مطالعه رابطه بین خواص رئولوژیکی گلوتن و رفتار فارینوگرافی خمیر

سعید نقوی [۱]، سیدهادی پیغمبردوست [۲*]، مهدیه قمری [۳] و عارف اولاد غفاری [۴]

تاریخ دریافت: ۸۹/۳/۲۴ تاریخ پذیرش:۹۰/۲/۲۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، دانشگاه تبریز، پردیس بین المللی ارس، جلفا
۲- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز
۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز
۴- کارشناس ارشد اداره کل استاندارد و تحقیقات صنعتی استان آذربایجان شرقی، تبریز
* مسئول مکاتبه: Email: peighambardoust@tabrizu.ac.ir

چکیده

بررسی خصوصیات رئولوژیکی خمیر حاصل از آرد گندم با روش های متداولی چون آزمون فارینوگراف و اکستنسوگراف صورت می‌گیرد. این روش‌ها به مقدار نسبتاً زیاد آرد گندم وابسته اند که در مطالعات ژنتیکی که مقدار نمونه بسیار کم می‌باشد، قابل انجام نیستند. لذا وجود آزمونی که بتواند با حجم نمونه کم خصوصیات رئولوژیکی خمیر آرد گندم را پیش بینی کند ضروری به نظر می‌رسد. آزمون‌های رئومتری نوسانی خمیر نیازمند مقدار آرد کمتری بوده و می‌تواند اطلاعات مفیدی در رابطه با رئولوژی خمیر فراهم آورد. از آنجائی‌که که خصوصیات عمده خمیر نان توسط جزء گلوتن آرد گندم تعیین می گردد و با توجه به میزان کم نمونه مورد نیاز جهت استخراج و انجام آزمون رئومتری نوسانی ژل گلوتنین ماکروپلیمر (GMP)، این آزمون در مطالعه حاضر به عنوان معیاری برای بررسی خصوصیات رئولوژیک خمیر نان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده با نتایج آزمون فارینوگراف مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داند که همبستگی معنی داری ($\alpha<0/05$) بین شاخص های مدول الاستیک و تانژانت دلتا در آزمون رئومتری نوسانی ژل GMP با شاخص‌های فارینوگرافی نظیر زمان گسترش خمیر، پایداری خمیر و عدد کیفی فارینوگراف وجود دارند.

واژه‌ها ی کلیدی: آرد گندم، گلوتنین ماکرو پلیمر(GMP)، رئولوژی، فارینوگراف

Studying Relation between Rheological Properties of Gluten and Farinograph Behavior of Dough

S Naghavi[1], SH Peighambardoust[2*], M Ghamari[3], and A Olad Ghaffari[4]

Received: 14 June, 2010 Accepted: 11 May, 2011
[1] MSc Student, Department of Food Science, Aras International Campus, University of Tabriz, Jolfa, Iran
[2] Associate Prof., Department of Food Science, College of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[3] MSc graduated, Department of Food Science, College of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[4] Senior Researcher, Iran Standard and Industrial Research Institute (ISIRI), Eastern Azerbaidjan Standard Main Office, Tabriz, Iran
[*]Corresponding author: E-mail: peighambardoust@tabrizu.ac.ir

Abstract
Wheat dough rheological properties are usually studied using empirical tests such as farinograph and extensigraph methods. These methods require large amounts of flour sample, which is a restrictive factor in wheat genetic and breeding studies, where small amount of flour is available. Thus, suitable rheological tests are necessary which could predict or correlate large-scale rheological tests in one hand, and involve less amount of sample on the other hand. Dough oscillatory tests require small flour samples and provide useful information about dough rheology. Since, dough major properties are determined by gluten fraction, and considering the fact that that glutenin macro-polymer (GMP) test requires less amount of sample, in this study GMP rheological test was used for evaluation of dough rheology. Correlation between dough oscillatory test parameters with farinograph parameters was carried out. Results showed that there is a significant ($\alpha<0.05$) correlation between storage modulus, tan delta in GMP oscillatory test with Farinograph parameters such as dough development time, dough stability and Farinograph quality number.

Keywords: Wheat, Flour, Glutenin macro-polymer (GMP), Rheology, Farinograph

مقدمه

بررسی خصوصیات خمیر معمولاً در سه مقیاس مختلف انجام می شود. در مقیاس کوچک یا میکرو، ساختار ذرات گلوتنین در محدوده اندازه های ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر، در مقیاس میانی یا مزو، خصوصیات ریزساختاری خمیر با میکروسکوپ در محدوده ۱۰۰ تا۱۰۰۰ میکرومتر و در مقیاس بزرگ یا ماکرو تغییر شکل رئولوژیکی خمیر در مقیاس بیشتر از ۱۰۰۰ میکرومتر انجام می‌گیرد (پیغمبردوست، ۲۰۰۶). یکی از پر کاربرد ترین آزمون های رئولوژیکی خمیر در مقیاس بزرگ، آزمون فارینوگراف می‌باشد. در این آزمون بسته به نوع دستگاه فارینوگراف مورد استفاده، حجم نمونه آرد ۳۰۰، ۱۵۰ و در پیشرفته ترین و کم حجم ترین فارینوگراف ۱۰ گرم نمونه مورد نیاز است. این میزان حجم نمونه زیاد در مطالعات ژنتیکی یک معضل بوده و وجود آزمونی که بتواند با حجم نمونه کم خصوصیات رئولوژیکی خمیر را پیش بینی کند ضروری به نظر می‌رسد. آزمون های رئومتری نوسانی نیازمند حجم نمونه کمتری بوده و می‌تواند اطلاعات مفیدی در رابطه با رئولوژی خمیر فراهم آورد. اندازه-گیری وزن مرطوب ژل GMP، بررسی رفتار رئولوژیکی ژل بدست آمده و نیز بررسی توزیع اندازه

ذرات گلوتنین موجود در آن در قالب ویژگی‌های با تغییر شکل کوچک تلقی می‌گردد. دن و همکاران (۲۰۰۳ a، b) استفاده از خصوصیات ذرات گلوتنین به عنوان یک پارامتر کلیدی بین ژل GMP و کیفیت خمیر را پیشنهاد دادند. آنها معتقدند که همبستگی قوی بین خصوصیات فیزیکی GMP (وزن مرطوب و اندازه ذرات گلوتنین) و انرژی مخلوط کردن خمیر وجود دارد. با این حال، تا بدست آمدن اطلاعات بیشتر در مورد شکل گیری ساختار گلوتن، روش میکروسکوپی می‌تواند به طور مستقیم تغییرات خمیر در ساختار میانی (مزو) تحت فرآیند را به تصویر بکشد. محققان بسیاری ساختار خمیر در مقیاس میانی را با استفاده از میکروسکوپ الکترونی یا نوری مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که هر تغییری در مقیاس میکرو، بخوبی مقیاس مزو در خصوصیات ویسکوالاستیک خمیر و در نتیجه در رفتار رئولوژیکی خمیر در مقیاس ماکرو را تحت تأثیر قرار می دهد (آمند و بلیتز ۱۹۹۰، آمند و همکاران ۱۹۹۱، دن و همکاران ۲۰۰۳، پیغمبردوست و همکاران ۲۰۰۶). برخی محققان بررسی های رئومتری نوسانی خمیر و همچنین ژل GMP جدا شده از خمیر به روش غیر تخریبی اولتراسانتریفوژ را انجام داده اند (کوکتیت و همکاران ۲۰۰۵). قمری و همکاران (۱۳۸۷) وجود رابطه بسیار مطلوبی بین وزن مرطوب ژل GMP جدا شده از نمونه های کمتر از یک گرم آرد گندم و خواص نانوایی برخی از ارقام گندم-های ایرانی را گزارش کردند. در مطالعه حاضر خواص رئولوژیکی ژل GMP بدست آمده از ارقام گندم‌های ایرانی با کیفیت نانوایی متفاوت با خواص فارینوگرافی خمیر آنها مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش ها

نمونه های گندم

نمونه های گندم شامل ۱۳ رقم گندم ایرانی بود که از مرکز اصلاح بذر و نهال وزارت جهاد کشاورزی در کرج تهیه گردید. گندم ها از ۳ دسته ضعیف (سرداری، الموت، شیرودی، دز)، متوسط (هامون، آذر۲، مرودشت، داراب۲) و قوی (زرین، بزوستایا، انیبا، پیشتاز، تجن) انتخاب شده و توسط آسیاب آزمایشگاهی تا درصد استخراج ۷۵٪ آسیاب شدند.

استخراج GMP

برای انجام این آزمون از روش خراولند (۱۹۸۰) با اعمال اصلاحاتی به شرح ذیل استفاده شد. مقدار ۰/۱گرم نمونه آرد به اضافه ۱/۴ میلی لیتر محلول سدیم دودسیل سولفات (SDS) با غلظت ۱/۵ درصد وزنی حجمی در میکروتیوپ اپندورف ۱/۵ میلی لیتری ریخته شد. این تیوپ ها باید از لحاظ استحکام قوی بوده تا در دور بالای مورد استفاده در سانتریفیوژ نشکنند. ابتدا ۰/۷ میلی‌لیتر محلول SDS در میکروتیوپ ریخته شده، سپس آرد و بقیه محلول اضافه گردید. این کار جلوی کلوخه شدن و چسبیدن نمونه به جداره ها را می گیرد. سپس با استفاده از مخلوط کن ورتکس در شدت بالا ذرات آرد در محلول بخوبی پراکنده گردید. میکروتیوپ ها در دستگاه سانتریفیوژ (Beckman Avanti 30) ساخت کشور آمریکا، به مدت ۵۵ دقیقه در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد تحت شتاب g 40000 (۲۱۱۵۰ دور در دقیقه) سانتریفوژ شدند. محصول بدست آمده به صورت سه لایه به ترتیب (از بالا به پائین) مایع فوقانی (حاوی پروتئینهای محلول در SDS)، ژل GMP (پروتئین‌های ماکروپلیمری گلوتنین با وزن ملکولی بالا) قرار می گیرد. پس از خالی نمودن مایع فوقانی، ژل گلوتنین با استفاده از اسپاتول مخصوص به آرامی برداشته شده و به میکروتیوب های اپندورف از قبل توزین شده منتقل و تا زمان انجام آزمون های بعدی در یخچال نگهداری گردیدند.

آزمون رئومتری نوسانی ژل گلوتنین

اندازه گیری مدول الاستیک یا ذخیره (G')، مدول ویسکوز یا اتلاف (G") و تانژانت اتلاف یا دلتا (tan δ) ژل پروتئینی بدست آمده با روش دُن و همکاران (۲۰۰۵) انجام گرفت. برای این منظور مقدار دقیق یک گرم ژل خالص (بدون حضور ذرات نشاسته ای) به دقت وزن شده و در رئومتر نوسانی مدلUDS 200 ساخت شرکت Anton Paar Physica دارای دو صفحه

موازی به قطر ۲۳ میلی‌متر و فاصله یک میلی‌متر منتقل شده و آزمون روبش کرنش (sweep strain) در محدوده ۱ الی ۱۰۰٪ در دمای محیط (۲۶-۲۸ درجه سانتی‌گراد) انجام گردید. از جمله کاربردهای آزمون روبش کرنش تعیین محدوده ویسکوالاستیک خطی و تشخیص ژل های قوی از ضعیف می باشد. G' معرف خواص الاستیک (جامد بودن ژل)، G'' بیانگر خواص ویسکوز (مایع بودن) ژل و تانژانت دلتا برابر است با نسبت G'' به G' (ویسکوزیته به الاستیسیته) و معیاری از نسبت رفتار می‌باشد. بدین ترتیب که ارقامی با میزان تانژانت دلتای کمتر از ۴۵ درجه، بیشتر رفتار الاستیک و تانژانت دلتای بیشتر از ۴۵ درجه، رفتار ویسکوز را دارا می باشند (دن و همکاران، ۲۰۰۳).

آزمون فارینوگراف خمیر

این آزمون براساس روش AACC 21-54 با استفاده از دستگاه فارینوگراف با محفظه مخلوط کن ۳۰۰ گرمی ساخت شرکت برابندر آلمان انجام شد. پس از بررسی منحنی ها، شاخص‌های درصد جذب آب، مدت زمان گسترش خمیر، مدت زمان پایداری خمیر، درجه نرم شدن خمیر بعد از ۱۲ دقیقه و عدد کیفی فارینوگراف تعیین گردید.

نتایج و بحث

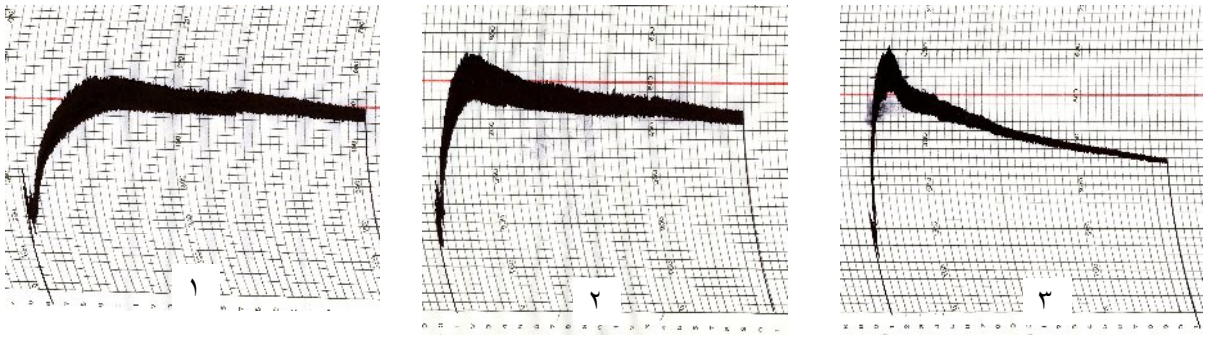
پس از انجام آزمون فارینوگراف منحنی های فارینوگرام بدست آمده و فاکتورهای مورد نظر از آنها استخراج شد (جدول ۱). به دلیل زیاد بودن تعداد منحنی‌ها، فقط سه منحنی فارینوگرام که نماینده ارقام قوی، متوسط و ضعیف می‌باشند در شکل ۱ نشان داده شده اند.

با انجام آزمون‌های رئومتری نوسانی مقادیر مدول الاستیسیته و تانژانت دلتا بدست آمد. از نتایج ۱۳ رقم گندم مورد مطالعه جهت کارهای آماری استفاده شد. در شکل ۲ نمودار مدول الاستیسیته (G') بازاء کرنش برای ژل GMP سه رقم گندم قوی (بزوستایا)، متوسط (هامون) و ضعیف (الموت) نشان داده شده است. با آزمایشات رئولوژیکی GMP ثابت شده که GMP رفتار ژل مانند دارد (شکل ۲). اگرچه در ژل GMP ، نشاسته وجود دارد ولی بکرز و همکاران (۲۰۰۰) ثابت کردند سختی ژل بطور کلی با اندازه و میزان برهمکنش‌های زیرشاخه های گلوتنین با وزن ملکولی بالا (HMWGS) تعیین می شود. مقدار G' نشان‌دهنده مدول الاستیسیته و ناحیه خطی آن بهترین وسیله برای طبقه بندی تکنولوژیکی در واریته های مختلف می‌باشد (دن و همکاران، ۲۰۰۳). همانند ژل‌های دیگر، هرچه میزان مدول الاستیسیته بیشتر و ناحیه خطی طولانی تر باشد، آن ژل قوی تر بوده و رقم گندم مربوطه خصوصیت الاستیسیته بیشتری را خواهد داشت. مطابق شکل۲، رقم قوی بزوستایا بیشترین مقدار و رقم ضعیف الموت کمترین میزان G' را بخود اختصاص داده است.

جدول ۱ خصوصیات فارینوگرافی آردهای مورد آزمون*

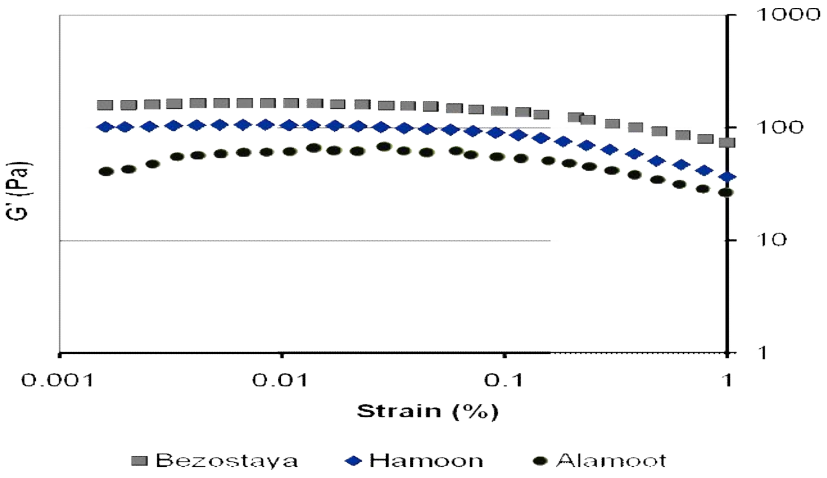
	ارقام گندم	جذب آب (%)		زمان توسعه خمیر (min)		ثبات (مقاومت) خمیر (min)		عدد کیفی فارینوگراف (بدون واحد)	
		میانگین	SD[1]	میانگین	SD	میانگین	SD	میانگین	SD
ضعیف	سرداری	۶۳/۰	۲/۰	۳/۵	۰/۴	۲/۵	۰	۵۲/۰	۱۱/۰
	الموت	۶۳/۱	۱/۵	۲/۰	۰	۱/۳	۰/۲	۲۳/۵	۰/۵
	شیرودی	۶۳/۵	۱/۴	۳/۰	۰/۴	۳/۰	۱/۵	۴۳/۳	۹/۲
	دز	۶۵/۸	۱/۹	۳/۰	۰	۳/۳	۰/۷	۴۶/۵	۱۰/۵
متوسط	هامون	۶۷/۴	۲/۴	۴/۰	۰/۳	۴/۰	۱/۶	۸۵/۵	۲۸/۵
	آذر۲	۶۳/۶	۰/۲	۲/۳	۰/۱	۲/۳	۰/۵	۸۵/۵	۲۸/۵
	مرودشت	۶۶/۴	۱/۱	۳/۰	۰	۳/۵	۱/۱	۴۴/۳	۴/۲
	داراب۲	۶۷/۹	۱/۵	۵/۰	۰/۱	۶/۵	۰/۶	۷۲/۰	۹/۰
قوی	زرین	۶۶/۷	۱/۲	۴/۸	۰/۳	۵/۵	۱/۰	۷۰/۰	۴/۰
	بزوستایا	۶۸/۹	۱/۲	۶/۰	۰/۶	۱۰/۰	۳/۶	۱۲۴/۰	۳۰/۰
	انیا	۶۱/۴	۰/۶	۵/۳	۰/۳	۷/۰	۰/۵	۷۱/۷	۱/۵
	پیشتاز	۶۸/۴	۱/۲	۵/۵	۰	۸/۳	۳/۲	۹۱/۵	۷/۵
	تجن	۶۱/۷	۱/۳	۵/۳	۰/۳	۱۰/۵	۱/۱	۱۰۵/۷	۱۱/۷

* داده های مربوط به ستون میانگین حاصل سه تکرار می باشند.



شکل۱. منحنی‌های فارینوگرام رقم گندم ۱) قوی (بزوستایا)، ۲) متوسط (هامون) و ۳) ضعیف (الموت).

[1] Standard deviation

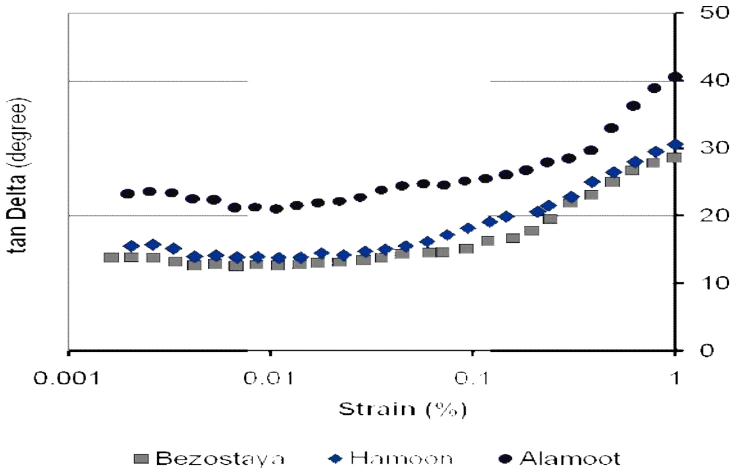


شکل ۲. تغییرات مدول الاستیسیته ژل GMP استخراج شده از سه رقم گندم قوی (بزوستایا)، متوسط (هامون) و ضعیف (الموت)

از آنجائیکه تانژانت دلتا معیاری از نسبت رفتار (نسبت ویسکوزیته به الاستیسیته) می‌باشد، بدین ترتیب ارقامی با میزان تانژانت دلتای کمتر از ۴۵ درجه، بیشتر رفتار الاستیک و تانژانت دلتای بیشتر از ۴۵ درجه، رفتار ویسکوز را نشان خواهند داد (دن و همکاران، ۲۰۰۳). با در نظر گرفتن اینکه قسمت اعظم پروتئین‌های موجود در ژل GMP پلیمری و منشعب می‌باشند، در هیچ یک از ارقام رفتار عمده‌ی ویسکوز مشاهده نشد و بیشترین مقدار ۴۰/۶ مربوط به رقم ضعیف الموت مشاهده گردید (شکل۳). مطابق نتایج تانژانت دلتا، ارقام بزوستایا و تجن قوی ترین و شیرودی، مرودشت و الموت ضعیف ترین ژل‌های GMP را بخود اختصاص دادند. میزان G' و تانژانت دلتا به اندازه و قدرت برهمکنش‌های ذرات گلوتنین وابسته است و با پایداری GMP مورد بررسی قرار می گیرد، در نتیجه می تواند به عنوان معیاری جهت بررسی نوع گلوتن محسوب گردد.

در جدول۲ مقادیر همبستگی آزمون‌های فارینوگرافی خمیر با آزمون‌های رئولوژیکی ژل GMP نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد مقادیر همبستگی این آزمون ها در سطح احتمال بسیار مطلوبی (۰/۰۱ و۰/۰۵) معنی دار بدست آمده است.

گرچه خصوصیات رئولوژیکی خمیر در طی مخلوط کردن ظاهر می‌شود، ولی این خصوصیات تحت تأثیر گلوتن و زیر واحدهای آن به ویژه زیرواحدهای گلوتنین با وزن ملکولب بالا (ماکروپلیمری) است. از آنجا که مقدار مدول الاستیسیته خصوصیت الاستیک نمونه را در تغییرشکل‌های کوچک نشان می‌دهد، افزایش مدول الاستیک اشاره به افزایش دانسیته شبکه گلوتن داشته و در این آزمون به طور اختصاصی اشاره به دانسیته بالا و وزن بیشتر پلیمر های گلوتنینی HMWGS دارد. مدول الاستیک برای آردهایی با گلوتن قوی در مقایسه با آرد های ضعیف بالاتر می‌باشد.



شکل ۳. تغییرات تانژانت دلتای ژل GMP استخراج شده از سه رقم گندم قوی (بزوستایا)، متوسط (هامون) و ضعیف (الموت)

جدول۲. همبستگی پارامترهای آزمون فارینوگرافی خمیر با پارامترهای آزمون رئومتری نوسانی ژل GMP

	مدول الاستیسیته	تانژانت دلتا	زمان توسعه خمیر	ثبات خمیر
مدول الاستیسیته				
تانژانت دلتا	-۰/۵۳۰**			
زمان توسعه خمیر	۰/۳۹۶*	-۰/۵۱۱**		
ثبات خمیر	۰/۴۴۱**	-۰/۴۰۵*	۰/۸۲۰**	
عدد کیفی فارینوگرافی	۰/۴۴۰**	-۰/۵۳۴**	۰/۷۰۶**	۰/۸۳۵**

رفتار ماکروسکوپی خمیر وابسته به ترکیبات و ساختار ریز (ترتیب فضایی اجزاء سازنده آن) است (بلوکسما، ۱۹۹۰). عده‌ای از محققان ثابت کردند رفتار رئولوژیکی خمیر گندم در تغییرشکل‌های بزرگ به وسیله بخش پلیمری گلوتن تعیین می‌شود (دوبروزچیک و مورگنسترن ۲۰۰۳، اسلینوینسکی و همکاران ۲۰۰۴، تورنسمو و همکاران ۲۰۰۳). همچنین گزارش شده است که رئولوژی خمیر در تغییرشکل‌های با مقیاس کوچک روش مناسبی برای غربالگری میان ترکیبات ساختاری شبکه گلوتن، پیوندهای شیمیایی، برهمکنش‌های فیزیکی (پیوندهای هیدروژنی، هیدروفوبیک یا برهمکنش‌های الکتروستاتیک) در مقابل درگیری‌های فیزیکی زنجیره های پلیمریک است (دوبروزچیک و مورگنسترن ۲۰۰۳، اسلینوینسکی و همکاران ۲۰۰۴، تورنسمو و همکاران ۲۰۰۳، ادواردز و همکاران ۲۰۰۱، پیغمبردوست و همکاران ۲۰۰۶).

بکرز و همکاران (۲۰۰۱) همبستگی قویی بین زمان توسعه خمیر و متوسط میزان G' ژل گلوتنین ماکروپلیمر جدا شده از آرد گزارش کردند. نتایج بدست آمده در این مطالعه حاضر با استفاده از حجم نمونه کمتر با انجام اصلاحات در روش استخراج ژل GMP ضمن تأیید نتیجه بکرز و همکاران (۲۰۰۱)، همبستگی های مطلوبی میان مقادیر مدول الاستیسیته و تانژانت دلتا با کلیه فاکتورهای فارینوگرافی از ژل

گلوتنین ماکروپلیمر جدا شده از کمتر از یک گرم آرد گندم را گزارش می‌کند.

سپاسگزاری

نگارندگان مقاله از دانشگاه تبریز به جهت حمایت مالی برای انجام این تحقیق تشکر می‌نمایند. نگارندگان همچنین مراتب سپاس خود را از جناب آقای مهندس کاووس رشمه کریم (آزمایشگاه تکنولوژی غلات موسسه اصلاح بذر و تهیه نهال وزارت کشاورزی کرج) به جهت کمک در تهیه نمونه های گندم و آرد برای این پژوهش اعلام می‌دارند.

منابع مورد استفاده

پیغمبردوست س ه، قمری م و فرج نیا ص. ۱۳۸۸. استخراج پروتئین‌های پلیمری گندم با روش اصلاح شده سانتریفیوژ. مجله پژوهش‌های صنایع غذایی، جلد اول، شماره ۱: ۸۷-۹۶.

قمری م، پیغمبردوست س ه، و رشمه کریم ک. ۱۳۸۷. GMP معیاری نوین در بررسی کیفیت آرد، هیجدهمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران، مشهد، ۱۳۸۷، مشهد.

قمری م، پیغمبردوست س ه، وطن خواه ا. ۱۳۸۷. تست ژل پروتئینی *SDS* به وسیله سانتریفوژ، برای پیش بینی حجم قرص نان، هیجدهمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران، مشهد، ۱۳۸۷ مشهد.

Amend T, and Belitz HD. 1990. Gluten formation studies by the transmission electron microscope. Zeitschrift Fur Lebensmittel-Untersuchung Und-Forschung 191: 184-193.

Amend T, Belitz HD, Moss R, and Resmini P. 1991. Microstructural studies of gluten and a hypothesis on dough formation. Food Structure 10: 277-288.

Bekkers ACAPA, Lichtendonk WJ, Graveland A and Plijter JJ. 2000. Mixing of wheat flour dough as a function of the physicochemical properties of the SDS-gel proteins. In: Shewry PR, Tatham AS, Eds. Wheat Gluten, Proceedings of the 7th International Workshop Gluten; Royal Society of Chemistry, Cambridge. pp. 408–412.

Bloksma AH. 1990. Rheology of the breadmaking process. Cereal Foods World 35: 228-236.

Dobraszczyk BJ and Morgenstern M. 2003. Rheology and the breadmaking process. Journal of Cereal Science 38: 229-245.

Don C, Lichtendonk WJ, Plijter JJ and Hamer RJ. 2003. Understanding the link between GMP and dough: from glutenin particles in flour towards developed dough. Journal of Cereal Science 38:157-165.

Don C, Lichtendonk WJ, Plijter JJ and Hamer RJ. 2003. Glutenin macro-polymer: a gel formed by glutenin particles. Journal of cereal Science 37:1-7.

Don C, Lichtendonk WJ, Plijter JJ, van Vliet T and Hamer RJ. 2005. The effect of mixing on glutenin-particle properties: aggregation factors that affect gluten function in dough. Journal of Cereal Science 41: 69-83.

Edwards NM, Peressini D, Dexter JE and Mulvaney SJ. 2001. Viscoelastic properties of durum wheat and common wheat dough of different strengths. Rheologica Acta 40: 142-153.

Graveland A. 1980. Extraction of wheat proteins with sodium dodecyl sulphate. Annual Technology Agriculture, 29: 113-123.

Kuktaite R, Larsson H, Marttila S and Johansson E. 2005. Effect of mixing time on gluten recovered by ultracentrifugation studied by microscopy and rheological measurements. Cereal Chemistry 82: 375-384.

Peighambardoust SH, van der Goot AJ, van Vliet T, Hamer RJ and Boom RM. 2006. Microstructure formation and rheological behaviour of dough under simple shear flow. Journal of Cereal Science 43, 183–197.

Peighambardoust SH. 2006. Development of dough under shear flow. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherland.

Sliwinski EL, Kolester P and van Vliet T. 2004. Large-deformation properties of wheat dough in uni –and biaxial extension. Part I. Flour dough. Rheologica Acta 43:306-320.

Tronsmo KM, Magnus EM, Baardseth P, Schofield JD, Aamodt A. and Faergestad EM. 2003. Comparison of small and large deformation rheological properties of wheat dough and gluten. Cereal Chemistry 80:587-595.