرعت برشی نمونه‌های ارده ۱-۶

ویسکوزیته ظاهری با افزایش سرعت برشی کاهش می‌یابد. این کاهش با تخریب ناشی از نیروهای هیدرودینامیکی تولید شده در محصول نهایی، با افزایش سرعت برشی مرتبط می‌باشد. برش سبب تخریب شدید قطرات روغن شده و منجر به مقاومت کمتر در برابر جریان می‌گردد، بعد از کاهش سریع، تغییرات ویسکوزیته در سرعت برشی بالا متعادل می‌شود (Mohd Rozalli et al., 2015).

ضریب قوام (k) و اندیس جریان (n) با استفاده از داده‌های تنش برشی و سرعت برشی و مدل هرشل بالکی به عنوان تابعی از اندازه ذرات در شکل ۴ نشان داده شده است. ضریب رگرسیون ( $R^2$ ) به یک نزدیک بود و این مسئله تایید می‌کند که مدل هرشل بالکی برای توصیف رفتار جریانیه‌ها با اندازه ذرات متفاوت مناسب می‌باشد. ضریب قوام و اندیس جریان ارده‌های مطالعه شده به ترتیب بین  $0.63-2/5$  و  $0.77-0.94$  قرار داشتند. وقتی میزان این اندیس بین صفر تا یک قرار دارد اشاره به رفتار سودوپلاستیکی مایع دارد وقتی اندیس جریان برابر یک است یعنی محلول نیوتنی است هر چه اندیس جریان از یک کمتر باشد رفتار محلول از حالت نیوتنی فاصله می‌گیرد و به حالت شبه پلاستیک نزدیک می‌شود و خاصیت کشسانی محصول بیشتر می‌شود و سیال خاصیت روان‌شونده با برش بیشتری دارد. در واقع برای ایجاد یک ویسکوزیته بالا و احساس دهانی مطلوب میزان اندیس جریان کمتر مورد نیاز است.

افزایش تعداد دفعات آسیاب و کاهش اندازه ذرات ارده سبب کاهش ضریب قوام و اندیس جریان شد. در واقع ارده‌هایی که اندازه ذرات کوچکتری داشتند، ویسکوزیته کمتری نیز از خود نشان دادند. کوچک بودن ضریب قوام برای ارده‌های با اندازه ذرات

جذب تعیین می‌شود. پراکندگی و پخش نور مسئول کدورت و شفافیت و یا روشنایی یک امولسیون است در حالی که جذب مسئول رنگی شدن (قرمزی، آبی و سبزی و...) است. درجه پخش نور به وسیله امولسیون و یا کلونید به غلظت، اندازه و اندیس شکست ذرات بستگی دارد در حالیکه میزان جذب به غلظت و نوع ماده رنگی موجود بستگی دارد. مقدار زیاد ذرات کوچک و آزاد در نمونه‌های ارده جذب نور را افزایش می‌دهند. در کنار آن شدت برش بالا در طی آسیاب کردن گرمای زیادی ایجاد می‌کند که واکنش‌های قهوه‌ای شدن را افزایش می‌دهند (McClements, 2002).

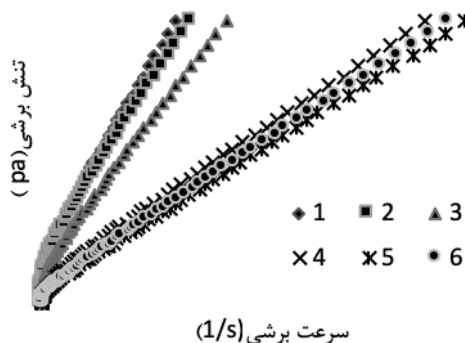


شکل ۴- تغییر شدت روشنایی ارده‌های تهیه شده با اندازه ذرات متفاوت

طبق تحقیقات گذشته ارده بین ۲۱-۶٪ کربوهیدرات دارد و واکنش قهوه‌ای شدن در آنها می‌تواند اتفاق بیافتد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که کاهش اندازه ذرات سبب تولید ارده با رنگ تیره‌تر می‌شود (Elleuch et al., 2007).

### خصوصیات رئولوژیکی

آنالیز رئولوژیکی نشان داد که ارتباط تنش برشی و سرعت برشی برای همه ارده‌ها با اندازه ذرات متفاوت غیر خطی بود که نشان می‌دهد ارده‌های مورد مطالعه به صورت یک سیال غیر نیوتنی رفتار می‌کند (شکل ۲).

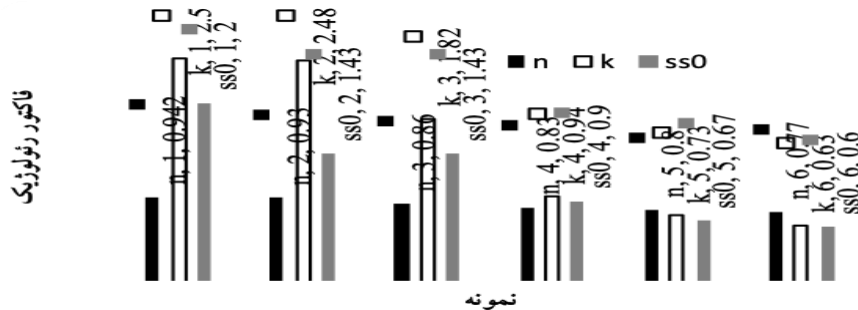


سرعت برشی (1/s)

شکل ۲- تغییرات تنش برشی در برابر سرعت برشی برای نمونه‌های ارده ۱-۶

پراکنده افزایش پیدا کرده بنابراین ذرات به طور موثرتری با جهت جریان همسو شده و فضای قابل دسترس‌تری برای این تغییر آرایش نیز وجود دارد (Razavi et al., 2007).

کوچکتر به این دلیل است که همان‌طور که میزان آسیاب کردن افزایش می‌یابد، شکستن سلولها اتفاق افتاده و میزان روغن بیشتری در فاز پیوسته آزاد می‌شود، نسبت فاز پیوسته به فاز



شکل ۴- پارامترهای مدل هرشل بالکی نمونه‌های ارده ۱-۶

مدل قانون هرشل بالکی می‌تواند به عنوان معیاری از گرانیوی مورد استفاده قرار بگیرد. سوسپانسیون‌های دارای شبکه سه بعدی از ذرات انبوهش یافته اغلب دارای تنش تسلیم هستند تنش تسلیم تنشی است که در تنش‌های بالاتر از آن ماده غذایی شروع به جریان می‌کند. این سوسپانسیون‌ها در زیر تنش تسلیم مانند جامد الاستیک و در بالای آن مانند مایع ویسکوز عمل می‌کند در بالای تنش تسلیم سوسپانسیون اغلب رفتار روان شونده با برش دارد و از دست دادن شکل نیز با افزایش نیروی برشی بیشتر می‌شود. بزرگی تنش تسلیم وابسته به قدرت نیروهای جذب کننده است که ذرات را در کنار هم نگه می‌دارد. هر چقدر نیروهای جذب کننده بیشتر باشد تنش تسلیم بالاتر نیز به دست می‌آید پس می‌توان گفت تنش تسلیم نشان دهنده بیشترین مقاومت اولیه در برابر جریان یافتن است و بنابراین دیسپرسیونی با تنش تسلیم بالاتر ساختار یافته‌تر و یا مستحکم‌تر از سایر دیسپرسیون‌ها است (Sengül et al., 2005). بررسی نتایج تنش تسلیم به دست آمده از مدل هرشل بالکی نشان می‌دهد که با کاهش اندازه ذرات تنش تسلیم کاهش پیدا کرده است و نمونه با اندازه ذرات بزرگتر تنش تسلیم بالاتری نسبت به نمونه با اندازه ذرات کوچکتر دارد.

آزمون خزش نمونه‌های ارده روش دیگری برای اندازه‌گیری ویژگی‌های ساختمانی ارده با اندازه ذرات متفاوت است. تغییر در مدول الاستیک ( $G'$ )، مدول تاخیری ویسکوز ( $G''$ ) و برای نمونه‌های ارده با اندازه ذرات متفاوت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد آزمایش شده‌اند. نمونه‌های ارده که ذرات بزرگتری داشتند  $G'$  بیشتری نسبت به  $G''$  نشان دادند که این خصوصیت مربوط به ویژگی الاستیک نمونه‌ها است.

بیشتر بودن مدول الاستیک نشان دهنده واکنش ذرات با

با توجه به اینکه اندیس جریان در این مطالعه کمتر از یک می‌باشد رفتار رقیق شونده‌ی ارده نیز قابل توصیف می‌باشد. هر چه اندیس جریان از یک بیشتر کوچکتر باشد نشان‌دهنده این است که سیال مورد مطالعه بیشتر از رفتار نیوتنی دور شده است. بنابراین ارده‌ها با اندازه ذرات کوچکتر و نرم‌تر رفتار سودوپلاستیکی بیشتری نسبت به ارده‌ها با ذرات خشن‌تر و بزرگتر از خود نشان دادند. به عبارت دیگر وقتی نمونه‌های ارده تحت سرعت برشی ۳۰-۱/۱ قرار می‌گیرند ویسکوزیته ارده‌های ذرات کوچکتر کاهش بیشتری نسبت به ارده‌های با اندازه ذرات بزرگتر پیدا می‌کنند. در واقع ارده با ذرات کوچکتر میزان کاهش بیشتری در مقاومت به جریان دارند و یا خاصیت سودوپلاستیسته بیشتری دارند ( $n < 1$ ). سود وپلاستیسته بیشتر ارده با ذرات کوچکتر به این دلیل است که پروتئین آزاد بیشتری وجود دارند که درصد بیشتر جمعیت ذرات کوچک این نوع ارده را شامل می‌شوند.

در محلول غلیظ پروتئینی، وقتی سیال در حال استراحت است مولکولها به صورت منظم قرار می‌گیرند و هنگامی که محلول تحت شرایط برش قرار می‌گیرد رفتار جریانی آن تغییر می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت وقتی درصد زیادی از ذرات کوچک در یک محلول داریم میزان سودوپلاستیسته سیال بالا می‌رود. رفتار رقیق شونده‌ی ارده با یافته‌های محققان دیگر نیز همخوانی دارد (Alpaslan and Hayta, 2002; Kaya and Belibağlı, 2002). برای مثال (Arslan et al) در سال ۲۰۰۵ خصوصیت رئولوژیکی ترکیب شیره انگور و ارده در غلظت‌های مختلف ۲۰-۳۲٪ و ۶۵-۳۵ درجه سانتی‌گراد بررسی کرد و به این نتیجه رسید که همه نمونه‌ها خاصیت رقیق‌شونده‌ی با برش را در همه شرایط مورد آزمون نشان می‌دهند. ضریب قوام به دست آمده از

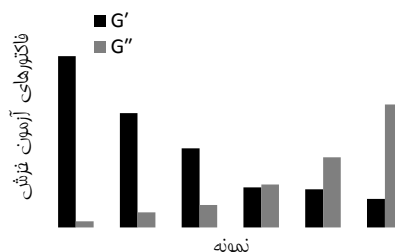
ارده با اندازه ذرات کوچکتر  $G''$  بزرگتری نسبت به  $G'$  داشت رفتاری شبیه محلول رقیق پلیمری از خود نشان دادند. روند مشابه ای برای محلول صمغ لوکاست و نشاسته ذرت نیز گزارش شده است (Alloncle and Doublier, 1991).

به عبارت دیگر نمونه های با اندازه ذرات بزرگتر خصوصیتی شبیه ژل بدون وابستگی به میزان نیروی وارد شده از خود نشان می دهند. به طور کلی در نیروهای پایین تر رفتار جریانی به وسیله حرکت مولکولها کنترل می شود و  $G''$  معمولا بزرگتر از  $G'$  است. و در نیروهای بالاتر میزان  $G'$  افزایش یافته که به دلیل تغییر شکل ماکرومولکولها می باشد.

### تصاویر میکروسکوپی

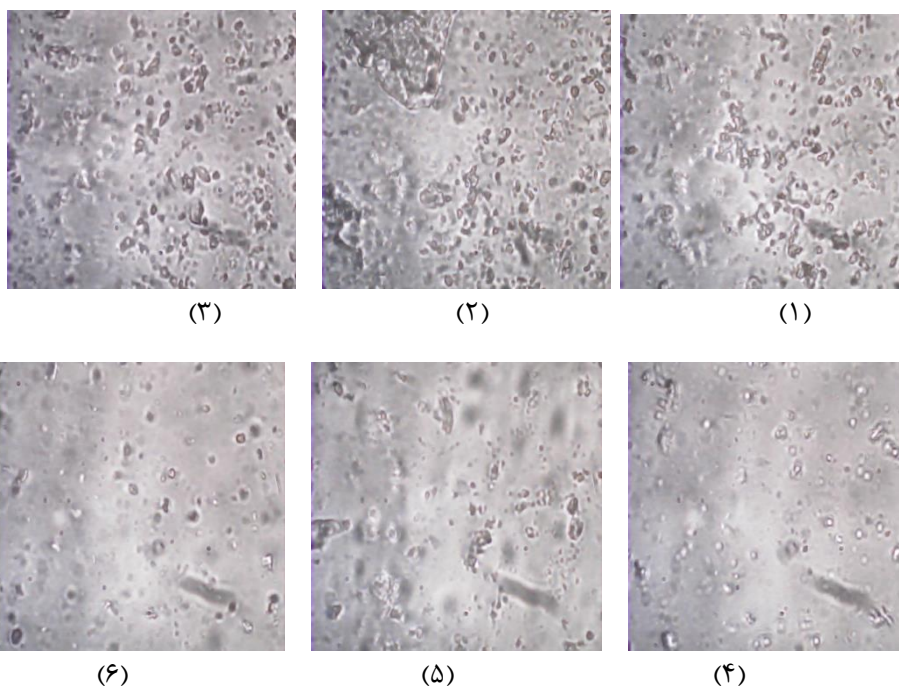
همان طور که در تصاویر شکل ۶ مشاهده می کنید، ذرات نمونه ۵ و ۶ ریزتر بوده ولی شکل ذرات بی نظم و غیر یکنواخت بوده، ذرات نمونه ۱ تا ۳ غیر یکنواختی بالایی داشته و نمونه ۴ ذرات یکنواختی مطلوبی داشته که همه موارد ذکر شده تاثیر نوع آسیاب را بر روی توزیع یکنواخت، شکل ذرات و اندازه ذرات نشان می دهد.

یکدیگر و یا با ساختمان شبکه ای در حالت پایدار می باشد و کاهش اندازه ذرات سبب می شود تا خصوصیت رئولوژیکی ارده از حالت الاستیک به ویسکوز تبدیل شود (Da Silva and Rao, 1992).



شکل ۵- تغییرات مدول الاستیک ( $G_0$ ) و مدول ویسکوز ( $G_1$ ) در نمونه های ارده شماره ۱-۶

ارده هایی با اندازه ذرات کوچکتر  $G''$  بزرگتری نسبت به مدول الاستیک داشتند که نشان دهنده رفتار ویسکوز این نمونه ها و شبیه شدن به مایع است. محلول رقیق، محلول غلیظ و ژل وقتی تحت تاثیر نیروی ثابتی قرار می گیرند هر کدام رفتار مشخصی از خود نشان می دهند و در این پژوهش از آنجایی که



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی نمونه های ارده شماره ۱-۶ با میکروسکوپ نوری و بزرگنمایی ۴۰

ارده قابل مشاهده بود. کاهش اندازه ذرات منجر به کاهش ویسکوزیته، ضریب قوام و اندیس جریان شد. نمونه های با اندازه ذرات کوچکتر خصوصیتی شبیه محلول پلیمری نشان داد در حالی که ارده های با اندازه ذرات بزرگتر خصوصیتی شبیه ژل های قوی از خود نشان دادند. رنگ ارده با کاهش اندازه ذرات تیره تر شد.

### نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان می دهد که ارده یک سوسپانسیون کلوئیدی است و اندازه ذرات نقش مهمی در پایداری این محصول ایفا می کنند. اندازه ذرات کوچکتر از ۵ میکرون پایداری کلوئیدی را افزایش می دهد. نتایج پایداری کلوئیدی با داده های رئولوژیکی مطابقت نشان داد. خصوصیت سودوپلاستیک برای همه نمونه های



برسام شیرینی سلامت به دلیل حمایت‌های مالی جهت انجام این پروژه کمال تشکر به عمل آورند.

## سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دارند از دانشگاه تهران و شرکت

## REFERENCES

- Abou-Gharbia, H., SHEHATA, A.A.Y., Youssef, M., Shahidi, F., (1996). Oxidative stability of sesame paste (tehina). *Journal of Food Lipids* 3(2), 129-137.
- Abu-Jdayil, B., (2004). Flow properties of sweetened sesame paste (halawa tehneh). *European Food Research and Technology* 219(3), 265-272.
- Alloncle, M., Doublier, J.-L., (1991). Viscoelastic properties of maize starch/hydrocolloid pastes and gels. *Food hydrocolloids* 5(5), 455-467.
- Alpaslan, M., Hayta, M., (2002). Rheological and sensory properties of pekmez (grape molasses)/tahin (sesame paste) blends. *Journal of Food Engineering* 54(1), 89-93.
- Anilakumar, K.R., Pal, A., Khanum, F., Bawa, A.S., (2010). Nutritional, medicinal and industrial uses of sesame (*Sesamum indicum* L.) seeds-an overview. *Agriculturae Conspectus Scientificus* 75(4), 159-168.
- AOAC, (2002). Official method 2001.11 protein (crude) in animal feed, forage (plant tissue), grain and oilseeds. *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*.
- AOAC, (1937). Official method 937.09 Salt (Chlorine as Sodium Chloride) in Seafood. *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*.
- AOCS, (1997a). Method Ai 2-75 moisture and volatile matter content applicable to sunflower seed. *Official Methods of Analysis of the American Oil Chemists Society*.
- AOCS, (1997b). Method Ba 5a-49 ash. *Official Methods of Analysis of the American Oil Chemists Society*.
- AOCS, (2000). Method Am 2-93 determination of oil content in oilseeds. *Official Methods of Analysis of the American Oil Chemists Society*.
- Arslan, E., Yener, M., Esin, A., (2005). Rheological characterization of tahin/pekmez (sesame paste/concentrated grape juice) blends. *Journal of Food Engineering* 69(2), 167-172.
- Çiftçi, D., Kahyaoglu, T., Kapucu, S., Kaya, S., (2008). Colloidal stability and rheological properties of sesame paste. *Journal of Food Engineering* 87(3), 428-435.
- Da Silva, J., Rao, M., (1992). *Viscoelastic Properties of Food Hydrocolloid Dispersions* en Rao MA. Steffe, JF.(Eds.) *Viscoelastic Properties of Foods* 285-315. Elsevier, London.
- Elleuch, M., Besbes, S., Roiseux, O., Blecker, C., Attia, H., (2007). Quality characteristics of sesame seeds and by-products. *Food chemistry* 103(2), 641-650.
- Guneser, O., Zorba, M., (2014). Effect of emulsifiers on oil separation problem and quality characteristics of Tahin Helva during storage. *Journal of food science and technology* 51(6), 1085-1093.
- Kaya, A., Belibağlı, K., (2002). Rheology of solid gaziantep pekmez. *Journal of Food Engineering* 54(3), 221-226.
- Mohd Rozalli, N., Chin, N., Yusof, Y.A., (2015). Particle Size Distribution of Natural Peanut Butter and Its Dynamic Rheological Properties. *International Journal of Food Properties* 18(9), 1888-1894.
- Muresan, V., Blecker, C., Danthine, S., Racolta, E., Muste, S., (2013). Confectionery products (halva type) obtained from sunflower: production technology and quality alterations. A review/Les produits de confiserie (type halva) obtenus à partir du tournesol: technologie de production et problèmes de qualité (synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 17(4), 651.
- Mureşan, V., Danthine, S., Bolboacă, S.D., Racolța, E., Muste, S., Socaciu, C., Blecker, C., (2015). Roasted sunflower Kernel paste (Tahini) stability: storage conditions and particle size influence. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 92(5), 669-683.
- Razavi, S.M., Najafi, M.B.H., Alaei, Z., (2007). The time independent rheological properties of low fat sesame paste/date syrup blends as a function of fat substitutes and temperature. *Food hydrocolloids* 21(2), 198-202.
- Sengül, M., Ertugay, M.F., Sengül, M., (2005). Rheological, physical and chemical characteristics of mulberry pekmez. *Food Control* 16(1), 73-76.
- Wu, Y.V., (2001). Emulsifying activity and emulsion stability of corn gluten meal. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 81(13), 1223-1227.