

Journal Pre-proofs

Investigation of quinoa starch extraction process and comparison of its physicochemical and rheological properties

Reza Varanloo, Akram Sharifi , Atefe Taherkhani, Abolfazl Bayati

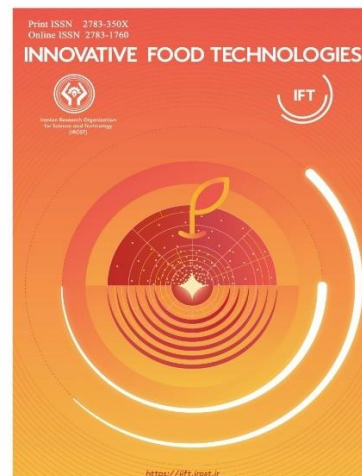
DOI: [https://doi.org/ 10.22104/ift.2026.8287.2302](https://doi.org/10.22104/ift.2026.8287.2302)

To appear in: Innovative Food Technologies (IFT)

Received Date: 02 June 2026

Revised Date: 24 July 2026

Accepted Date: 28 July 2026



Please cite this article as: Reza Varanloo, Akram Sharifi , Atefe Taherkhani, Abolfazl Bayati, Investigation of quinoa starch extraction process and comparison of its physicochemical and rheological properties, *Innovative Food Technologies* (2026), doi: [https://doi.org/ 10.22104/ift.2026.8287.2302](https://doi.org/10.22104/ift.2026.8287.2302)

This is a PDF file of an article that has undergone enhancements after acceptance, such as the addition of a cover page and metadata, and formatting for readability, but it is not yet the definitive version of record. This version will undergo additional copyediting, typesetting and review before it is published in its final form, but we are providing this version to give early visibility of the article. Please note that, during the production process, errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

© 2026 The Author(s). Published by iroast.org.

مقاله پژوهشی

بررسی فرآیند استخراج نشاسته کینوا و مقایسه خواص فیزیکوشیمیایی و رئولوژیکی آن

رضا ورنلو^۱، اکرم شریفی^{۲*}، عاطفه طاهرخانی^۱، ابوالفضل بیاتی^۳

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

^۳ دانش‌آموخته دکتری، گروه صنایع غذایی و تبدیلی، پژوهشکده فناوری های شیمیایی، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

چکیده

منابع اصلی کربوهیدرات‌ها در جهان غلات و حبوبات هستند و غلات عمدتاً از نشاسته تشکیل شده‌اند. هدف از این پژوهش، استخراج نشاسته کینوا با سه روش آسیاب مرطوب (۱۸۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۲۰۰ میلی گرم در لیتر انیدرید سولفور)، آنزیمی (۲، ۴ و ۶ ساعت) و فراصوت (۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه) و مقایسه ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن‌ها بود. نتایج نشان داد روش استخراج بر کدورت، قدرت تورم و ویسکوزیته تأثیر معنی‌دار داشت، اما با توجه به استفاده از یک وارپته ثابت کینوا، روش‌های مختلف استخراج اثر معنی‌داری بر بازده استخراج نشاسته، حلالیت، محتوای آمیلوز و پایداری تبرید و انجماد-ذوب نداشتند. بیشترین حلالیت (۱۵/۵ درصد) و بالاترین قدرت تورم (۱۰/۱۸ گرم/گرم) به ترتیب در روش فراصوت (۳۰ دقیقه) مشاهده شد. همچنین بیشترین کدورت در روش آنزیمی (۳/۱۹ درصد) و کمترین مقدار در روش فراصوت (۲/۳۳ درصد) اندازه‌گیری شد. ویسکوزیته نشاسته استخراج‌شده با روش آسیاب مرطوب در مقایسه با سایر روش‌ها بیشترین مقدار را نشان داد، در حالی که نمونه به‌دست‌آمده با روش فراصوت کمترین ویسکوزیته را داشت. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که روش استخراج تأثیر قابل‌توجهی بر مورفولوژی گرانول‌های نشاسته نداشت و تمامی نمونه‌ها دارای گرانول‌های چندضلعی با اندازه تقریبی ۱/۵ تا ۴/۵ میکرومتر بودند.

واژه های کلیدی: کینوا، نشاسته، فراصوت، روش آنزیمی، استخراج

۱. مقدمه

کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd) یک شبه‌غله با کاربردهای گسترده در صنعت غذا است (Li & Zhu, 2018b). این محصول به دلیل خواص عملکردی و رئولوژیکی، ویژگی‌های حسی، ترکیب مغذی و پایداری خود می‌تواند برای توسعه غذاهای عملکردی^۱ به کار رود (Coțovanu et al., 2020). این محصول به‌عنوان یک منبع پروتئین کامل گیاهی و حاوی کربوهیدرات‌های حاصل از غلات کامل محسوب می‌شود (Junejo et al., 2022) و دارای روغن باکیفیت بالا و مقادیر زیاد ویتامین‌ها، مواد معدنی و تنوع زیادی از ترکیبات زیست‌فعال است (Pereira et al., 2019).

از لحاظ ساختاری، کینوا از سه بخش اصلی پریسپرم، جنین یا جوانه و پری کارپ یا پوسته دانه تشکیل شده است. نشاسته، به‌عنوان جزء عمده دانه کینوا، حدود ۳۰ تا ۷۰ درصد از ترکیب آن را تشکیل می‌دهد و دارای گرانول‌های کوچک با اندازه تقریبی ۱ تا ۳ میکرومتر و مقدار آمیلوز در محدوده ۰/۳ تا ۷/۲۷ درصد است (Li & Zhu, 2018b). آمیلوز موجود در نشاسته کینوا ساختاری عمدتاً خطی دارد، اما آمیلوپکتین دارای نسبت بالایی از زنجیره‌های کوتاه و زنجیره‌های نوع A با الگوی مشخص است (Li & Zhu, 2017). این ویژگی‌های ساختاری می‌تواند بر خصوصیات عملکردی نشاسته کینوا تأثیرگذار باشند و در بروز برخی ویژگی‌های مطلوب مانند کاهش دمای ژلاتیناسیون، افزایش قدرت ژل‌سازی و واکنش‌پذیری آنزیمی مناسب نقش داشته باشند (Li & Zhu, 2018a). نشاسته کینوا بیش از نیمی از انرژی مورد نیاز بدن را تأمین می‌کند و ویژگی‌های هضم آهسته آن از نظر تغذیه‌ای مطلوب هستند. بنابراین، می‌توان از آن به‌عنوان منبعی نوآورانه برای گسترش خواص عملکردی غذایی (مانند بافت، ویژگی‌های حسی و ارزش تغذیه‌ای) استفاده کرد. نشاسته یک ماده خام مهم است که در صنایع غذایی (به‌عنوان غلظت‌دهنده، پایدارکننده و غذای کمکی) و صنایع غیرغذایی (دارویی و نساجی) استفاده می‌شود. تولید سالانه نشاسته در جهان حدود ۶۰ میلیون تن برآورد شده است (Adigwe et al., 2022) که از منابع مختلف گیاهی شامل غلات (ذرت، گندم)، غده‌ها (سیب‌زمینی) و ریشه‌های نشاسته‌ای مانند کاساوا، سیب‌زمینی شیرین و یام استخراج می‌شود. حدود ۶۰ درصد آن در غذاها استفاده می‌شود (مانند محصولات نانویی، سوپ‌ها، سس‌ها، بستنی، شربت‌های قندی، تنقلات، غذاهای کودک، محصولات گوشتی، نوشیدنی‌ها و جایگزین‌های چربی)، در حالی که ۴۰ درصد باقی‌مانده در داروسازی و کاربردهای غیرخوراکی استفاده می‌شود (Burrell, 2003).

روش‌های مختلف استخراج (مانند فراصوت، آسیاب مرطوب و آنزیمی) با شرایط پردازشی و مواد شیمیایی مختلف برای به‌دست آوردن نشاسته به کار می‌روند که ترکیب شیمیایی و ساختار چندمقیاسی نشاسته جدا شده را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Correia et al., 2012; Correia & Beirão-da-Costa, 2010) و منجر به اثرات مطلوب یا نامطلوب بر خواص فیزیکی‌شیمیایی و عملکردی آن‌ها می‌شوند. در فرآیند هیدرولیز اسیدی، نشاسته در حضور محلول‌های اسیدی ملایم و در دماهایی پایین‌تر از دمای ژلاتینه شدن تیمار می‌شود. در این شرایط اسید عمدتاً نواحی آمورف گرانول‌های نشاسته را تخریب کرده و منجر به کاهش ویسکوزیته و افزایش حلالیت نشاسته می‌شود، در حالی که ساختارهای کریستالی تا حد زیادی حفظ می‌شوند (Farahnaky et al., 2009). در یک مطالعه، نشاسته کینوا با روش آسیاب مرطوب استخراج شد و اثر زمان و دمای خیساندن در محلول SO₂ و اسید لاکتیک بررسی گردید؛ به‌طوری‌که شرایط بهینه در ۳۰ درجه سانتی‌گراد و حدود ۵/۶ ساعت خیساندن بیشترین بازده و بهترین کیفیت نشاسته را فراهم کرد (Ballester-Sánchez et al., 2019). در روش آنزیمی، از آنزیم‌های هیدرولیزکننده مانند سلولاز، آلفا‌آمیلاز، بتا‌آمیلاز و گلوکوا‌میلاز برای تجزیه پیوندهای گلیکوزیدی در ساختار نشاسته استفاده می‌شود. این آنزیم‌ها با شکستن پیوندهای α -1,4 و α -1,6 در مولکول‌های آمیلوز و آمیلوپکتین، موجب تغییر ساختار و تولید الیگوساکاریدها یا قندهای ساده‌تر می‌شوند (Farahnaky et al., 2009). در یک مطالعه، استخراج نشاسته از سیب‌زمینی با استفاده از آنزیم سلولاز انجام شد و شرایط فرآیند با روش سطح پاسخ (RSM) بهینه‌سازی گردید. نتایج نشان داد افزایش غلظت آنزیم و زمان تماس موجب افزایش بازده استخراج شده و در شرایط بهینه (۵/۰ گرم آنزیم در ۱۰۰ گرم ماده، ۱۰ میلی‌لیتر آب، دما ۴۵ درجه سانتی‌گراد و ۴ ساعت) بازده استخراج نشاسته به حدود ۸۹٪ رسید (Hameed et al., 2020). از سوی دیگر، مطالعات نشان می‌دهد که روش‌هایی مانند فراصوت روش مؤثری برای افزایش بازده استخراج نشاسته

¹ Functional Foods

از منابع مختلف است. Sit و همکاران (۲۰۱۴)، اثر ترکیب پیش‌تیمار فراصوت و آنزیمی با استفاده از سلولاز و زایلاناز را برای استخراج نشاسته از تارو پانچاموخی^۱ بررسی کردند و بیشترین بازده (۸۱/۲۰٪) را پس از ۲۰ دقیقه تیمار فراصوت به دست آوردند (Sit et al., 2014). همچنین Park و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که استفاده از فراصوت در ترکیب با بافرها روشی مؤثر برای جداسازی سریع نشاسته سورگوم است (Park et al., 2006)، در حالی که Pinyo و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که پیش‌تیمار فراصوت بازده استخراج را در مقایسه با نمونه بدون تیمار بیش از ۲۰ درصد افزایش می‌دهد (Pinyo et al., 2017). در پژوهشی دیگر، ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی و عملکردی نشاسته بلوط زاگرس (*Quercus brantii*) استخراج‌شده با روش‌های مختلف جداسازی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد روش آسیاب‌تر اسیدی از نظر بازده و صرفه اقتصادی و روش استخراج آنزیمی از نظر عملکرد و سازگاری با محیط‌زیست، مناسب‌ترین روش‌ها برای استخراج نشاسته بلوط زاگرس هستند (Bayati et al., 2022).

از آنجا که روش‌های استخراج تفاوت‌های ساختاری در میان نشاسته‌های جدا شده ایجاد می‌کنند، چنین تغییراتی ممکن است در نهایت بر خواص عملکردی تأثیر گذاشته و منجر به کاربردهای صنعتی متفاوتی شوند. بنابراین، در این پژوهش سه نوع روش استخراج نشاسته (آسیاب مرطوب، آنزیمی و روش فراصوت) برای جداسازی نشاسته کینوا استفاده شد و خواص فیزیکی‌شیمیایی و رئولوژیکی آن‌ها بررسی شدند. این مطالعه مسیر را برای طراحی یک منبع نشاسته عملکردی هدفمند از طریق انتخاب و بهینه‌سازی روش استخراج هموار می‌کند.

۲. مواد و روش‌ها

دانه‌های کینوا (*Chenopodium quinoa*) کشت‌شده در استان خراسان رضوی، شهرستان کاشمر، از شرکت مدیاف، تهران، ایران خریداری شدند. تمامی مواد شیمیایی، معرف‌ها و حلال‌های مورد استفاده دارای درجه خلوص آنالیز مناسب بودند و از شرکت‌های مرک (Merk KGaA، دارمشتات، آلمان) و سیگما-آلدريج (Sigma-Aldrich، سنت لوئیس، میزوری، آمریکا) تهیه شدند.

۱.۲. ترکیب دانه کینوا

اندازه‌گیری رطوبت، خاکستر، فیبر خام و چربی خام دانه‌های کینوا به ترتیب مطابق با استانداردهای ISIRI No. 2705، ISIRI No. 2706، ISIRI No. 3105 و ISIRI No. 4798 مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران انجام شد. همچنین، مقدار نشاسته کل و پروتئین بر اساس روش‌های استاندارد AOAC (1996) تعیین گردید. میزان پروتئین از طریق اندازه‌گیری نیتروژن کل به روش کلدال و اعمال ضریب تبدیل مناسب محاسبه شد.

۲.۲. استخراج نشاسته کینوا

در این پژوهش، استخراج نشاسته با بهره‌گیری از سه روش فراصوت، آسیاب مرطوب و آنزیمی انجام گرفت.

۱.۲.۲. روش فراصوت

مطابق با روش Gonzalez-Lemus و همکاران (۲۰۱۸)، برای استخراج نشاسته از دانه‌های کینوا با استفاده از روش فراصوت، ابتدا دانه‌ها آسیاب و سپس به مدت ۳۰ دقیقه در محلول سدیم بی سولفیت با غلظت ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر به نسبت (۱:۳) کینوا به متا بی سولفیت) غوطه‌ور شد. سپس محلول را در یک کیسه پلی‌اتیلنی قرار داده و به مدت ۱۰ دقیقه در حمام یخ قرار داده شد. نمونه‌ها را در دمای ۲۴- درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت منجمد کرده سپس به نمونه‌ها اجازه داده شد تا در دمای اتاق به مدت ۱۲ ساعت ذوب شوند. سپس در یک مخلوط‌کن با حداکثر سرعت به مدت ۶۰ ثانیه مخلوط گردید. سوسپانسیون در حمام فراصوت (مدل L4، شرکت Vclean، ایران) (۴۰ کیلوهرتز) برای مدت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه قرار داده شد. در طول آزمایش، دمای محلول با افزودن یخ یا استفاده از حمام خنک‌کننده در حدود ۲۵±۲ درجه سلسیوس کنترل گردید تا از تخریب ساختار نشاسته جلوگیری شود. پس از اعمال تیمار فراصوت، نمونه از الک ۱۲۰ مش عبور داده شد و سپس به مدت ۱۵ دقیقه در نیروی گریز از مرکز نسبی ۸۰۰×g سانتریفیوژ گردید. لایه ایجادشده در سطح محلول جدا شد و

¹ Panchamukhi taro

رسوب نشاسته ته‌نشین‌شده جمع‌آوری شد. در نهایت، نشاسته استخراج‌شده به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد (González-Lemus et al., 2018).

۲.۲.۲. روش آسیاب مرطوب

استخراج نشاسته طبق روش Ballester-Sanchez و همکاران (۲۰۱۹)، با روش آسیاب مرطوب تحت شرایط خیساندن با اندکی اصلاحات انجام شد. در ابتدا، دانه‌های کینوا در محلول آبی دی‌اکسید گوگرد (انیدرید سولفور) با غلظت‌های ۱۸۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد خیسانده شدند. پس از پایان دوره خیساندن، دانه‌ها از محلول جدا شده، آسیاب گردیدند و هر یک سه مرتبه از الک‌های ۸۰ و ۱۲۰ مش عبور داده شدند. در مرحله بعد، ماده فرآوری‌شده به مدت ۱۵ دقیقه و در نیروی گریز از مرکز نسبی $800 \times g$ سانتریفیوژ شد. پس از سانتریفیوژ، لایه تشکیل‌شده در سطح محلول داخل هر لوله فالکن جدا گردید، در حالی که نشاسته ته‌نشین‌شده به‌طور جداگانه جمع‌آوری شد. در نهایت، نشاسته حاصل به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد (Ballester-Sánchez et al., 2019).

۳.۲.۲. روش آنزیمی

مطابق با روش Hameed و همکاران (۲۰۲۰)، دانه‌های کینوا آسیاب شدند و ۱۲۰ گرم از آرد حاصل با ۳۶۰ میلی‌لیتر آب مخلوط گردید. pH مخلوط با استفاده از سود ۰/۱ مولار به ۷/۵ تنظیم شد. سپس ۰/۱ گرم آنزیم پروتئاز از نوع آندو به سوسپانسیون افزوده شد و مخلوط در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲، ۴ و ۶ ساعت در حالی که با نیروی گریز از مرکز نسبی $20 \times g$ هم زده می‌شد، نگهداری گردید. پس از دوره گرمخانه‌گذاری، نمونه‌ها از الک ۱۲۰ مش عبور داده شدند و سپس به مدت ۱۵ دقیقه در نیروی گریز از مرکز نسبی $800 \times g$ سانتریفیوژ شدند. پس از سانتریفیوژ، لایه تشکیل‌شده بر سطح محلول در هر لوله فالکن جدا شد و نشاسته ته‌نشین‌شده به‌طور جداگانه جمع‌آوری گردید. در نهایت، نشاسته به‌دست‌آمده به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد (Hameed et al., 2020).

۳.۲. بازده استخراج

بازده استخراج نشاسته بر اساس روش گزارش‌شده توسط Ballester-Sanchez و همکاران (۲۰۱۹) مطابق رابطه زیر محاسبه شد (۱).

$$\text{Yield (\%)} = (\text{Weight of recovered fraction} / \text{Initial dry weight of quinoa seeds}) \times 100 \quad (1)$$

۴.۲. تعیین مقدار آمیلوز

نمونه‌ای به وزن ۱۰۰ میلی‌گرم از نشاسته به‌طور دقیق وزن شده و به یک ارلن ۵۰ میلی‌لیتری منتقل شد. سپس ۱ میلی‌لیتر اتانول ۹۵ درصد و ۹ میلی‌لیتر سدیم‌هیدروکسید ۱ نرمال به ظرف افزوده شد. مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد تا نشاسته کاملاً ژلاتینی شود. پس از حرارت‌دهی، محلول تا دمای اتاق خنک شد و با آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس ۵ میلی‌لیتر اسید استیک ۱ نرمال و ۲ میلی‌لیتر محلول ید افزوده شده و مخلوط به‌خوبی هم زده شد. محلول به مدت ۲۰ دقیقه در حالت سکون قرار گرفت. در نهایت، جذب نوری محلول در طول موج ۶۲۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر (شرکت Shimadzu، کیوتو مدل UV-1700، ژاپن) اندازه‌گیری شد و مقدار آمیلوز بر این اساس محاسبه گردید (Williams, 1970).

۵.۲. اندازه‌گیری کدورت

کدورت نشاسته‌ها مطابق روش گزارش‌شده توسط Lan و همکاران (۲۰۰۸) اندازه‌گیری شد. یک سوسپانسیون نشاسته ۲ درصد در آب تهیه شد و به مدت ۱ ساعت در حمام آب جوشان، همراه با هم‌زدن مداوم، حرارت داده شد. سپس سوسپانسیون به مدت ۱ ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد خنک شد و کدورت با اندازه‌گیری جذب نوری در طول موج ۶۲۰ نانومتر نسبت به بلانک آب مقطر و با استفاده از اسپکتروفتومتر تعیین گردید (Lan et al., 2008).

۶.۲. تعیین قدرت تورم^۱ و حلالیت^۲

سوسپانسیون نشاسته ۲٪ در حمام آب گرم به مدت ۳۰ دقیقه با هم زدن مداوم در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. مخلوط فوق به مدت ۱۵ دقیقه با شدت ۳۰۰۰ نیروی گریز از مرکز نسبی سانتریفیوژ شد. مایع رویی را برداشته و در کوره در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شد و وزن آن اندازه‌گیری شد. رسوب باقی‌مانده در فالتون توزین و از رابطه زیر قدرت تورم و حلالیت محاسبه شد (۲ و ۳) (Lan et al., 2008).

$$\text{Solubility (\%)} = (\text{Dry solid in supernatant} / \text{Initial dry starch weight}) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Swelling Power (g/g)} = \text{Wet sediment weight} / (\text{Initial dry starch weight} - \text{Dry solid in supernatant}) \quad (3)$$

۷.۲. پایداری در شرایط تبرید^۳ و انجماد-ذوب^۴

برای اندازه‌گیری میزان آب‌اندازی، روش Wang و همکاران (۲۰۱۰) با اندکی اصلاح مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا سوسپانسیونی شامل ۳ گرم نشاسته در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر تهیه شد و مخلوط به مدت ۱۵ دقیقه بر روی شیکر و در حمام آب ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد تا ژلاتینه‌شدن کامل انجام گیرد. سپس ۱۰ گرم از ژل حاصل داخل لوله سانتریفیوژ پلی‌پروپیلنی منتقل و وزن اولیه آن (W_1) ثبت شد. پس از اعمال شرایط نگهداری (تبرید یا انجماد-ذوب)، نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در $2865 \times g$ سانتریفیوژ شدند، محلول رویی جدا گردید و وزن باقی‌مانده ژل (W_2) اندازه‌گیری شد. میزان سینرسیس مطابق رابطه (۴) محاسبه شد (Wang et al., 2010b).

$$\text{Syneresis (\%)} = [(W_1 - W_2) / \text{Initial gel weight}] \times 100 \quad (4)$$

برای بررسی پایداری در شرایط تبرید، نمونه‌ها پس از ژلاتینه‌شدن، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. سپس میزان سینرسیس مطابق روش کلی ذکر شده در بالا اندازه‌گیری شد. برای ارزیابی پایداری در برابر انجماد-ذوب، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد منجمد و سپس به مدت ۱/۵ ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد ذوب شدند. پس از آن، مقدار سینرسیس طبق روش بالا محاسبه شد.

۸.۲. ویسکوزیته

ویسکوزیته نشاسته با استفاده از ویسکومتر چرخشی دیجیتالی (شرکت Brookfield، مدل DV III، ماساچوست، آمریکا) تعیین شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ۱ گرم نشاسته در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط شد. مخلوط به مدت ۱۵ دقیقه در حمام آب با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و سپس تا دمای محیط خنک گردید. اندازه‌گیری ویسکوزیته با استفاده از اسپیندل استاندارد شماره ۳، مطابق با ابعاد تعریف‌شده توسط شرکت سازنده، انجام شد. به منظور حفظ پایداری عملکرد دستگاه، میزان گشتاور در بازه ۳۰ تا ۷۰ درصد تنظیم گردید (Wang et al., 2010b).

۹.۲. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

توپوگرافی سطحی گرانول‌های نشاسته با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (شرکت JEOL، مدل JSM-6380LV، توکیو، ژاپن) مورد مشاهده قرار گرفت. نمونه‌ها بر روی پایه‌های فلزی با استفاده از چسب نقره رسانا تثبیت شدند و سپس با یک لایه نازک طلا پوشش داده شدند. تصاویر با بزرگنمایی $1000\times$ تهیه شد (Wang et al., 2010b).

۱۰.۲. آنالیز آماری

به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، از آزمون آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) جهت بررسی وجود اختلاف معنی‌دار بین تیمارها استفاده شد. تمامی تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم افزار تحلیل آماری SAS ۹/۱ انجام شد. کلیه آنالیزها در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام شد. هم‌چنین کلیه نمودارها با نرم افزار Excel 2016 رسم شدند.

¹ Swelling Power

² Solubility

³ Refrigeration stability

⁴ Freeze-Thaw Stability

۳. نتایج و بحث

۱.۳. ترکیب دانه کینوا

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که دانه‌های کینوا دارای ۵۲ درصد نشاسته، ۲ درصد خاکستر، ۸ درصد رطوبت، ۴ درصد فیبر، ۱۰ درصد روغن و ۲۳ درصد پروتئین بودند. در مقایسه، Lindeboom (۲۰۰۵)، انواع مختلف کینوا را مورد بررسی قرار داد و گزارش کرد که ترکیب دانه شامل ۳۲/۶-۶۱/۵ درصد نشاسته، ۴/۴-۸/۸ درصد روغن، ۱۰-۱۸ درصد پروتئین، ۲/۴-۳/۷ درصد خاکستر و ۱/۱-۱۳/۴ درصد فیبر است (Lindeboom, 2005). این یافته‌ها نشان‌دهنده محتوای پروتئینی بالاتر و همچنین مقادیر روغن و فیبر در محدوده‌های گزارش شده پیشین است.

۲.۳. بازده استخراج نشاسته

بازده استخراج نشاسته کینوا در تیمارهای مختلف در جدول ۱ ارائه شده است و در محدوده ۳۳/۹۶ تا ۴۰/۷ درصد قرار داشت. در روش فراصوت، زمان بر بازده استخراج نشاسته معنادار بود ($p \leq 0.05$) و تیمار ۱۵ دقیقه بالاترین بازده استخراج را شامل شد (۳۹/۳۶ درصد). همچنین در روش آسیاب مرطوب، غلظت انیدرید سولفورو بر بازده استخراج اثرگذار بود ($p \leq 0.05$). تیمارهای ۲۰۰۰ و ۲۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بازده بالاتری نسبت به غلظت ۱۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نشان دادند ($p \leq 0.05$)، اما تفاوت معنی‌داری بین دو غلظت بالاتر (۲۰۰۰ و ۲۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) مشاهده نشد ($p > 0.05$). در روش آنزیمی، افزایش زمان واکنش از ۲ ساعت به ۴ ساعت سبب افزایش معنی‌دار بازده استخراج شد ($p \leq 0.05$)، در حالی‌که تفاوت بین ۴ و ۶ ساعت از نظر آماری معنی‌دار نبود ($p > 0.05$). این نتایج نشان می‌دهد که افزایش شدت تیمار تا یک سطح مشخص می‌تواند جداسازی نشاسته را بهبود دهد، اما ادامه فرآیند لزوماً منجر به افزایش بیشتر بازده نمی‌شود. به طور کلی، بازده استخراج تحت تأثیر نوع روش و شرایط فرآیند قرار داشت و پاسخ نمونه‌ها به هر روش یکسان نبود.

انیدرید سولفورو از طریق فراهم کردن ترکیبی از ویژگی‌های پخش‌پذیری پروتئین^۱، نرم‌کنندگی و خاصیت ضد میکروبی، که همگی برای دستیابی به بازده بالای استخراج ضروری هستند، به استخراج مؤثر نشاسته کمک می‌کند. اثر آن بر پروتئین‌ها به ماهیت کاهنده آن نسبت داده می‌شود که در غلظت‌های بالا می‌تواند موجب تجزیه و تکه‌تکه شدن سریع پروتئین‌ها شود و همچنین ممکن است در فرآیند تخمیر اسید لاکتیک اختلال ایجاد کند (Lopes-Filho et al., 1997; Ramstad & Watson, 1987).

در یک مطالعه مرتبط، Jan و همکاران (۲۰۱۷)، دانه‌های کینوا را به مدت ۲۴ ساعت در محلول‌های قلیایی (۰/۲۵، ۰/۳۰ و ۰/۳۵ درصد NaOH) در دمای ۴ درجه سلسیوس خیساندند و دریافتند که زمان خیساندن تأثیر قابل توجهی بر بازده اجزای مختلف دارد. در حالی‌که افزایش زمان خیساندن باعث افزایش بازده استخراج جوانه (از ۱۹٪ به ۴۶٪) شد، منجر به کاهش چشمگیر در بازده نشاسته، پروتئین و فیبر گردید (Jan, Panesar, Rana, et al., 2017). در مقابل، Perez و همکاران (۲۰۰۱)، گزارش کردند که افزایش زمان خیساندن باعث بهبود بازده استخراج نشاسته ذرت می‌شود؛ با این حال، زمان به‌عنوان یک عامل مستقل، تأثیر آماری معنی‌داری بر کارایی استخراج نداشت (Pérez et al., 2001).

جدول (۱)

۳.۳. مقدار آمیلوز

مقدار آمیلوز در گرانول‌های نشاسته تأثیر قابل توجهی بر خواص فیزیکوشیمیایی و عملکردی آن‌ها دارد. بر اساس شکل ۱، مقدار آمیلوز در نشاسته‌های استخراج‌شده با سه روش مورد استفاده تفاوت‌های معنی‌داری نشان ندادند ($p > 0.05$). این مشاهده حاکی از آن است که تغییرات مقدار آمیلوز، بیش از آنکه به روش استخراج وابسته باشد، می‌تواند به نوع گیاه، رقم و ویژگی‌های ذاتی نشاسته مربوط باشد. Chinnaswamy و همکاران (۱۹۸۸)، مقدار آمیلوز در ذرت را ۲۵ درصد گزارش کردند (Chinnaswamy & Hanna, 1988)، در حالی که Seetharaman و همکاران (۲۰۰۱)، مقدار آمیلوز را در ۳۵ رقم مختلف ذرت در محدوده ۱۶/۱ تا ۲۳/۳ درصد گزارش نمودند (Seetharaman et al., 2001).

شکل (۱)

¹ Protein dispersibility

۴.۳. کدورت

مقدار کدورت نمونه‌ها در طی استخراج در محدوده ۲/۳۳ تا ۳/۱۹ قرار داشت. مقایسه مقادیر کدورت میان نشاسته استخراج‌شده با روش فراصوت و نشاسته‌های حاصل از روش‌های آسیاب مرطوب و آنزیمی (شکل ۲) نشان می‌دهد که تیمار فراصوت موجب کاهش کدورت ژل می‌شود. در روش فراصوت، کمترین میزان کدورت در زمان ۳۰ دقیقه حاصل شد و بیشترین میزان آن در زمان صفر بود ($p \leq 0.05$). کاهش کدورت در نمونه‌های تیمار شده با فراصوت را می‌توان به اثر کاویتاسیون و کاهش تجمع ذرات نسبت داد که موجب عبور بهتر نور از ژل نشاسته می‌شود. این نتیجه نشان می‌دهد که روش فراصوت در مقایسه با سایر روش‌ها ژل شفاف‌تری ایجاد کرده است (Amini et al., 2015). در روش آسیاب مرطوب تیمار ۱۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر انیدرید سولفور بیشترین میزان کدورت را نشان داد ($p \leq 0.05$). هم‌چنین در روش آنزیمی زمان ۲ ساعت به بیشترین میزان کدورت درست یافت که از نظر آماری معنی‌دار بود ($p \leq 0.05$). Amini و همکاران (۲۰۱۵)، در مطالعه‌ای درباره رفتار بیات‌شدن نشاسته ذرت تحت روش فراصوت توان‌بالا گزارش کردند که این نوع نشاسته تمایل کمتری به بیات‌شدن دارد. در میان نمونه‌ها، نمونه شاهد (بدون تیمار فراصوت) بیشترین مقدار کدورت را نشان داد (Amini et al., 2015). هم‌چنین Kaur و همکاران (۲۰۰۰)، نشان دادند که در طی فرآیند ژلاتینه شدن، آمیلوز و لیپیدها کمپلکسی را تشکیل می‌دهند که موجب تأخیر در تجمع مولکولی (رتروگراواسیون) شده و در نتیجه، افزایش کدورت با سرعت کمتری نسبت به محلول‌های نشاسته خالص رخ می‌دهد (Kaur & Singh, 2000). در مطالعه‌ای بر خواص فیزیکوشیمیایی نشاسته برنج، Yu و همکاران (۲۰۱۲)، دریافتند که مقدار آمیلوز بر کدورت تعلیق نشاسته اثرگذار است، به‌طوری‌که با افزایش مقدار آمیلوز، کدورت نیز افزایش می‌یابد. آن‌ها هم‌چنین گزارش کردند که کدورت آرد برنج طی ۷ روز نگهداری افزایش می‌یابد (Yu et al., 2012).

Hu و همکاران (۲۰۱۴) و Jambrak و همکاران (۲۰۱۰)، گزارش کردند که طی نگهداری طولانی‌مدت ژل‌های نشاسته، مولکول‌های آمیلوز با تشکیل پیوندهای هیدروژنی با یکدیگر، موجب افزایش تدریجی کدورت ژل می‌شوند (Hu et al., 2014; Jambrak et al., 2010). Bel و همکاران (۲۰۱۳) نیز نشان دادند که پس از تیمار فراصوت، ژل‌های نشاسته کاملاً شفاف می‌شوند و این پدیده را به کاهش اندازه ذرات نشاسته نسبت دادند (Bel Haaj et al., 2013).

شکل (۲)

۵.۳. قدرت تورم و حلالیت

تورم گرانول‌های نشاسته ناشی از تشکیل پیوندهای هیدروژنی میان مولکول‌های آب و جایگاه‌های فعال موجود بر سطح نشاسته است. قدرت تورم و حلالیت شواهدی از نوع و شدت تعامل میان مولکول‌های آب و زنجیره‌های نشاسته فراهم می‌کنند. حلالیت بیانگر میزان نشت آمیلوز از گرانول‌های نشاسته است، در حالی که شاخص حلالیت در آب مقدار پلی‌ساکاریدهای آزاد یا رهاسده از گرانول‌ها را پس از افزودن آب ارزیابی می‌کند. جذب آب به در دسترس بودن گروه‌های هیدروفیل و توانایی تشکیل ژل توسط ماکرومولکول‌ها بستگی دارد و به‌عنوان شاخصی برای میزان آب جذب‌شده و درجه ژلاتینه شدن نشاسته به کار می‌رود (Barminas et al., 2008; Wang et al., 2010a).

مقادیر حلالیت نشاسته‌های استخراج‌شده با روش‌های مختلف در این تحقیق از نظر آماری تفاوت معنی‌داری نداشتند (شکل ۳) ($p > 0.05$). و محدوده آن بین ۱۴-۱۵/۵ قرار داشت. هم‌چنین قدرت تورم در روش‌های آنزیمی و فراصوت از نظر آماری معنی‌دار نبودند ($p > 0.05$) اما در روش آسیاب مرطوب ۱۸۰۰ میلی‌گرم/لیتر انیدرید سولفور، تفاوت معنی‌داری را نشان داد (۹/۱۶ درصد) (شکل ۴) ($p \leq 0.05$). این نتایج نشان می‌دهد که روش‌های استخراج به‌کاررفته در این مطالعه، به‌جز تیمار آسیاب مرطوب در غلظت ۱۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، اثر قابل‌توجهی بر توانایی جذب آب و تورم گرانول‌های نشاسته نداشته‌اند.

پدیده کاویتاسیون موجب تخریب گرانول‌های نشاسته و نواحی بلورین آن‌ها شده و نفوذپذیری آب به داخل گرانول‌ها را افزایش می‌دهد؛ در نتیجه، جایگاه‌های فعال بیشتری برای تشکیل پیوندهای هیدروژنی در اختیار مولکول‌های آب قرار می‌گیرد (Jambrak et al., 2010). نتایج مشابهی در خصوص افزایش تورم گرانول‌های نشاسته پس از اعمال فراصوت توسط Amini و همکاران (۲۰۱۵) و Hu و همکاران (۲۰۱۴) گزارش شده است (Amini et al., 2015; Hu et al., 2014). در طی فرآیند حل شدن نشاسته، بخش آمیلوز متحرک از گرانول‌ها آزاد شده و در محیط مایع پیرامون حل می‌شود. با افزایش دما، تورم

گرانول‌ها و در نهایت ژلاتینه شدن آن‌ها افزایش یافته و موجب آزادسازی بیشتر آمیلوز می‌شود؛ از این‌رو، حلالیت نشاسته در دماهای بالاتر افزایش می‌یابد (Leach, 1959).

مقادیر قدرت تورم مشاهده‌شده در مطالعه حاضر با دامنه مقادیر گزارش‌شده برای سایر نشاسته‌های گیاهی مطابقت داشت. Barminas و همکاران (۲۰۰۸)، مقادیر قدرت تورم را برای نشاسته سیب‌زمینی (۵۶/۲-۶۴)، نشاسته دانه نخل (۱۵) و نشاسته شاه‌بلوط (۱۳/۶) گزارش کردند (Barminas et al., 2008).

شکل (۳)

شکل (۴)

۶.۳. پایداری در شرایط تبرید و انجماد-ذوب

پایداری نشاسته‌های استخراج‌شده تحت شرایط نگهداری در یخچال و انجماد در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس نتایج جدول مذکور، اختلاف آماری معنی‌داری بین نمونه‌ها مشاهده نشد ($p \leq 0.05$). تمامی نمونه‌ها در پایداری تبرید در محدوده ۵/۲۷ تا ۶/۲۳ درصد و در پایداری انجماد در محدوده ۱۹/۰۳ تا ۲۲/۴۳ درصد قرار داشتند. ثبات این پارامترها نشان می‌دهد که فرآیندهای استخراج (فراصوت، آنزیمی و آسیاب مرطوب) بر ساختار کریستالی و پیوندهای آمیلوز-آمیلوپکتین به گونه‌ای اثر نگذاشته‌اند که منجر به تغییر در نرخ بازگشت نشاسته و خروج آب از شبکه ژل شود. این ویژگی برای تولید محصولات منجمد که نیاز به پایداری بافت دارند، حائز اهمیت است. بر اساس مطالعات Perez-Pacheco و همکاران (۲۰۱۴)، نشاسته‌هایی با محتوای آمیلوز بالا، مانند سیب‌زمینی (۲۰/۱-۳۱/۰٪)، ذرت (۲۲/۴-۳۲/۵٪)، تارو (۲۸/۷-۲۹/۹٪) و کاساوا (۱۸/۶-۲۳/۶٪)، به دلیل آزادسازی حجم قابل توجهی از آب طی فرآیند رتروگراداسیون، دچار سینرزیس می‌شوند. این پدیده ناشی از بازآرایی و بازتبلور مجدد زنجیره‌های آمیلوز و در نتیجه خروج آب محبوس در شبکه ژل است (Pérez-Pacheco et al., 2014).

White و همکاران (۱۹۸۹)، فرآیند انجماد-ذوب را بررسی کرده و نشان دادند که نمونه‌های نشاسته ذرت واکسی و ذرت معمولی به ترتیب ۵۸٪ و ۵۹٪ از آنتالپی ژلاتینه شدن اولیه خود را بازیابی کردند، که بیانگر وقوع تغییرات ساختاری در طی چرخه‌های انجماد و ذوب است (White et al., 1989). Woodruff و همکاران (۱۹۳۸)، تغییرات ریزساختاری در خمیر نشاسته ناشی از انجماد را بررسی کردند و نتیجه گرفتند انجماد، فرآیند رتروگراداسیون را تسریع می‌کند (Woodruff & MacMasters, 1938).

جدول (۲)

۷.۳. ویسکوزیته

ویسکوزیته به عنوان مقاومت یک سیال در برابر تنش برشی تعریف می‌شود. با افزایش دما، ویسکوزیته مایعات معمولاً کاهش می‌یابد (Pérez-Andrés et al., 2018). در مطالعه حاضر، ویسکوزیته نشاسته‌های استخراج‌شده با سه روش مختلف در نرخ‌های برش ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ دور در دقیقه اندازه‌گیری شد (شکل ۵). در هر سه نمودار، با افزایش سرعت چرخش، گرانیوی به شدت کاهش یافته است. این رفتار نشان‌دهنده رفتار غیرنیوتنی شل‌شونده با برش است. با افزایش سرعت هم‌زدن، زنجیره‌های پلیمری نشاسته (آمیروز و آمیلوپکتین) در جهت جریان جهت‌گیری کرده و مقاومت آن‌ها در برابر جریان کاهش می‌یابد (Pérez-Andrés et al., 2018). مطابق شکل ۵، تفاوت معناداری میان تیمارهای هر سه روش استخراج مشاهده گردید ($p \leq 0.05$). نشاسته استخراج‌شده با روش آسیاب مرطوب (c) بالاترین ویسکوزیته را نسبت به دو روش دیگر دارا بود. در این روش افزایش غلظت اسید سولفوریک منجر به کاهش ویسکوزیته شد و بیشترین ویسکوزیته در غلظت ۱۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر انیدرید سولفوریک مشاهده گردید (۴۵۹ مگاپاسکال / ثانیه). در روش استخراج به کمک فراصوت (a)، مقادیر ویسکوزیته پایین‌تر از دو روش دیگر بود. در این روش فرآیند کاویتاسیون ناشی از امواج فراصوت و نیروهای برشی شدید ایجاد شده، ساختار گرانول‌ها را تحت تأثیر قرار داده و با گسستن پیوندهای بین‌مولکولی، سبب تسهیل جریان و کاهش گرانیوی می‌شود. در مقابل، در روش آنزیمی، افزایش زمان گرمخانه‌گذاری از ۲ به ۶ ساعت سبب افزایش گرانیوی ژل نشاسته شد (Zhu & Li, 2019).

شکل (۵)

مطابق با یافته‌های Zhu و همکاران (۲۰۱۵)، گرانول‌های نشاسته تحت روش فراصوت دچار آسیب فیزیکی و کاهش اندازه مولکولی می‌شوند (Zhu, 2015). Perez و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که فراورده‌های غذایی مختلف شامل شیر، پنیر، روغن و گوشت گاو که تحت تیمار فراصوت قرار گرفتند، تغییرات فیزیکوشیمیایی چشمگیری نشان دادند (Pérez-Andrés et al., 2018). در مطالعه‌ای توسط Zhu و همکاران (۲۰۱۹)، اثر تیمار فراصوت بر ویسکوزیته رئولوژیکی آرد نشاسته کینوا از گونه‌های مختلف بررسی شد و نتایج بیانگر کاهش ویسکوزیته پس از تیمار بود (Zhu & Li, 2019). همچنین، Iida و همکاران (۲۰۰۸)، اثرات امواج فراصوت بر ویسکوزیته نشاسته ذرت را ارزیابی کرده و نتیجه گرفتند که تیمار فراصوت به طور معنی‌داری موجب کاهش ویسکوزیته نشاسته می‌شود. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که تأثیر شدت‌های مختلف امواج فراصوت بر کاهش ویسکوزیته، در دماهای پایین‌تر نسبت به دماهای بالاتر محسوس‌تر بود (Iida et al., 2008).

۸.۳. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

تصویربرداری SEM برای سه نوع نشاسته کینوا انجام شد (شکل ۶). بررسی تصاویر نشان داد که هیچ‌گونه تفاوت قابل مشاهده‌ای در مورفولوژی گرانول‌های نشاسته میان سه روش استخراج وجود ندارد. تمامی نمونه‌ها مورفولوژی نامنظم و چندضلعی مشخصی را نشان دادند که ویژگی معمول نشاسته کینوا است. از آنجا که تخریب مورفولوژیکی گرانول‌ها معمولاً در اثر ژلاتینه‌شدن، هیدرولیز شدید یا تنش مکانیکی بالا رخ می‌دهد، حفظ ساختار گرانولی در این مطالعه بیانگر ملایم بودن شرایط استخراج است. همچنین، بیشتر گرانول‌ها اندازه‌ای کوچک داشتند. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام‌شده، اندازه گرانول‌ها در محدوده ۱/۵ تا ۴/۵ میکرومتر قرار گرفت.

مطالعه Singh و همکاران (۲۰۰۳)، با مقایسه مورفولوژی گرانول‌های نشاسته ذرت و کینوا نشان داد که نشاسته ذرت دارای سطحی صاف و غیرزاویه‌دار است، در حالی که گرانول‌های نشاسته کینوا سطح زاویه‌دار و تیزتری دارند (Singh & Singh, 2003). Lindeboom و همکاران (۲۰۰۵)، نیز گزارش کردند که گرانول‌های نشاسته کینوا عمدتاً شکلی چندضلعی دارند (Lindeboom, 2005). هم‌چنین طبق یافته‌های Jan و همکاران (۲۰۱۷)، اندازه متوسط گرانول نشاسته کینوا (۱/۳ میکرومتر) به‌طور معنی‌داری کوچک‌تر از ذرت (۹/۷۶ میکرومتر) است. دامنه قطر گرانول‌های نشاسته کینوا بین ۰/۷۶۶ تا ۴/۰۵۰ میکرومتر گزارش شد، در حالی که گرانول‌های نشاسته ذرت دامنه‌ای بسیار بزرگ‌تر از ۳/۷۸ تا ۵۱/۹۴ میکرومتر دارند (Jan, Panesar, & Singh, 2017).

شکل (۶)

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نشاسته کینوا با استفاده از سه روش استخراج شامل آسیاب مرطوب، روش آنزیمی و فراصوت استخراج و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و عملکردی آن‌ها مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که روش استخراج تأثیر معنی‌داری ($P \leq 0.05$) بر شاخص‌های کدورت و ویسکوزیته نشاسته کینوا داشت؛ به طوری که روش فراصوت منجر به کاهش معنی‌دار کدورت گردید. با این حال، تفاوت بین روش‌های مختلف استخراج بر بازده استخراج نشاسته، حلالیت، مقدار آمیلوز، پایداری تبرید و انجماد-ذوب نشاسته از نظر آماری غیرمعنی‌دار ($P > 0.05$) ارزیابی شد. هم‌چنین مطابق تصاویر میکروسکوپ الکترونی در مورفولوژی گرانول‌ها تأثیر قابل‌توجهی مشاهده نشد. نشاسته استخراج‌شده با روش فراصوت دارای حلالیت و قدرت تورم بالاتر و کدورت کمتری بود؛ از این رو، این روش ممکن است برای کاربردهایی که به شفافیت و قابلیت هیدراتاسیون بیشتر نیاز دارند، مناسب‌تر باشد. در مقابل، نشاسته حاصل از روش آسیاب مرطوب ویسکوزیته بالاتری نشان داد که بیانگر توانایی بیشتر آن در ایجاد قوام در سامانه‌های غذایی است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز نشان داد که شکل و ساختار گرانول‌های نشاسته در اثر روش‌های مختلف استخراج تغییر محسوسی نداشته است. به طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که انتخاب روش استخراج می‌تواند با توجه به کاربرد نهایی نشاسته در صنایع غذایی و فرآیندی انجام گیرد.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

- Adigwe, O. P., Egharevba, H. O., & Emeje, M. O. (2022). Starch: A Veritable Natural Polymer. *Starch: Evolution and recent advances*, 23. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.102941>
- Amini, M., Razavi, A., & Ali, S. M. (2015). Ultrasound-assisted acid-thinning of corn starch: Morphological, physicochemical, and rheological properties. *Starch/Staerke*, 67(7-8), 640–653. <https://doi.org/10.1002/star.201400228>
- AOAC. (1996). Official Methods of Analysis, Methods 925.09, 923.03, 962.09, 920.39, 979.09, 996.11. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA, USA.
- Ballester-Sánchez, J., Gil, J. V., Fernández-Espinar, M. T., & Haros, C. M. (2019). Quinoa wet-milling: Effect of steeping conditions on starch recovery and quality. *Food Hydrocoll.*, 89, 837–843. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.11.053>
- Barminas, J. T., Onen, A. I., Williams, E. T., Zaruwa, M. Z., Mamuru, S. A., & Haggai, D. (2008). Studies on functional properties of borassus starch from fresh germinating nuts of giginya (*Borassus aethiopum*) palm. *Food Hydrocoll.*, 22(2), 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.11.018>
- Bayati, A., Javanmard, M., Eikani, M. H., & Sharifi, A. (2022). The effect of starch isolation method on morphological and physicochemical properties of Zagros Oak (*Quercus brantii* var. *Persica*) starch. *Starch-Stärke*, 74(7-8), 2200016. <https://doi.org/10.1002/star.202200016>
- Bel Haaj, S., Magnin, A., Pétrier, C., & Boufi, S. (2013). Starch nanoparticles formation via high power ultrasonication. *Carbohydr. Polym.*, 92(2), 1625–1632. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.11.022>
- Burrell, M. (2003). Starch: the need for improved quality or quantity—an overview. *J. Exp. Bot.*, 54(382), 451–456. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg049>
- Chinnaswamy, R., & Hanna, M. (1988). Relationship between amylose content and extrusion-expansion properties of corn starches. *Cereal Chem.*, 65(2), 138–143.
- Correia, P., Cruz-Lopes, L., & Beirão-da-Costa, L. (2012). Morphology and structure of chestnut starch isolated by alkali and enzymatic methods. *Food Hydrocoll.*, 28(2), 313–319. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.12.013>
- Correia, P. R., & Beirão-da-Costa, M. L. (2010). Chestnut and acorn starch properties affected by isolation methods. *Starch/Staerke*, 62(8), 421–428. <https://doi.org/10.1002/star.201000003>
- Coțovanu, I., Batariuc, A., & Mironeasa, S. (2020). Characterization of Quinoa Seeds Milling Fractions and Their Effect on the Rheological Properties of Wheat Flour Dough. *Appl. Sci.*, 10(20), 7225.
- Farahnaky, A., Majzoobi, M., & Mesbahi, G. (2009). Characteristics and applications of hydrocolloids in food and pharmaceutical products. Agricultural Sciences Publication, pp. 112–185 [In Persian].
- González-Lemus, L. B., Georgina, C.-D., Paz, S.-C. M. d. l., Mayra, D.-R., Mónica, R.-M., Jorge, C.-P. J., Norma, G.-V., & Farrera-Rebollo, R. R. (2018). Ultrasound-assisted extraction of starch from frozen jicama (*P. erosus*) roots: Effect on yield, structural characteristics and thermal properties. *CyTA J. Food*, 16(1), 738–746. <https://doi.org/10.1080/19476337.2018.1462852>
- Hameed, M., Ahmad, S. W., Ahmad, S., Qutab, H. G., Dasih, M., & Imran, M. (2020). Enzymatic extraction of potato starch: A parametric optimization study using response surface methodology. *Pol. J. Chem. Technol.*, 22(3). <https://doi.org/10.2478/pjct-2020-0027>
- Hu, A., Li, L., Zheng, J., Lu, J., Meng, X., Liu, Y., & Rehman, R. u. (2014). Different-frequency ultrasonic effects on properties and structure of corn starch. *J. Sci. Food Agric.*, 94(14), 2929–2934. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6636>
- Iida, Y., Tuziuti, T., Yasui, K., Towata, A., & Kozuka, T. (2008). Control of viscosity in starch and polysaccharide solutions with ultrasound after gelatinization. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 9(2), 140–146. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.03.029>
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI) 2705. Determination of moisture content. Tehran, I.R. Iran. [In Persian].
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI) 2706. Determination of ash content. Tehran, I.R. Iran. [In Persian].
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI) 3105. Determination of crude fiber. Tehran, I.R. Iran. [In Persian].
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI) 4798. Determination of crude fat. Tehran, I.R. Iran. [In Persian].
- Jambrak, A. R., Herceg, Z., Šubarić, D., Babić, J., Brnčić, M., Brnčić, S. R., Bosiljkov, T., Čvek, D., Tripalo, B., & Gelo, J. (2010). Ultrasound effect on physical properties of corn starch. *Carbohydr. Polym.*, 79(1), 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.07.051>

- Jan, K. N., Panesar, P. S., Rana, J. C., & Singh, S. (2017). Structural, thermal and rheological properties of starches isolated from Indian quinoa varieties. *Int. J. Biol. Macromol.*, 102, 315–322. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.04.027>
- Jan, K. N., Panesar, P. S., & Singh, S. (2017). Process standardization for isolation of quinoa starch and its characterization in comparison with other starches. *J. Food Meas. Charact.*, 11(4), 1919–1927. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9574-6>
- Junejo, S. A., Wang, J., Liu, Y., Jia, R., Zhou, Y., & Li, S. (2022). Multi-Scale Structures and Functional Properties of Quinoa Starch Extracted by Alkali, Wet-Milling, and Enzymatic Methods. *Foods*, 11(17), 2625.
- Kaur, K., & Singh, N. (2000). Amylose-lipid complex formation during cooking of rice flour. *Food Chem.*, 71(4), 511–517. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00202-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00202-8)
- Lan, W., Zhihua, Y., Yun, Z., Bijun, X., & Zhida, S. (2008). Morphological, Physicochemical and Textural Properties of Starch Separated from Chinese Water Chestnut. *Starch/Staerke*, 60(3-4), 181–191. <https://doi.org/10.1002/star.200700645>
- Leach, H. W. (1959). Structure of starch granule I. Swelling and solubility patterns of various starches. *Cereal Chem.*, 36, 534–544.
- Li, G., & Zhu, F. (2017). Amylopectin molecular structure in relation to physicochemical properties of quinoa starch. *Carbohydr. Polym.*, 164, 396–402. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.02.014>
- Li, G., & Zhu, F. (2018a). Effect of high pressure on rheological and thermal properties of quinoa and maize starches. *Food Chem.*, 241, 380–386. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.088>
- Li, G., & Zhu, F. (2018b). Quinoa starch: Structure, properties, and applications. *Carbohydr. Polym.*, 181, 851–861. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.11.067>
- Lindeboom, N. (2005). *Studies on the characterization, biosynthesis and isolation of starch and protein from quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) University of Saskatchewan*. <https://hdl.handle.net/10388/etd-08152005-110823>
- Lopes-Filho, J. F., Buriak, P., Tumbleson, M., & Eckhoff, S. (1997). Intermittent milling and dynamic steeping process for corn starch recovery. *Cereal Chem.*, 74(5), 633–638. <http://dx.doi.org/10.1094/CCHEM.1997.74.5.633>
- Park, S. H., Bean, S. R., Wilson, J. D., & Schober, T. J. (2006). Rapid Isolation of Sorghum and Other Cereal Starches Using Sonication. *Cereal Chem.*, 83(6), 611–616. <https://doi.org/10.1094/CC-83-0611>
- Pereira, E., Encina-Zelada, C., Barros, L., Gonzales-Barron, U., Cadavez, V., & Ferreira, I. C. (2019). Chemical and nutritional characterization of Chenopodium quinoa Willd (quinoa) grains: A good alternative to nutritious food. *Food Chem.*, 280, 110–114. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.068>
- Pérez-Andrés, J. M., Charoux, C. M. G., Cullen, P. J., & Tiwari, B. K. (2018). Chemical Modifications of Lipids and Proteins by Nonthermal Food Processing Technologies. *J. Agric. Food Chem.*, 66(20), 5041–5054. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b06055>
- Pérez-Pacheco, E., Moo-Huchin, V. M., Estrada-León, R. J., Ortiz-Fernández, A., May-Hernández, L. H., Ríos-Soberanis, C. R., & Betancur-Ancona, D. (2014). Isolation and characterization of starch obtained from Brosimum alicastrum Swartz Seeds. *Carbohydr. Polym.*, 101, 920–927. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.10.012>
- Pérez, O. E., Haros, M., & Suarez, C. (2001). Corn steeping: influence of time and lactic acid on isolation and thermal properties of starch. *J. Food Eng.*, 48(3), 251–256. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00165-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00165-5)
- Pinyo, J., Luangpituksa, P., Suphantharika, M., Hansawasdi, C., & Wongsagonsup, R. (2017). Improvement of sago starch extraction process using various pretreatment techniques and their pretreatment combination. *Starch/Staerke*, 69(9-10), 1700005. <https://doi.org/10.1002/star.201700005>
- Ramstad, P. E., & Watson, S. A. (1987). *Corn: chemistry and technology*. American Association of Cereal Chemists.
- Seetharaman, K., Tziotis, A., Borrás, F., White, P. J., Ferrer, M., & Robutti, J. (2001). Thermal and Functional Characterization of Starch from Argentinean Corn. *Cereal Chem.*, 78(4), 379–386. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2001.78.4.379>
- Singh, J., & Singh, N. (2003). Studies on the morphological and rheological properties of granular cold water soluble corn and potato starches. *Food Hydrocoll.*, 17(1), 63–72. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(02\)00036-X](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(02)00036-X)
- Sit, N., Deka, S. C., & Misra, S. (2014). Combined effect of ultrasound and enzymatic pretreatment on yield and functional properties of taro (Colocasia esculenta) starch. *Starch/Staerke*, 66(11-12), 959–967. <https://doi.org/10.1002/star.201400085>
- Wang, J., Su, L., & Wang, S. (2010a). Physicochemical properties of octenyl succinic anhydride-modified potato starch with different degrees of substitution. *J. Sci. Food Agric.*, 90(3), 424–429. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3832>
- White, P. J., Abbas, I. R., & Johnson, L. A. (1989). Freeze-Thaw Stability and Refrigerated-Storage Retrogradation of Starches. *Starch/Staerke*, 41(5), 176–180. <https://doi.org/10.1002/star.19890410505>

- Williams, P. (1970). A rapid colorimetric procedure for estimating the amylose content of starches and flours. *Cereal Chem.*, 47, 411–420.
- Woodruff, S., & MacMasters, M. M. (1938). *Gelatinization and retrogradation changes in corn and wheat starches shown by photomicrographs. Bulletin (University of Illinois (Urbana-Champaign campus). Agricultural Experiment Station); no. 445.*
- Yu, S., Ma, Y., Menager, L., & Sun, D.-W. (2012). Physicochemical Properties of Starch and Flour from Different Rice Cultivars. *Food Bioprocess Technol.*, 5(2), 626–637. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0330-8>
- Zhu, F. (2015). Impact of ultrasound on structure, physicochemical properties, modifications, and applications of starch. *Trends Food Sci. Technol.*, 43(1), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.12.008>
- Zhu, F., & Li, H. (2019). Modification of quinoa flour functionality using ultrasound. *Ultrason. Sonochem.*, 52, 305–310. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.11.027>

Investigation of quinoa starch extraction process and comparison of its physicochemical and rheological properties

Reza Varanloo¹, Akram Sharifi^{2,1}, Atefe Taherkhani¹, Abolfazl Bayati³

1. Master's Graduate, Department of Food Science and Technology, Qa .C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran.
2. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Qa .C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran.
3. PhD Graduate, Department of Food Science, Institute of Chemical Engineering, Iranian Research Organization for Science & Technology (IROST), Tehran, Iran.

Extended Abstract

Introduction:

Starch is one of the most widely utilized biopolymers in the global food and non-food industries due to its abundance, renewability, and versatile physicochemical properties. It constitutes the major carbohydrate reserve in cereals and legumes, which serve as fundamental sources of energy in human diets worldwide. In recent years, quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*), classified as a pseudocereal, has attracted considerable interest owing to its exceptional nutritional composition, including a balanced amino acid profile, high-quality protein, dietary fiber, and bioactive compounds. Beyond its nutritional value, quinoa has become an important raw material for extraction of starch with unique functional and structural characteristics. Quinoa starch typically exhibits a low gelatinization temperature, small polygonal granules, and a relatively variable amylose content that ranges from 0.3% to 27%, depending on the cultivar. These properties suggest its potential applications in food formulations that demand particular viscosity, clarity, gelatinization behavior, or processing stability.

The extraction method plays a pivotal role in determining starch quality and functionality. Mechanical, chemical, enzymatic, and physical treatments can modify starch granule structure, molecular arrangement, and rheological properties. However, limited studies have compared different extraction methods for quinoa starch, particularly focusing simultaneously on physicochemical traits, functional behavior, and morphological integrity of granules. Therefore, a comprehensive evaluation of extraction techniques is essential to tailor quinoa starch for specific industrial applications.

The present study aimed to extract starch from quinoa seeds using three different methods—wet milling, enzymatic treatment with protease, and ultrasound-assisted extraction—and to compare their effects on yield, solubility, swelling power, turbidity, amylose content, freeze–thaw stability, viscosity, and granule morphology. This research provides valuable insights into how extraction techniques influence the functional suitability of quinoa starch for food processing and related industries.

Materials and Methods:

Quinoa seeds were sourced from Kashmar, Razavi Khorasan Province, and their proximate composition—including moisture, ash, crude fiber, oil, total starch, and crude protein—was determined according to AOAC standard procedures. Starch was extracted using three methods. In the ultrasound-assisted method, ground quinoa flour was soaked in sodium bisulfite solution (1500 mg/L), subjected to freeze–thaw cycles, mixed vigorously, and treated with ultrasound (40 kHz) for 10, 20, or 30 minutes at $30 \pm 2^\circ\text{C}$. The resulting slurry was filtered through a 120-mesh sieve, centrifuged, and oven-dried at 50°C .

In the wet milling method, quinoa grains were soaked for 48 hours in sulfurous acid solution at concentrations of 1800, 2000, or 2200 mg/L at 50°C . After soaking, the material was wet milled, passed through 80- and 120-mesh sieves, centrifuged, and dried at 50°C .

¹ Corresponding authors: asharifi@iau.ac.ir

For enzymatic extraction, 120 g of quinoa flour was mixed with 360 mL water, adjusted to pH 7.5, and incubated with 0.1 g protease enzyme for 2, 4, or 6 hours at 37°C with continuous stirring. The starch fraction was collected via sieving (120 mesh), centrifugation, and drying.

Physicochemical analyses included extraction yield, amylose content, turbidity, swelling power, solubility, freeze–thaw stability (syneresis), and paste viscosity measured using a Brookfield DV III viscometer. Morphology of starch granules was observed with scanning electron microscopy (SEM). Statistical analysis was conducted using one-way ANOVA (SAS 9.1) with a significance level of 5%.

Results and discussion:

The chemical composition of quinoa grains used in this study demonstrated values consistent with previous reports, although the protein content was notably higher. This provided an appropriate background for the starch extraction procedures. Extraction yield differed slightly among treatments but remained statistically unaffected across methods; numerically, the wet-milling method with 2000 mg/L sulfurous acid solution yielded the highest recovery, while enzymatic extraction produced the lowest yield.

Amylose content ranged narrowly between 14% and 15.13%, showing no significant influence from extraction technique, likely because all methods were applied to the same quinoa variety, where amylose content tends to remain genetically stable.

Functional properties exhibited more pronounced variations. Ultrasound treatment for 30 minutes increased both swelling power and solubility, suggesting partial disruption of surface structures and enhanced interaction with water. In contrast, enzymatic extraction generated starch with the highest turbidity, possibly due to residual non-starch components or partial granule surface alteration. Ultrasound-extracted starch exhibited the lowest turbidity, indicating superior clarity and suitability for applications requiring transparent gels or solutions.

Viscosity measurements revealed that wet-milled starch produced the highest paste viscosity, likely driven by greater granule integrity and stronger swelling during heating. Starch obtained from ultrasound treatment exhibited the lowest viscosity, consistent with reported effects of ultrasonic cavitation that can reduce molecular weight or partially alter granule structure, leading to lower paste consistency.

Freeze–thaw stability showed no significant differences among samples, suggesting that extraction method did not substantially affect retrogradation tendencies under the conditions tested.

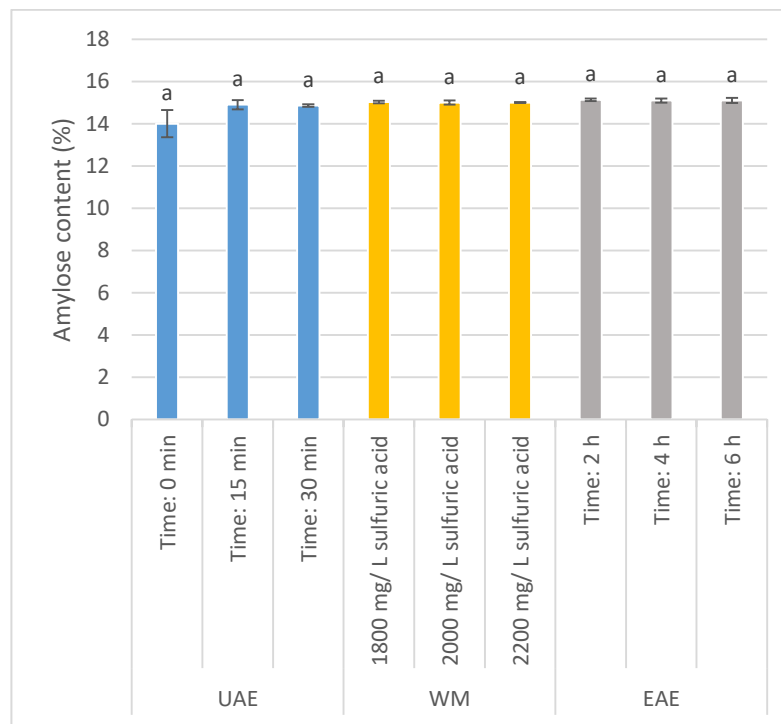
SEM images confirmed that granule morphology remained intact across all extraction techniques. All samples displayed characteristic polygonal granules with smooth surfaces and sizes ranging from approximately 1.5 to 4.5 μm . The absence of visible damage or fragmentation in ultrasound-treated granules indicated that the applied intensity was sufficient to influence functional properties without causing structural degradation.

Overall, the results highlight that while extraction method exerts measurable effects on functional attributes such as turbidity, swelling power, solubility, and viscosity, it does not significantly alter intrinsic characteristics including amylose content, granule shape, or freeze–thaw behavior.

Conclusion:

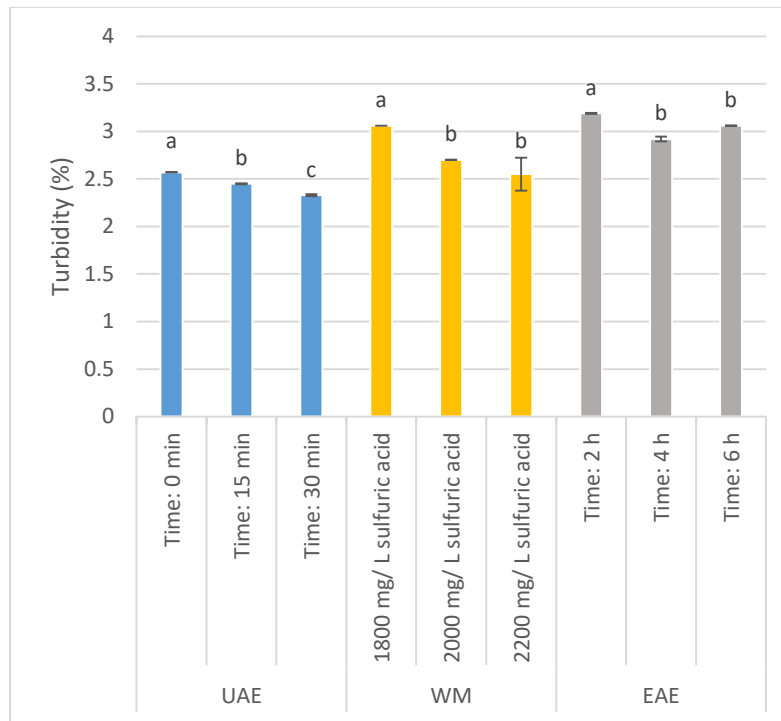
This study compared three distinct starch extraction methods—wet milling, enzymatic hydrolysis, and ultrasound treatment—and demonstrated that extraction technique significantly influences functional properties of quinoa starch while exerting minimal effects on intrinsic structural characteristics. Ultrasound treatment improved clarity, swelling power, and solubility, making it suitable for applications requiring enhanced hydration and transparency. Wet milling produced starch with the highest viscosity, indicating its potential usefulness in processes where thickening ability is critical. Enzymatic extraction resulted in the highest turbidity, suggesting less effective removal of non-starch components. Notably, amylose content, granule morphology, and freeze–thaw stability remained unaffected by extraction method. Collectively, these findings highlight the versatility of quinoa starch and the importance of selecting an extraction method tailored to the intended functional application.

Keywords: Quinoa, Starch, Ultrasound, Enzymatic Method, Extraction



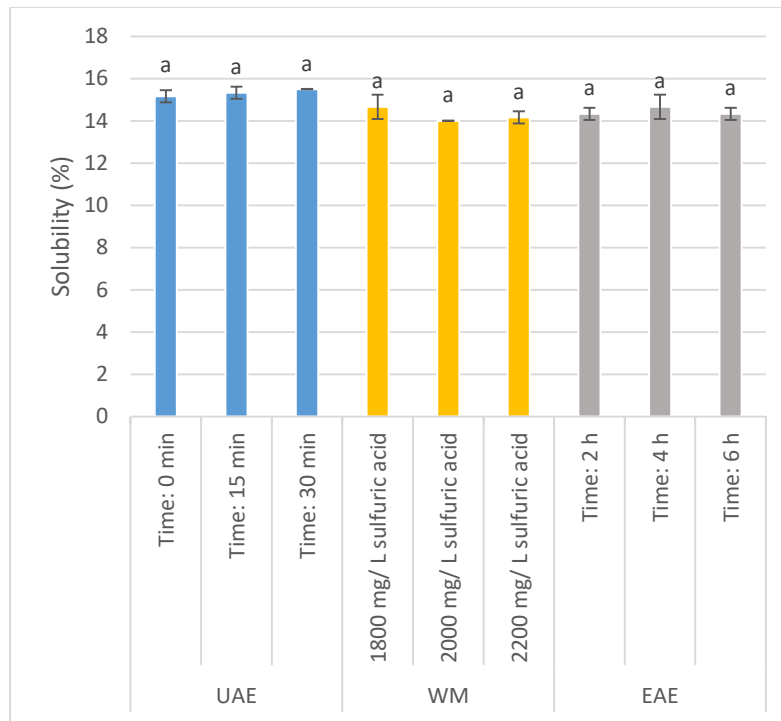
شکل (1) محتوای آمیلوز (%) در نشاسته استخراج شده با سه روش مختلف (فراصوت، آسیاب مرطوب و آنزیمی)

Fig. 1. Amylose Content (%) of Starch Extracted Using Different Methods (UAE: Ultrasound-Assisted Extraction, WM: Wet-Milling, and EAE: Enzyme-Assisted Extraction)



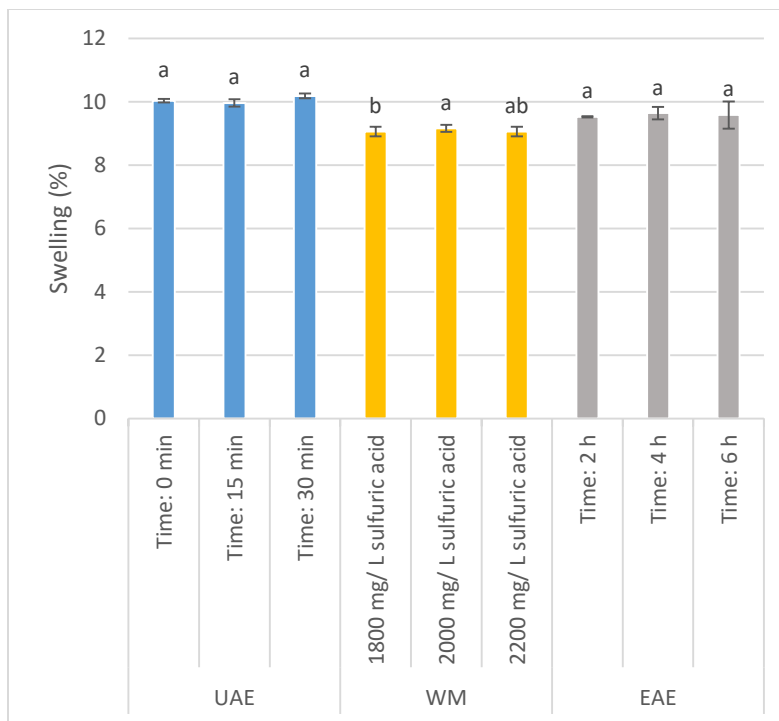
شکل (۲) تغییرات کدورت (٪) نشاسته استخراج شده با سه روش مختلف (فراصوت، آسیاب مرطوب و آنزیمی)

Fig. 2. Turbidity (%) of Starch Extracted Using Different Methods (UAE: Ultrasound-Assisted Extraction, WM: Wet-Milling, and EAE: Enzyme-Assisted Extraction)



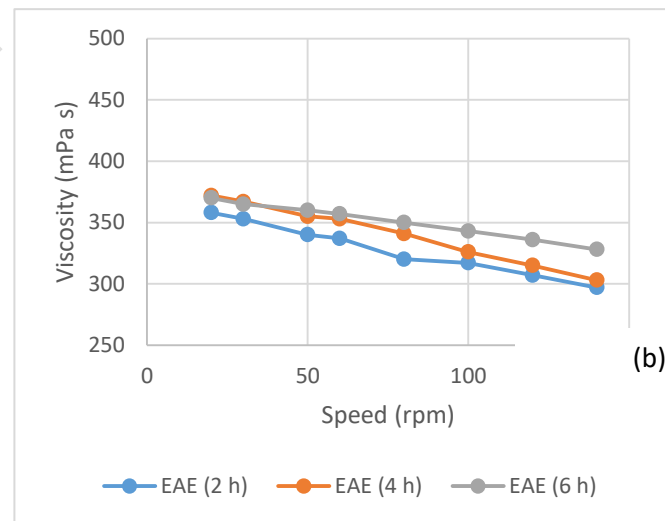
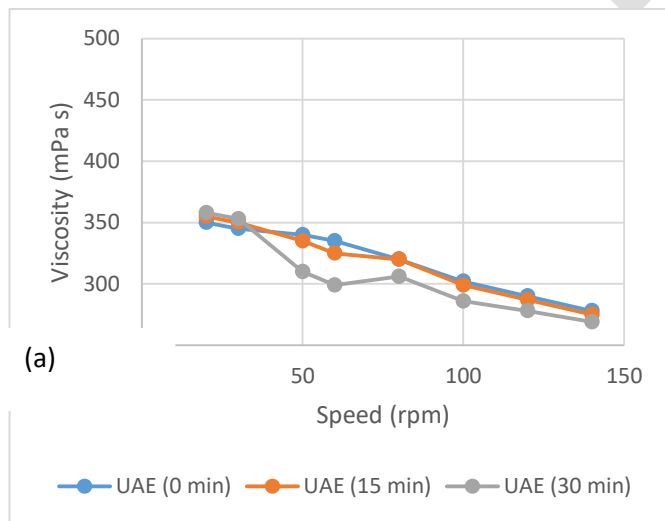
شکل (۳) حلالیت (%) نشاسته استخراج شده با سه روش مختلف (فراصوت، آسیاب مرطوب و آنزیمی)

Fig. 3. Solubility (%) of Starch Extracted Using Different Methods (UAE: Ultrasound-Assisted Extraction, WM: Wet-Milling, and EAE: Enzyme-Assisted Extraction)

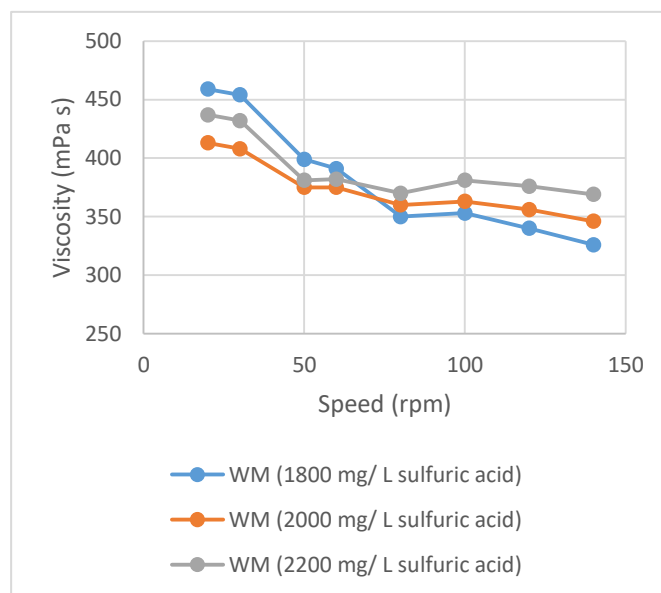


شکل (۴) قدرت تورم (٪) نشاسته استخراج شده با سه روش مختلف (فراصوت، آسیاب مرطوب و آنزیمی)

Fig. 4. Swelling Power (%) of Starch Extracted Using Different Methods (UAE: Ultrasound-Assisted Extraction, WM: Wet-Milling, and EAE: Enzyme-Assisted Extraction)

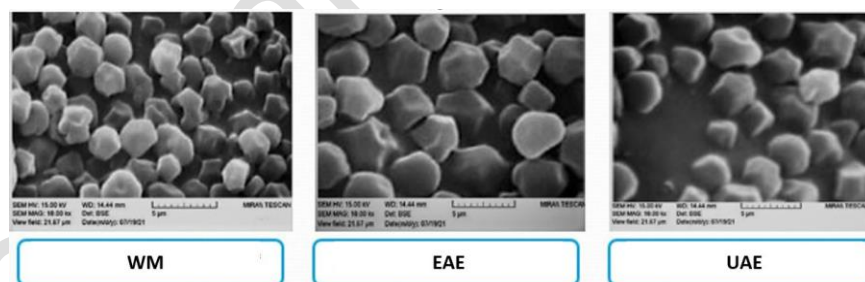


(c)



شکل (۵) تغییرات ویسکوزیته (mPa·s) نشاسته استخراج شده با سه روش مختلف (فراصوت: (a)، آنزیمی: (b) و آسیاب مرطوب: (c)) در سرعت‌های مختلف هم‌زدن

Fig. 5. Variation of Viscosity (mPa·s) of Starch Extracted Using Different Methods (UAE: Ultrasound-Assisted Extraction (a), WM: Wet-Milling (c), and EAE: Enzyme-Assisted Extraction (b)) at Different Shear Speeds



شکل (۶) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از گرانول‌های نشاسته کینوا استخراج شده به روش‌های فراصوت (UAE)، آسیاب مرطوب (WM) و آنزیمی (EAE)

Fig. 6. Scanning Electron Micrographs (SEM) of Quinoa Starch Granules Extracted by Ultrasound-Assisted Extraction (UAE), Wet-Milling (WM) and Enzyme-Assisted Extraction (EAE)

جدول (۱) بازده استخراج نشاسته از دانه‌های کینوا با استفاده از روش‌های مختلف

Table 1. Starch extraction yield (%) of quinoa seeds using different methods

Method	Condition	Extraction yield of starch
UAE	Time: 0 min	34.76 ± 1.06^b
	Time: 15 min	39.36 ± 0.55^a
	Time: 30 min	34.07 ± 0.28^b
WM	1800 mg/ L sulfuric acid	37.76 ± 1.13^b
	2000 mg/ L sulfuric acid	40.7 ± 0.2^a
	2200 mg/ L sulfuric acid	40.26 ± 0.25^a
EAE	Time: 2 h	33.96 ± 0.15^b
	Time: 4 h	35.8 ± 0.7^a
	Time: 6 h	36.8 ± 0.47^a

UAE: استخراج به کمک امواج فراصوت، WM: آسیاب مرطوب و EAE: استخراج آنزیمی. نتایج به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش شده‌اند. حروف لاتین متفاوت بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار بین مقادیر هر ستون در سطح اطمینان ۹۵٪ می‌باشد.

UAE: Ultrasound-Assisted Extraction, WM: Wet Milling, and EAE: Enzyme-Assisted Extraction. Results are presented as mean $\pm$ standard deviation. Different lowercase letters indicate statistically significant differences among the values within each column at the 95% confidence level.

جدول (۲) پایداری تبرید و پایداری انجماد-ذوب نشاسته استخراج شده با سه روش مختلف (فراصوت، آسیاب مرطوب و آنزیمی)

Table 2. Refrigeration Stability and Freeze-Thaw Stability of Starch Extracted Using Different Methods (Ultrasound-Assisted, Wet-Milling, and Enzymatic Extraction)

Method	Condition	Refrigeration stability	Freeze-thaw stability
UAE	Time: 0 min	5.36 ± 0.47^a	20.36 ± 0.55^a
	Time: 15 min	5.33 ± 0.11^a	20.5 ± 0.44^a
	Time: 30 min	5.7 ± 0.2^a	21.0 ± 0.1^a
WM	1800 mg/ L sulfuric acid	5.267 ± 0.38^a	19.33 ± 0.35^a
	2000 mg/ L sulfuric acid	5.6 ± 0.3^a	19.03 ± 0.11^a
	2200 mg/ L sulfuric acid	5.9 ± 0.2^a	19.06 ± 0.15^a
EAE	Time: 2 h	6.1 ± 0.1^a	20.63 ± 0.47^a
	Time: 4 h	6.06 ± 0.21^a	22.43 ± 0.40^a
	Time: 6 h	6.23 ± 0.15^a	22.43 ± 0.15^a

UAE: Ultrasound-Assisted Extraction, WM: Wet-Milling, and EAE: Enzyme-Assisted Extraction