

## Effect of Ultrasound on Physicochemical Properties of Wheat Starch

Mahsa Majzoobi<sup>1\*</sup>, Negin Seifzadeh<sup>1</sup>, Asgar Farahnaki<sup>1</sup>, and Fojan Badii<sup>2</sup>

1. Department of Food Science and Technology, School of Agriculture, Shiraz University,  
Postal Code: 74441-65186, Shiraz, Iran

2. Agriculture Engineering Research Institute, Postal Code: 1439613311, Karaj, Iran

Received 21 April 2013, accepted 28 October 2013

### ABSTRACT

Application of ultrasound process is growing in food industry for different purposes including homogenization, extraction, blanching and removal of microorganisms, etc. On the other hand, starch is a natural polymer which exists in many foods or added into the food as an additive. Therefore, determination of the effects of ultrasound on starch characteristics can be useful in interpretation of the properties of starch-containing products. The main aim of this study was to determine the physicochemical changes of wheat starch treated by ultrasound waves. Therefore, an ultrasound probe device was used which ran at 20 kHz, 100 W and 22°C. Starch suspension in distilled water (30% w/w) was prepared and treated with ultrasound for 5, 10, 15 and 20 min. The results showed that increases in processing duration led to increases in water solubility of starch, water absorption and gel clarity (as determined by spectrophotometry). Starch intrinsic viscosity as measured using an Ostwald U-tube showed lower intrinsic viscosity with increases in ultrasound time. Gel strength of the samples as determined using a texture analyzer was reduced by longer processing time. The scanning electron microscopy revealed that increasing the duration time of the ultrasound treatment could produce some cracks and spots on the surface of the granules. In total, it was concluded that the ultrasound treatment resulted in some changes from the starch granular scale to molecular levels. Some of the starch molecules were degraded upon ultrasound processing. Such changes may be observed for the starch-containing foods treated with ultrasound and they are enhanced with increases in ultrasound time intervals.

#### Keywords:

ultrasound,  
ultrasound treatment,  
wheat starch,  
pitting,  
physicochemical properties

(\*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: [majzoobi@shirazu.ac.ir](mailto:majzoobi@shirazu.ac.ir)

# اثر امواج فراصوت بر خواص فیزیکوشیمیایی نشاسته گندم

مهسا مجذوبی<sup>۱\*</sup>، نگین سیف‌زاده<sup>۱</sup>، عسگر فرحناکی<sup>۱</sup>، فوزان بدیعی<sup>۲</sup>

۱- شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی، بخش علوم و صنایع غذایی، کد پستی ۷۴۴۴۱-۶۵۱۸۶

۲- کرج، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کد پستی ۱۴۳۹۶۱۳۳۱۱

دریافت: ۹۲/۲/۱، پذیرش: ۹۲/۸/۶

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،  
سال بیست و هفتم، شماره ۱،  
صفحه ۲۳-۱۵، ۱۳۹۳  
ISSN: 1016-3255  
Online ISSN: 2008-0883

## چکیده

استفاده از فرایند فراصوت در صنعت غذا برای همگن‌کردن، استخراج، آنزیم‌بری و از بین بردن میکروارگانیسم‌ها در حال افزایش است. نشاسته پلیمری است که به‌طور طبیعی در بسیاری از غذاها وجود دارد یا به عنوان افزودنی به غذا اضافه می‌شود. بنابراین، تعیین اثر فراصوت‌دهی بر خواص نشاسته می‌تواند در تفسیر خواص محصولات حاوی نشاسته مفید باشد. در این پژوهش، تغییرات فیزیکوشیمیایی نشاسته گندم عمل‌آوری شده با امواج فراصوت بررسی شد. بدین منظور، از دستگاه فراصوت کائوده با بسامد ۲۰ kHz و توان ۱۰۰ W در دمای ۲۲°C استفاده شد. تعلیقی از نشاسته (۳۰٪ وزنی) به مدت ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ min در معرض امواج فراصوت قرار گرفت. نتایج نشان داد، با افزایش زمان فراصوت‌دهی انحلال‌پذیری در آب، جذب آب و شفافیت ژل نشاسته افزایش یافت. تعیین گرانشی ذاتی که با لوله موئین استوالد اندازه‌گیری شد، نشان داد، گرانشی ذاتی در اثر افزایش زمان فراورش کاهش یافت. نتایج دستگاه بافت‌سنج نشان داد، با افزایش زمان فراورش استحکام ژل کاهش یافت. با استفاده از میکروسکوپی الکترونی پویشی مشخص شد، افزایش زمان عمل‌آوری با امواج فراصوت باعث ایجاد تعدادی شکاف و فرورفتگی‌هایی روی سطح گرانول‌ها شد. این تغییرات نمایانگر اثر امواج فراصوت بر خواص نشاسته در شرایط آزمون بود. در مجموع نتیجه‌گیری شد، فراصوت‌دهی می‌تواند از سطح گرانولی تا مولکولی نشاسته تغییراتی را ایجاد کند. برخی مولکول‌های نشاسته در اثر این فرایند دچار شکستگی شدند. این تغییرات با افزایش زمان فرایند تشدید شد.

## واژه‌های کلیدی

امواج فراصوت،  
عمل‌آوری با فراصوت،  
نشاسته گندم،  
حفره‌سازی،  
خواص فیزیکوشیمیایی

## مقدمه

نشاسته پلیمری از گلوکوز است که با پیوندهای آلفا یک به چهار و آلفا یک به شش به هم متصل شده و دو نوع پلیمر دیگر به نام‌های آمیلوز (به مقدار تقریبی ۲۵-۲۰٪) و آمیلوپکتین (با مقدار حدود ۷۵-۸۰٪) را ایجاد می‌کند که دو جزء اصلی سازنده نشاسته‌اند [۱،۲]. نشاسته به عنوان مهم‌ترین منبع ذخیره‌ای در گیاهان به‌ویژه غلات، حبوبات و گیاهان غده‌ای نظیر سیب‌زمینی مطرح است [۳،۴]. نشاسته کاربردهای بسیاری در صنایع مختلف از جمله غذایی، دارویی، شیمیایی، کاغذسازی و نساجی دارد. در بسیاری از محصولات، نشاسته به‌طور طبیعی (مثل غذاهای تهیه شده از غلات) وجود دارد، یا به عنوان افزودنی (مانند استفاده در تهیه سس‌های خوراکی) کاربرد دارد.

دلیل اصلی کاربردهای فراوان نشاسته مربوط به قابلیت آن به‌طور عمده در جذب آب و افزایش قوام، ایجاد بافت مناسب در محصولات مختلف و انرژی‌زایی در غذاهاست. خواص مختلف نشاسته به ساختار مولکولی آن از نظر نسبت آمیلوز به آمیلوپکتین، وزن مولکولی، درجه پلیمرشدن، منشأ نشاسته و مقدار سایر ترکیبات مانند چربی و پروتئین در آن بستگی دارد. همچنین به‌خوبی ثابت شده است، فرایندهایی که در تهیه محصولات حاصل از نشاسته به‌کار می‌روند، به‌طور عمده با اثر بر خواص مولکولی آن می‌توانند تغییرات قابل توجهی در خواص نهایی محصولات ایجاد کنند [۳،۴]. به عنوان مثال، در سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۰ به ترتیب Cheyne، Lewandowicz و Kim و همکاران اثر فرایندهای ریزموج، اکستروژن و اتوکلاو کردن را بر نشاسته‌های سیب‌زمینی، ذرت و سایر انواع آن بررسی کردند. نتایج نشان داد، در اثر هر سه فرایند تغییرات زیادی در ساختار و خواص نشاسته‌ها ایجاد شد [۵-۷]. از میان روش‌های جدید فرایند می‌توان به روش فراصوت‌دهی اشاره کرد. کاربردهای امواج فراصوت در فرایند مواد غذایی بسیار متنوع و متعدد است. این امواج به دلیل آثار مکانیکی، شیمیایی و زیست‌شیمیایی که در مواد غذایی ایجاد می‌کنند، می‌توانند فرایندهایی مثل آب‌گیری و فیلتر کردن، انجماد، یخ‌زدایی، غیرفعال‌سازی آنزیم‌ها و میکروارگانسیم‌ها، تبلور، استخراج، امولسیون کردن، همگن‌سازی، از بین بردن کف، خشک کردن، رسوب‌دهی و تغییر در گرانشی را بهبود داده و آسانی بخشند [۸].

طی فرایند فراصوت‌دهی، حرکت طولی موج صوتی به دلیل حرکت ارتعاشی مولکول‌های محیط به جلو و عقب، بدون اینکه سبب حرکت این لایه‌ها شود، فازهای متناوبی از انقباض و انبساط را ایجاد می‌کند. در نتیجه، در نقطه‌ای که لایه مولکول‌های ماده فشرده شدند، فشار بیشتر و در ناحیه کم تراکم، فشار کمتر از حد معمول می‌شود [۲]. در نتیجه شرایطی که در فاز انبساط پدید می‌آید، فشار منفی ایجاد شده و فاصله بین مولکول‌ها تا حدی زیاد می‌شود که بر

نیروی چسبندگی مایع غلبه کرده، مایع شکسته می‌شود و حفره‌هایی در آن به‌وجود می‌آید. این حفره‌ها را حباب‌های حفره‌سازی می‌نامند. در لحظه انقباض بعدی این حباب‌ها فشرده و منقبض می‌شوند و حجم آنها کاهش می‌یابد. در فاز انبساط، دوباره بزرگ می‌شوند و این روند در چند دوره انقباض و انبساط ادامه می‌یابد تا حباب‌ها به حداکثر حجم برسند. پس از آن، حباب‌ها در دوره انقباض بعدی، منفجر می‌شوند و به اصطلاح فرو می‌ریزند. فروریزی این حباب‌ها سبب ایجاد پیک‌های فشار و دما (تا فشار ۲۰۰۰ atm و دمای ۵۵۰۰ K) در مایع می‌شود. به‌طور معمول شوک ناشی از این فشار و دمای لحظه‌ای، عامل ایجاد آثار فراصوت است [۹].

در پژوهش‌های محدودی اثر فراصوت‌دهی بر خواص نشاسته بررسی شده است. برای مثال Czechowska-Biskupa و همکاران اثر فراصوت‌دهی با بسامد ۳۶۰ kHz را بر نشاسته ذرت و کیتوسان مطالعه کردند. نتایج نشان داد، فراصوت‌دهی باعث تجزیه مولکولی هر دو پلیمر شد [۱۰]. Luo و همکاران، اثر عمل‌آوری با امواج فراصوت را بر خواص فیزیکوشیمیایی نشاسته‌های ذرت با محتوای آمیلوزی مختلف بررسی کردند. در این پژوهش، الگوی به‌دست آمده از پراش پرتو X سه نمونه ذرت عمل‌آوری شده، تفاوتی با نمونه‌های شاهد نداشت. ضریب تورم، انحلال‌پذیری و دمای ژلاتینی شدن هر سه نوع نشاسته در اثر عمل‌آوری با امواج فراصوت افزایش یافت، در حالی که عامل سینرسیس نشاسته‌های طبیعی و مومی ذرت، آنتالپی ژلاتینی شدن و محدوده دمای ژلاتینی شدن در هر سه نوع نشاسته کاهش یافت. همچنین، کاهش محسوسی در گرانشی هر سه نوع نشاسته مشاهده شد، در حالی که الگوی گرانشی همه نشاسته‌ها بدون تغییر باقی ماند. داده‌ها نشان داد، فراصوت‌دهی نواحی بی‌شکل را تخریب می‌کند و به آمیلوزهای خطی خیلی راحت‌تر از آمیلوپکتین شاخه‌ای حمله می‌کند [۱۱]. همچنین، Jambrak و همکاران اثر فراصوت‌دهی را بر خواص فیزیکی نشاسته ذرت بررسی کردند و نتایج مشابهی با پژوهش پیشین به‌دست آوردند. این موضوع حاکی از تغییرات قابل ملاحظه در ساختار فیزیکوشیمیایی نشاسته ذرت پس از عمل‌آوری با امواج فراصوت بود.

تاکنون پژوهش‌های انجام شده در زمینه اثر فراصوت بر نشاسته گندم در شرایط مختلف بسیار محدود بوده است [۱۲]. همچنین، پیش‌تر Huang و همکاران اثر عمل‌آوری با امواج فراصوت را بر ساختار و واکنش‌دهی شیمیایی گرانول‌های نشاسته ذرت مطالعه کردند. Wang کاربرد امواج فراصوت با توان زیاد و مواد سطح‌فعال را در جداسازی نشاسته ذرت و خواص آن بررسی کرد. Chung و همکاران، خواص فیزیکوشیمیایی نشاسته‌های ماش سیاه (Mung bean)،

بود، منتقل و به مدت ۴ h در دمای ۱۲۰°C خشک شد. نمونه‌ها، پس از خشک شدن مجدداً وزن شدند و مقدار انحلال پذیری آنها با استفاده از معادله (۱) به دست آمد:

$$(1) \quad \text{وزن مایع رویی خشک شده} \times 100 = \frac{\text{وزن نشاسته خشک اولیه}}{\% \text{ انحلال پذیری}} \quad (1)$$

برای اندازه‌گیری مقدار جذب آب، لوله‌های مرکزگیز به همراه مواد رسوب کرده وزن و به کمک معادله (۲) مقدار جذب آب نمونه‌ها محاسبه شد:

$$(2) \quad \text{وزن رسوب درون لوله‌های مرکزگیز} = \frac{\text{وزن نشاسته خشک اولیه}}{\text{جذب آب (گرم آب/گرم نشاسته)}} \quad (2)$$

#### اندازه‌گیری گرانروی ذاتی

برای بررسی تغییرات مولکولی نشاسته در اثر عمل‌آوری با امواج فراصوت از آزمون تعیین گرانروی ذاتی استفاده شد [۱۸]. بدین منظور، ابتدا نمونه‌ها در حلال دی‌متیل سولفوکسید (DMSO) با غلظت ۹۰٪ در آب حل شدند. مقدار ۱ g / ۰/۱ نمونه نشاسته در لوله آزمایش شیشه‌ای درب‌دار ریخته شد و در مخلوط‌کن گردابی ساخت شرکت Fisher آمریکا، ۱۰ mL محلول ۹۰٪ از DMSO به آن اضافه و به مدت کوتاهی با دستگاه همزده شد. سپس، درب لوله‌ها بسته شد و به مدت ۲۴ h در دمای ۲۵°C در همزن رفت و برگشتی قرار داده شدند. پس از طی این زمان، نمونه‌ها به مدت ۱۰ min در حمام آب گرم ۹۵°C قرار گرفته و در طول این مدت دو بار با همزن گردابی مخلوط شدند تا مایع شفاف به دست آمد. لوله‌ها بلافاصله با آب سرد به دمای ۲۵°C رسانده شده و از محلول به دست آمده غلظت‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ mg/mL تهیه شد. برای اندازه‌گیری گرانروی از گرانروی‌سنج استوالد مدل ۵۱۸-۱۰، ساخت Schott-Gerate، آلمان استفاده شد که نوعی گرانروی‌سنج لوله مویین است. پس از به دست آوردن زمان عبور نمونه‌ها و حلال از بین دو نشانه گرانروی‌سنج، با داشتن چگالی نمونه‌ها و حلال، ابتدا از معادله (۳) گرانروی نسبی محاسبه شد:

$$(3) \quad \eta_{rel} = \eta / \eta_0 = (t / t_0) \cdot (\rho / \rho_0)$$

t زمان عبور نمونه، ρ چگالی نمونه، t<sub>0</sub> زمان عبور حلال و ρ<sub>0</sub> چگالی حلال است. سپس، به کمک گرانروی نسبی و از معادله (۴) گرانروی

سیب زمینی و برنج را پس از عمل‌آوری با امواج فراصوت ارزیابی کردند [۱۵-۱۳]. بنابراین، هدف اصلی از انجام این پژوهش، بررسی اثر عمل‌آوری با امواج فراصوت در زمان‌های مختلف ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ min در دمای ثابت ۲۲°C بر ساختار فیزیکوشیمیایی نشاسته گرانولی گندم به عنوان پرکاربردترین نشاسته در ایران و بسیاری از مناطق دنیاست. نتایج این پژوهش می‌تواند در تفسیر تغییراتی مفید باشد که در خواص محصولات حاوی نشاسته گندم که تحت تأثیر فرایند فراصوت‌دهی در شرایط مشابه قرار می‌گیرند، ایجاد می‌شود.

## تجربی

### مواد

نشاسته گندم از شرکت فارس گلوکوزین واقع در مرودشت فارس، تهیه و پیش از انجام آزمون، خواص شیمیایی آن بررسی شد. بدین منظور مقدار رطوبت، چربی، پروتئین و خاکستر نمونه نشاسته به ترتیب بر اساس روش‌های استاندارد (AACC ۲۰۰۰) اندازه‌گیری شد [۱۶].

### دستگاه‌ها و روش‌ها

#### عمل‌آوری نشاسته با دستگاه فراصوت

بدین منظور، ابتدا محلول‌های ۳۰٪ نشاسته در آب مقطر تهیه شد و در دستگاه فراصوت با بسامد ۲۰ kHz، توان ثابت و دامنه ۱۰۰٪ قرار گرفت. توان دستگاه روی ۱۰۰ W و دمای آن معادل دمای محیط (۲۲°C) تنظیم شد. نمونه‌ها در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ min تحت فرایند با دستگاه فراصوت قرار گرفتند. نمونه‌های عمل‌آوری شده به مدت ۲۴ h در گرم‌خانه با دمای ۴۰°C خشک و سپس آسیاب و از الک با اندازه مش ۱۲۰ عبور داده شدند.

#### اندازه‌گیری مقدار انحلال پذیری و جذب آب

بدین منظور، از روش Leach و همکاران استفاده شد [۱۷]. طبق این روش ۱ g از هر نمونه به دقت وزن و درون لوله‌های پلاستیکی دستگاه فرامرکزگیز به حجم ۵۰ mL منتقل شد. سپس، ۳۰ mL آب مقطر به هر نمونه اضافه و محلول ۳/۳٪ نشاسته تهیه شد. لوله‌های فرامرکزگیز به مدت ۳۰ min در حمام آب گرم ۹۵°C نگه داشته و همزده شدند. سپس، به سرعت دمای لوله‌ها به کمک آب سرد به دمای محیط رسانده شده و به مدت ۱۵ min نمونه‌ها با سرعت ۷۰۰×g در دمای محیط با فرایند مرکزگیزی جداسازی شدند. پس از فرایند مرکزگیز، مایع رویی با احتیاط جدا و به ظرفی که قبلاً وزن شده

کاهش یافته محاسبه شد:

$$\eta_{red} = (\eta_{rel} - 1) / C \quad (4)$$

که در آن C غلظت نمونه است. آنگاه گرانیوی ذاتی از دو روش متفاوت به دست آمد. طبق روش اول (روش کرامر) برای غلظت‌های مختلف هر نمونه در یک نمودار، گرانیوی کاهش یافته برحسب غلظت و خط رگرسیون نقاط رسم شد. عرض از مبدأ خط رگرسیون به عنوان گرانیوی ذاتی در نظر گرفته شد:

$$[\eta] = \lim_{C \rightarrow 0} \eta_{red} \quad (5)$$

در روش دوم (روش هاگینز) برای غلظت‌های مختلف هر نمونه در یک نمودار، گرانیوی ذاتی برحسب غلظت و خط رگرسیون نقاط رسم شد. عرض از مبدأ خط رگرسیون طبق معادله (۶) به عنوان گرانیوی ذاتی در نظر گرفته شد [۱۹].

$$[\eta] = (\ln \eta_{rel}) / C \quad (6)$$

در نهایت، میانگین گرانیوی ذاتی حاصل از دو روش به عنوان گرانیوی ذاتی نهایی گزارش شد.

#### شفافیت محلول نشاسته

از روش Reddy و Seib برای تعیین شفافیت محلول نشاسته استفاده شد [۲۰]. بر اساس این روش، تعلیق ۱٪ نشاسته در آب تهیه شد و به مدت ۳۰ min در حمام آب گرم با دمای ۹۵°C قرار گرفت. تعلیق در این مدت چند مرتبه به کمک همزن گردابی همزده شد. سپس، دمای نمونه‌ها با قراردادن آنها زیر جریان شیر آب به دمای محیط رسانده شد. در نهایت، درصد عبور نور از نمونه‌ها به کمک طیف‌نورسنج مدل MSE، ساخت انگلستان در طول موج ۶۵۰ nm، با آب مقطر یون‌زدوده شده به عنوان شاهد، اندازه‌گیری شد.

#### بررسی استحکام ژل

۶ g از هر نمونه توزین و با آب مقطر به حجم ۵۰ mL رسانیده شد تا مخلوط ۱۲٪ نشاسته در آب به دست آمد. نمونه‌ها در حمام آب گرم ۹۵°C تا ژلاتینی شدن تکان داده شدند و به مدت ۳۰ min در همین دما نگاه‌داری شدند. سپس، محتویات هر بشر در حالت داغ به

قالب‌های ویژه با قطر و ارتفاع مشخص انتقال داده شده و به مدت یک شب برای تشکیل ژل در دمای ۵°C نگاه‌داری شدند. استحکام ژل‌ها به کمک دستگاه بافت‌سنج مدل Stable Microsystems، TA-XT2i، Texture Analyzer ساخت انگلستان و با آزمون بافت‌سنجی ارزیابی شد. پارامترهای مختلفی از جمله سختی (حداکثر نیرو در هر تماس)، هم‌چسبی بافت (حاصل تقسیم سطح ۲ به ۱)، حالت فنری (springiness) (بازگشت نمونه پس از فشردن به حالت اولیه)، نیروی چسبندگی (حداکثر نیرو در سطح ۳ یا همان سطح چسبندگی)، کار لازم برای فشردگی اول (سطح ۱)، شیب (شیب بین دو نقطه از منحنی نیرو - زمان در کمپرس اول)، صمغی بودن (ضرب سختی در مقدار به هم پیوستگی) و مقاومت به جویدن (ضرب مقدار حالت فنری در پیوستگی بافت در صمغی بودن) ارزیابی و بررسی شد [۲۱].

#### تصاویر میکروسکوپی الکترونی

برای مطالعه تغییرات سطحی گرانول‌های نشاسته در نتیجه فرایند فراصوت‌دهی از میکروسکوپ الکترونی پوششی (SEM) مدل Leica Cambridge ساخت انگلستان استفاده شد. بدین منظور، مقدار بسیار اندکی از نمونه با دانه‌بندی یکنواخت، روی پایه فلزی چسبانده شد. پس از پوشش‌دهی نمونه با لایه‌ای از طلا و به کمک عبور گاز آرگون، نمونه‌ها به وسیله میکروسکوپ الکترونی با بزرگ‌نمایی حدود ۱۰۰۰ برابر و با ایجاد اختلاف پتانسیل الکتریکی ۲۰ kV مطالعه شدند.

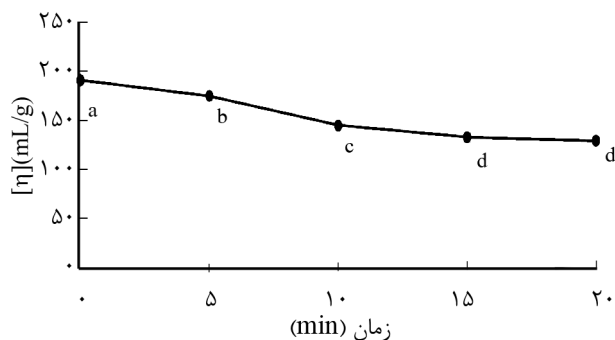
#### آنالیز آماری

از طرح آماری کاملاً تصادفی استفاده و تمام آزمون‌ها با حداقل سه مرتبه تکرار انجام شد. اطلاعات به دست آمده با استفاده از تحلیل واریانس، بررسی شد. اختلاف بین میانگین نمونه‌ها از آزمون دانکن در سطح ۵٪ با نرم‌افزار SPSS 0.16 معین شد.

#### نتایج و بحث

##### تعیین مقدار جذب و انحلال پذیری نشاسته در آب

طبق نتایج به دست آمده جذب آب و انحلال‌پذیری نمونه با افزایش زمان فرایند، افزایش و گرانیوی ذاتی کاهش یافت (شکل‌های ۱ و ۲). Jambrak و همکاران و Luo و همکاران، نتایج مشابهی را درباره نشاسته طبیعی ذرت گزارش کردند [۱۱، ۱۲]. در توجیه افزایش جذب آب و انحلال‌پذیری نمونه‌ها می‌توان گفت، در نشاسته اتصالات



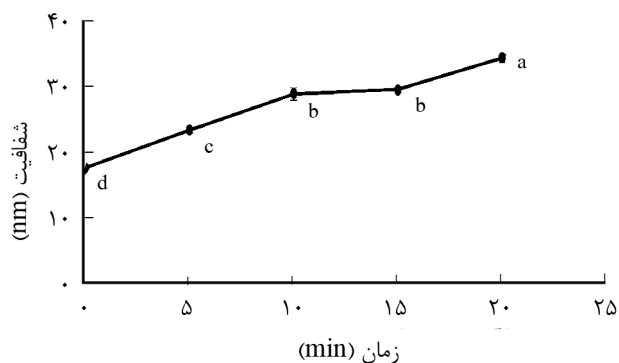
شکل ۲- تغییرات گرانروی ذاتی بر حسب زمان فرایند (نقاط با حروف مختلف از لحاظ آماری دارای تفاوت معنی دار در سطح  $P < 0/05$  هستند).

#### شفافیت محلول‌های نشاسته

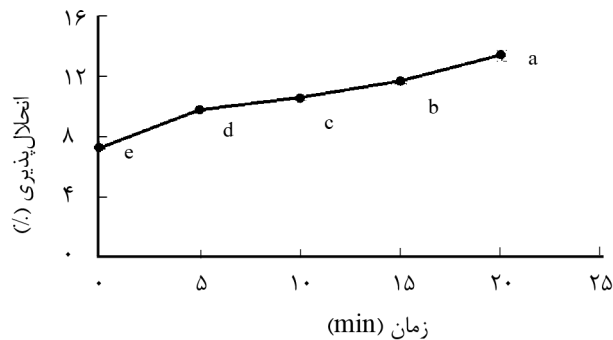
شفافیت محلول‌های ۰/۱٪ نشاسته‌های شاهد و عمل‌آوری شده در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، شفافیت با افزایش زمان اعمال فرایند، افزایش یافت. Karimi و همکاران و Chung و همکاران نیز نتایج مشابهی را درباره نشاسته‌های لوبیایی Mung، سیب‌زمینی و برنج گزارش کردند [۱۴، ۲۲]. این افزایش شفافیت می‌تواند به دلیل نفوذ آب در بخش بلوری گرانول‌ها، کوچک‌تر شدن مولکول‌های نشاسته در اثر اعمال فرایند فراصوت‌دهی و عبور بهتر نور باشد [۲۳، ۲۴].

#### تعیین خواص بافتی ژل نشاسته

نتایج به‌دست آمده از آزمون بافت‌سنجی (شکل ۴) ژل‌های ۱۲٪ در آب نمونه‌های نشاسته در جدول ۱ آمده است. با افزایش زمان عمل‌آوری با امواج فراصوت، سفتی بافت ژل نمونه‌ها روند کاهشی نشان داد. امواج فراصوت باعث تخریب جزئی و ایجاد حفره‌هایی



شکل ۳- شفافیت محلول ۱٪ در آب نشاسته عمل‌آوری شده با امواج فراصوت در زمان‌های مختلف در طول موج ۶۴۰ nm (حروف مختلف روی نمودار نشان‌دهنده اختلاف معنی دار در سطح  $P \geq 0/05$  است).



شکل ۱- مقدار تغییرات جذب آب و درصد انحلال‌پذیری نشاسته گندم عمل‌آوری شده با امواج فراصوت در زمان‌های مختلف (حروف مختلف روی نمودار نشان‌دهنده اختلاف معنی دار در سطح  $P \geq 0/05$  است).

بین مولکولی در اثر پراش امواج فراصوت شکسته شده و با افزایش سرعت فرایند (زمان)، گرانول‌ها بیشتر و بیشتر از حالت فشرده اولیه خارج می‌شوند. امواج فراصوت به‌طور عمده در اثر اعمال پدیده حفره‌سازی با ایجاد فشار و تنش موضعی باعث آسیب رساندن به گرانول‌ها، تخریب پیوندهای کووالانسی و در نتیجه شکستن رشته‌های پلیمری مولکول نشاسته می‌شوند. این فرایند باعث سهولت نفوذ آب به داخل مولکول می‌شود. ایجاد اتصالات هیدروژنی بین مولکول‌های آب و گروه‌های هیدروکسیل آزاد آمیلوز و آمیلوپکتین، انحلال‌پذیری و جذب آب را در نشاسته افزایش می‌دهد [۱۲، ۲۱].

#### تعیین گرانروی ذاتی

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش زمان فرایند، گرانروی ذاتی کاهش قابل ملاحظه‌ای نشان داده است. کمتر بودن گرانروی ذاتی نشان‌دهنده شکسته شدن جزئی و کوچک‌تر شدن مولکول‌ها در ساختار نشاسته است [۲۱]. مشخص است، شکسته شدن اتصالات میان پلیمرهای نشاسته تحت تأثیر زمان فرایند قرار دارد. گرانروی ذاتی فقط تحت تأثیر وزن مولکولی قرار نمی‌گیرد، بلکه شکل و ساختار فضایی مولکول نیز بر مقدار آن اثر دارد [۱۸، ۱۹]. مولکول‌های خطی و متقارن مانند آمیلوز می‌توانند گرانروی ذاتی بیشتری را نسبت به مولکول‌های غیرخطی ایجاد کنند، اما در اثر ایجاد اتصالات عرضی بین مولکول‌های نشاسته، تقارن مولکولی کمتر شده و بنابراین گرانروی ذاتی کم می‌شود.

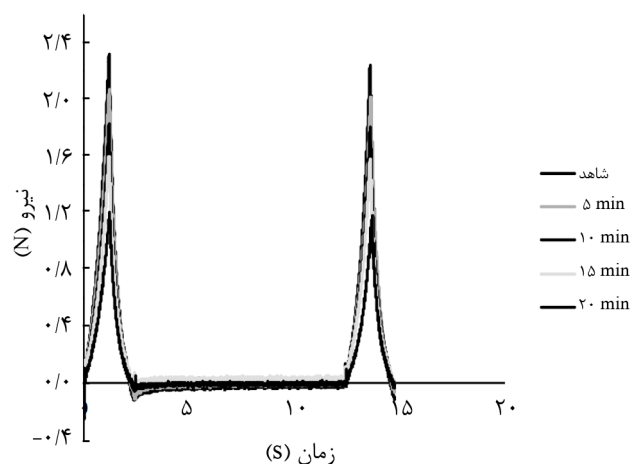
پژوهش‌های Czechowska-Biskupa و همکاران نشان داد، شکسته شدن مولکول‌های نشاسته در اثر اعمال امواج فراصوت به دلیل تولید رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل و نیز تخریب مکانیکی مولکول‌ها اتفاق می‌افتد [۱۰].

مشابهی را پس از فرایند فراصوت دهی با توان‌های بیشتر روی نشاسته ذرت گزارش کردند [۲۱].

پیوستگی بافت، معیاری از استحکام ساختار داخلی ژل در برابر شکستن است. همان‌طور که دیده می‌شود، با افزایش زمان اعمال فرایند، مقدار پیوستگی کاهش یافت. به دلیل تخریب ساختار گرانولی با پدیده حفره‌سازی و شکسته شدن برخی از پیوندها در نتیجه فشار برشی شدید و رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل با فعالیت شیمیایی زیاد، این روند کاهشی در مقدار پیوستگی بافت نمونه‌ها قابل توجیه است [۱۰].

### میکروسکوپ الکترونی پویشی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش مدت زمان فراصوت دهی، این امواج به‌طور مشخص باعث تخریب فیزیکی و تغییر شکل گرانول‌ها شده‌اند. امواج فراصوت با سازوکار فروپاشی حباب‌های حفره‌سازی و با القای فشارهای برشی موضعی در سرعت زیاد، قابلیت شکستن زنجیرهای پلیمری و تخریب گرانول‌ها را دارند. ضمن اینکه در اثر امواج فراصوت، بخشی از مولکول‌های آب موجود در حباب‌های حفره‌سازی فروپاشیده شده نیز ممکن است به رادیکال OH و اتم H تجزیه شوند. پس از انتشار به محیط مایع بیرون، با مولکول‌های نشاسته واکنش داده و باعث تجزیه پلیمر شوند [۱۰]. نتایج به‌دست آمده از تصاویر میکروسکوپ



شکل ۴- نمودارهای به‌دست آمده از دستگاه بافت‌سنج، مربوط به نمونه‌های نشاسته طبیعی عمل‌آوری شده با امواج فراصوت در زمان‌های مختلف و دمای ۲۲°C.

در ساختار مولکول و گرانول نشاسته شده که منجر به نفوذ آب و افزایش جذب آب در گرانول‌ها می‌شود. کاهش آمیلوز باعث کاهش استحکام و سختی ژل می‌شود. با افزایش نسبت آمیلوز در نشاسته، دسترسی زنجیرهای آزاد آمیلوز و تجمع مولکول‌ها با فواصل بسیار نزدیک در مناطق اتصال افزایش می‌یابد. Herceg و همکاران، نتایج

جدول ۱- خواص بافتی ژل ۱۲٪ نشاسته طبیعی گندم در آب، عمل‌آوری شده با دستگاه فراصوت در دمای ۲۲°C و زمان‌های مختلف.

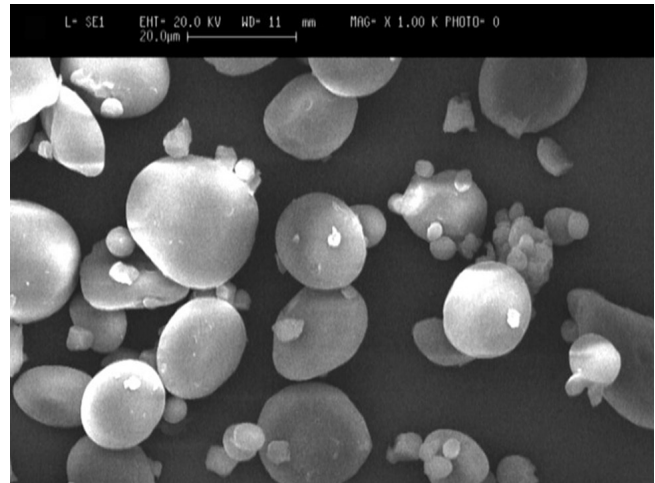
زمان اعمال فراصوت* (min)	سفتی (N)	پیوستگی	حالت فزنی	نیروی چسبندگی (N)	کار لازم برای فشردگی اول (mJ)	شیب (N/s)	صمغی بودن (N)	مقاومت به جویدن (N)
۰	۲/۱۳۰ ± ۰/۱۸۷ <sup>a</sup>	۰/۸۸۳ ± ۰/۰۰۶ <sup>a</sup>	۰/۹۷۷ ± ۰/۰۰۶ <sup>a</sup>	۰/۰۳۷ ± ۰/۰۲۱ <sup>d</sup>	۱/۰۲۳ ± ۰/۰۸۰ <sup>a</sup>	۱/۲۷۳ ± ۰/۰۷۶ <sup>a</sup>	۱/۸۸۳ ± ۰/۱۶۷ <sup>a</sup>	۱/۶۱۳ ± ۰/۱۴۰ <sup>a</sup>
۵	۱/۸۰۷ ± ۰/۰۴۹ <sup>b</sup>	۰/۸۹۰ ± ۰/۰۱۷ <sup>ab</sup>	۰/۹۷۳ ± ۰/۰۰۶ <sup>a</sup>	۰/۰۶۰ ± ۰/۰۰۱ <sup>d</sup>	۰/۸۶۷ ± ۰/۰۵۸ <sup>b</sup>	۱/۲۸۷ ± ۰/۱۴۲	۱/۶۰۷ ± ۰/۰۱۵ <sup>b</sup>	۱/۳۹۳ ± ۰/۰۲۱ <sup>b</sup>
۱۰	۱/۵۸۳ ± ۰/۰۱۲ <sup>c</sup>	۰/۹۱۳ ± ۰/۰۰۶ <sup>b</sup>	۰/۹۷۳ ± ۰/۰۰۶ <sup>a</sup>	۰/۱۰۷ ± ۰/۰۱۵ <sup>c</sup>	۰/۷۷۷ ± ۰/۰۳۵ <sup>b</sup>	۱/۰۵۳ ± ۰/۰۵۵ <sup>bc</sup>	۱/۴۴۷ ± ۰/۰۲۱ <sup>bc</sup>	۱/۲۸۷ ± ۰/۰۳۱ <sup>c</sup>
۱۵	۱/۵۰۳ ± ۰/۰۲۱ <sup>c</sup>	۰/۸۲۰ ± ۰/۰۲۰ <sup>c</sup>	۰/۹۶۷ ± ۰/۰۰۶ <sup>a</sup>	۰/۱۵۰ ± ۰/۰۲۰ <sup>b</sup>	۰/۷۲۷ ± ۰/۰۰۶ <sup>c</sup>	۱/۰۶۷ ± ۰/۰۲۹ <sup>b</sup>	۱/۲۳۷ ± ۰/۰۴۵ <sup>c</sup>	۰/۹۸۷ ± ۰/۰۶۵ <sup>d</sup>
۲۰	۱/۲۵۷ ± ۰/۰۸۱ <sup>d</sup>	۰/۷۷۳ ± ۰/۰۱۵ <sup>d</sup>	۰/۹۶۷ ± ۰/۰۱۵ <sup>a</sup>	۰/۱۹۰ ± ۰/۰۱۰ <sup>a</sup>	۰/۵۹۷ ± ۰/۰۵۵ <sup>c</sup>	۱/۰۰۳ ± ۰/۰۴۰ <sup>c</sup>	۱/۰۹۳ ± ۰/۰۵۹ <sup>d</sup>	۰/۹۲۳ ± ۰/۰۳۱ <sup>d</sup>

\*اعداد میانگین سه تکرارند و به شکل میانگین ± انحراف معیار گزارش شده‌اند. حروف کوچک متفاوت نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح  $P < 0.05$  در هر ستون است.

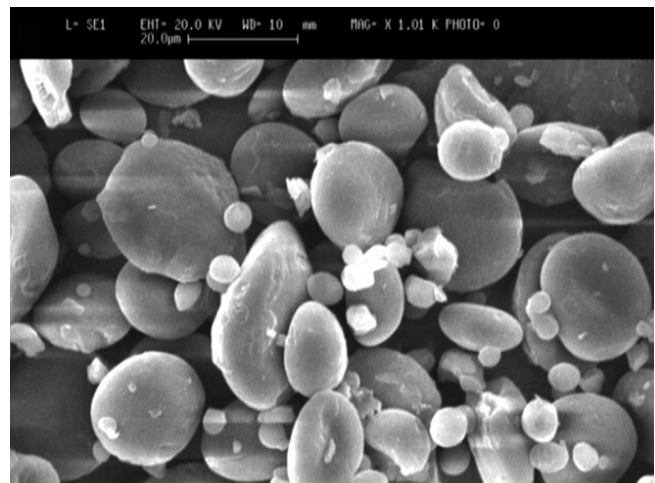
الکترونی، نتایج سایر آزمون‌های این پژوهش از جمله جذب آب و انحلال‌پذیری را تأیید کرد. همان‌طور که در تصاویر دیده می‌شود، شکاف‌های به‌وجود آمده در سطح گرانول‌های نشاسته و تخریب و شکستن برخی از آنها، باعث سهولت نفوذ آب به داخل گرانول و افزایش جذب آب و انحلال‌پذیری آنها می‌شود.

### نتیجه‌گیری

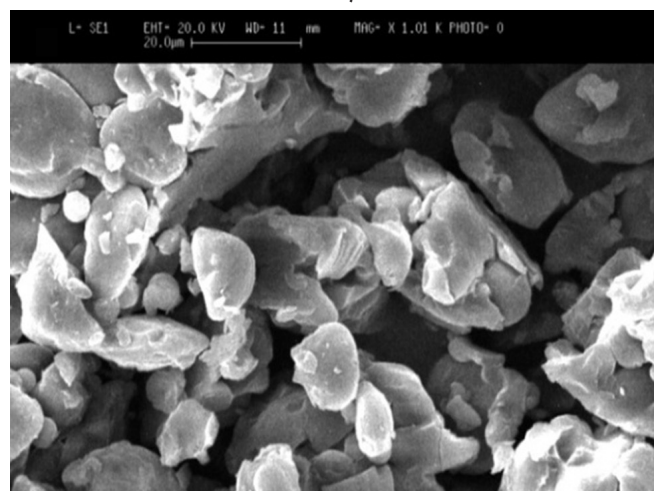
نشاسته گندم به کمک امواج فراصوت با بسامد ۲۰ kHz و توان ۱۰۰ W در زمان‌های مختلف عمل‌آوری شدند و تغییرات حاصل از فرایند در خواص فیزیکوشیمیایی آنها بررسی شد. نتایج آزمون‌ها نشان داد، با افزایش زمان فرایند، مقدار جذب آب و درصد انحلال‌پذیری افزایش و گرانروی ذاتی کاهش یافت. علت این تغییرات می‌تواند آثار پدیده حفره‌سازی باشد که با اعمال دما و فشار برشی موضعی باعث آسیب‌رساندن به ساختار گرانول‌ها می‌شود. برای بررسی استحکام ژل نمونه‌ها، پس از تهیه ژل ۱۲٪، از آزمون TPA استفاده شد. افزایش مدت زمان فراصوت‌دهی باعث کاهش پارامترهای سفتی بافت، پیوستگی بافت، کار لازم برای فشردگی اول، صمغی‌بودن و مقاومت به جویدن و افزایش پارامتر نیروی چسبندگی بافت شد. اما، بر مقدار حالت فنری نمونه‌ها اثر نداشت. شفافیت محلول ۱٪ نمونه‌ها در آب با افزایش مدت زمان اعمال امواج فراصوت افزایش یافت. تصاویر به‌دست آمده از میکروسکوپ الکترونی SEM نشان داد، در اثر فراصوت‌دهی تعدادی شکاف در سطح گرانول‌ها به‌وجود آمده و ساختار گرانولی در برخی نقاط تخریب شده بود. به‌طور کلی امواج فراصوت به کمک آثار ناشی از پدیده حفره‌سازی، با اعمال دما و فشار برشی موضعی باعث آسیب‌رساندن به ساختار گرانول‌های نشاسته گندم، تخریب برخی پیوندهای کووالانسی و در نهایت شکسته‌شدن و کوچک‌تر شدن مولکول نشاسته شد. در مجموع نتایج نشان داد، استفاده از امواج فراصوت در محصولات حاوی نشاسته می‌تواند باعث رقیق‌تر و نرم‌تر شدن این محصولات پس از فرایند شود. مدت زمان فرایند بر شدت تغییرات اثر بسزایی دارد. بنابراین، تنظیم زمان و شدت فرایند در کنترل خواص کیفی محصولات نشاسته اهمیت بسزایی دارد. همچنین، پژوهش‌های بیشتری برای شناسایی انواع نشاسته‌های اصلاح شده یا طبیعی مقاوم در برابر امواج فراصوت برای جبران ضعف‌های نشاسته طبیعی گندم در برابر این امواج لازم است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی پوششی: (الف) نشاسته طبیعی شاهد و نشاسته‌های طبیعی عمل‌آوری شده با امواج فراصوت به مدت (ب) ۵ min و (ج) ۲۰ min (فاصله نشان داده شده روی هر شکل معادل ۲۰ µm است).



## مراجع

1. Tester R.F., Karkalas J., and Qi X., Starch-Composition, Fine Structure and Architecture, *J. Cereal Sci.*, **39**, 151-165, 2004.
2. Mason W.R., *Starch Use in Foods*, Starch, James B. and Roy W. (Eds.), Academic, San Diego, 745-795, 2009.
3. Thomas D.J. and Atwell W.A., *Starches*, Eagan, New York, 1999.
4. Farahnaky A., Majzoobi M., and Mesbahi G.R., *Properties and Application of Hydrocolloids in Food and Medicinal Products*, Elm-e- Keshavarzi-e- Iran, Tehran, 1st ed., 113-185, 2009.
5. Lewandowicz G., Jankowski T., and Fornal J., Effect of Microwave Radiation on Physico-chemical Properties and Structure of Cereal Starches, *Carbohydr. Polym.*, **42**, 193-199, 2000.
6. Cheyne A., Barnes J., Gedney S., and Wilson D.I., Extrusion Behavior of Cohesive Potato Starch Pastes: II. Microstructure-Process Interactions, *J. Food Eng.*, **66**, 13-24, 2005.
7. Kim N.H., Kim J.H., Lee S., Lee H., Yoon J.W., Wang R., and Yoo S.H., Combined Effect of Autoclaving-Cooling and Cross-linking Treatments of Normal Corn Starch on the Resistant Starch Formation and Physicochemical Properties, *Starch/Stärke*, **62**, 358-363, 2010.
8. Soria A.C. and Villamiel M., Effect of Ultrasound on the Technological Properties and Bioactivity of Food: A Review, *Trends Food Sci. Technol.*, **21**, 323-331, 2010.
9. Dolatowski Z.J., Stadnik J., and Stasiak D., Applications of Ultrasound in Food Technology, *Acta Sci. Pol. Technol. Aliment.*, **6**, 88-99, 2007.
10. Czechowska-Biskupa R., Rokitaa B., Lotfyb S., Ulanskia P., and Rosiaka J.M., Degradation of Chitosan and Starch by 360-kHz Ultrasound, *Carbohydr. Polym.*, **60**, 175-184, 2005.
11. Luo Z., Fu X., He X., Luo F., Gao Q., and Yu S., Effect of Ultrasonic Treatment on the Physicochemical Properties of Maize Starches Differing in Amylose Content, *Starch/Stärke*, **60**, 646-653, 2008.
12. Jambrak A.R., Hecceg Z., Subaric D., Babic J., Brncic M., Brncic S.R., and Bosiljkov T., Cvek D., Tripalo B., Gelo J., Ultrasound Effect on Physical Properties of Corn Starch, *Carbohydr. Polym.*, **79**, 91-100, 2010.
13. Huang Q., Li L., and Fu X., Ultrasound Effects on the Structure and Chemical Reactivity of Corn Starch Granules, *Starch/Stärke*, **59**, 371-378, 2007.
14. Chung K.M., Moon T.W., Kim H., and Chun J.K., Physicochemical Properties of Sonicated Mung Bean, Potato, and Rice Starches, *Cereal Chem.*, **79**, 631-633, 2002.
15. Wang L. and Wang Y.J., Application of High-Intensity Ultrasound and Surfactants in Rice Starch Isolation, *Cereal Chem.*, **81**, 140-144, 2004.
16. American Association of Cereal Chemists Approved Methods of the AACC, The Association: St. Paul, Minnesota, 2000.
17. Leach H.W., McCowen L.D., and Schoch T.J., Structure of the Starch Granule: Swelling and Solubility Patterns of Various Starches, *Cereal Chem.*, **36**, 534-544, 1995.
18. Millard M.M., Dintzis F.R., Willett J.L., and Klavons J.A., Light-scattering Molecular Weights and Intrinsic Viscosities of Processed Waxy Maize Starches in 90% Dimethyl Sulfoxide and H<sub>2</sub>O, *Cereal Chem.*, **74**, 687-691, 1997.
19. Harding S.E., The Intrinsic Viscosity of Biological Macromolecules, Progress in Measurement, Interpretation and Application to Structure in Dilute Solution, *Prog. Biophys. Molec. Biol.*, **68**, 207-262, 1997.
20. Reddy I. and Seib P.A., Modified Waxy Wheat Starch Compared to Modified Waxy Corn Starch, *J. Cereal Sci.*, **31**, 25-39, 2000.
21. Hecceg I.L., Ljubić I., Jambrak A.R., and Šubarić D., Texture and Pasting Properties of Ultrasonically Treated Corn Starch, *Czech J. Food Sci.*, **28**, 88-93, 2010.
22. Karimi M., Poor Azarang H., and Nasiri M., The Effect of Ultrasound on Some Properties of Potato and Wheat Starches, *J. Agric. Eng. Res.*, **1**, 95-108, 2008.
23. Craig S.A.S., Maningat C.C., Seib P.A., and Hosney R.C., Starch Paste Clarity, *Cereal Chem.*, **66**, 173-182, 1989.
24. Majzoobi M., Radi M., Farahnaky M., and Jamalian J., Physico-chemical Properties of Phosphoryl Chloride Cross-linked Wheat Starch, *Iran. Polym. J.*, **18**, 491-499, 2009.