



## ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و عملکردی نشاسته آمارانت اصلاح شده با مخلوط آدیپیک اسید و استیک‌انیدرید

سحر محمدی<sup>۱</sup>، مزدک علیمی<sup>۲\*</sup>، سید احمد شهیدی<sup>۳</sup>، شیرین شکوهی<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی دکترا، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد آیت ... آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران.  
 ۲- استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد آیت ... آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران.  
 ۳- دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد آیت ... آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران.  
 ۴- استادیار، پژوهشکده توسعه فناوری‌های شیمیایی، پلیمری و پتروشیمیایی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

این مطالعه با هدف بررسی تأثیر اصلاح شیمیایی با استفاده از مخلوط آدیپیک اسید و استیک‌انیدرید (با نسبت ۱ به ۳۰) بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و عملکردی نشاسته آمارانت و نیز تعیین شرایط بهینه اصلاح با مخلوط مذکور انجام گرفت. ۹ تیمار بر اساس ۳ فاکتور دخیل در اصلاح شیمیایی شامل بر غلظت اصلاح‌کننده (۴٪، ۶٪ و ۸٪)، زمان واکنش (۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه) و pH سوسپانسیون (۸/۵ و ۹) به روش تاگوچی طراحی گردید. ویژگی‌های قدرت تورم، انحلال، رنگ، شفافیت خمیر، خصوصیات حرارتی، پایداری انجماد و انجماد زدایی و روند تغییرات ویسکوزیته ظاهری بررسی شدند. نتایج نشان داد، مخلوط آدیپیک‌اسید/استیک‌انیدرید باعث بهبود قدرت تورم، انحلال و شفافیت خمیر نشاسته آمارانت شد. دماهای ژلاتیناسیون، آنتالپی ژلاتیناسیون، پایداری انجماد و انجمادزدایی نشاسته‌های اصلاح‌شده در مقایسه با نشاسته معمولی آمارانت کاهش یافت. اصلاح شیمیایی انجام‌شده سبب افزایش روشنایی و کاهش زردی و قرمزی پودرهای نشاسته اصلاح‌شده، شد. مخلوط مذکور ویسکوزیته ظاهری نشاسته‌های اصلاح شده را در مقایسه با نشاسته معمولی افزایش داد. خمیر تمامی نمونه‌های نشاسته (اصلاح‌شده و معمولی) رفتار رقیق شونده با برش نشان دادند. همچنین، شرایط بهینه به صورت غلظت اصلاح‌کننده ۶٪، زمان واکنش ۱۲۰ دقیقه و pH سوسپانسیون ۹ با بی‌مقیاس سازی نتایج حاصل از آنالیز تاگوچی تمامی داده‌های نشاسته‌های اصلاح‌شده (به جز ویسکوزیته ظاهری، اندیس زردی و قرمزی) با استفاده از روش انحراف درصد مرتبط تعیین گردید.

تاریخ‌های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۸

کلمات کلیدی:

اصلاح شیمیایی،  
 خصوصیات حرارتی،  
 تاگوچی،  
 قدرت تورم،  
 نشاسته آمارانت.

DOI: 10.22034/FSCT.19.130.197

DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.130.17.6

\* مسئول مکاتبات:

ahooora\_mazdak@yahoo.com

## ۱- مقدمه

نشاسته اصلی‌ترین پلی‌ساکارید ذخیره‌ای در گیاهان و یک ترکیب کاربردی با ارزش در صنعت غذا است. نشاسته با توجه به منبعی که از آن استخراج می‌گردد دارای خصوصیات عملکردی و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی متفاوتی است و همین امر سبب شده تا کاربردهای متفاوتی در صنعت غذا داشته باشد. منابع رایج تأمین نشاسته مورد نیاز در صنعت غذا را غلاتی نظیر ذرت، برنج و گندم و محصولات زراعی غده‌ای (سیب‌زمینی، تاپوکا) تشکیل می‌دهند [۱ و ۲]؛ اما با توجه به افزایش تقاضا برای نشاسته، تحقیقات در رابطه با این پلی‌ساکارید کاربردی بر جستجوی منابع جدید با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و عملکردی متنوع متمرکز شده است تا بتوان منبع نشاسته‌ای با طیف وسیعی از کاربردهای بالقوه صنعتی را معرفی کرد [۳].

آمارانت گیاهی یک یا چندساله است که در گروه شبه غلات طبقه‌بندی می‌شود. این گیاه دارای خوشه‌هایی تا حدودی چوبی شکل به رنگ‌های متنوع سبز، زرد، قرمز و بنفش می‌باشد. دانه‌های آمارانت بسیار کوچک (با قطر حدوداً ۱ میلی‌متر)، صاف، براق و عمدتاً سفید کرمی رنگ هستند اما در برخی از واریته‌ها به رنگ‌های زرد، قرمز و سیاه (دانه آمارانت وحشی) نیز دیده می‌شوند [۴ و ۵]. عمده‌ترین ترکیب دانه آمارانت، بین ۶۹-۴۸ درصد متغیر می‌باشد. گرانول‌های نشاسته آمارانت دارای ظاهری کروی و یا چندضلعی هستند و اندازه بسیار کوچکی (قطر تقریباً ۳-۱ میکرومتر) دارند [۱]. نشاسته آمارانت حاوی مقدار زیادی پکتین است که سبب می‌گردد تا نشاسته در برابر رتروداداسیون و انجماد و انجمادزدایی مکرر پایدار باشد. همچنین، نشاسته آمارانت در مقایسه با نشاسته غلاتی نظیر گندم و ذرت دارای مقدار آمیلوز بسیار کمتر، قدرت تورم پایین و ویسکوزیته آمیلوگراف<sup>۱</sup> کمتر، انحلال و محدوده دمایی ژلاتیناسیون بالاتر و جذب آب بالاتر است [۶ و ۷].

نشاسته‌های معمولی<sup>۲</sup> به دلیل دارا بودن برخی از ویژگی‌های نامطلوب نظیر پایداری رئولوژیکی و مقاومت مکانیکی پایین، تجزیه حرارتی و شیمیایی، تمایل شدید به رتروداداسیون و سینرسیس بالا کاربرد محدودی در تولید انواع فرآورده‌های غذایی دارند. از این‌رو، اصلاح نشاسته با هدف برطرف نمودن

خصوصیات نامطلوب و بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن انجام می‌گردد [۸ و ۹]. فرآیند اصلاح نشاسته می‌تواند به صورت شیمیایی، فیزیکی، آنزیمی و ژنتیکی انجام شود. از روش‌های اصلاح شیمیایی پرکاربرد در صنعت غذا جهت اصلاح نشاسته می‌توان به اتصال عرضی<sup>۳</sup>، استیریفیکاسیون<sup>۴</sup>، اتریفیکاسیون<sup>۵</sup>، هیدرولیز کردن و اکسیداسیون<sup>۶</sup> اشاره کرد [۸]. اتصال عرضی از طریق ایجاد پیوندهای عرضی سبب تقویت پیوندهای هیدروژنی بین مولکولی یا درون مولکولی نشاسته شده که منجر به موجب افزایش پایداری در برابر حرارت، pH و تنش می‌شود [۱۰]. از اسیدهای آلی به دلیل ایمن بودن جهت ایجاد اتصال عرضی استفاده می‌شود. آدیپیک اسید یکی از اسیدهای آلی پرکاربرد جهت ایجاد اتصال عرضی است [۱۱]. نشاسته اصلاح‌شده با آدیپیک اسید در برابر حرارت، محیط اسیدی و آنزیم آمیلوگلوکوزیداز مقاوم بوده اما قابلیت انحلال، قدرت تورم، دمای خمیری شدن<sup>۷</sup> و ویسکوزیته خمیر کمتری در مقایسه با نشاسته اصلاح نشده خود دارد [۱۲ و ۱۳].

استیلاسیون<sup>۸</sup>، نوعی فرآیند استیریفیکاسیون است که به‌طور معمول با استفاده از استیک‌انیدرید<sup>۹</sup> یا وینیل‌استات<sup>۱۰</sup> انجام می‌شود. در این روش گروه‌های استیل ترکیب اصلاح‌کننده جایگزین گروه‌های هیدروکسیل نشاسته شده و استات نشاسته تولید می‌گردد [۱۴]. نشاسته استیله شده در مقایسه با نشاسته معمولی خود دارای قدرت تورم، انحلال، قابلیت جذب آب، شفافیت خمیر و ویسکوزیته بیشتری می‌باشد [۱۵ و ۱۶]. مخلوط آدیپیک‌اسید و استیک‌انیدرید یکی از پرکاربردترین عوامل اتصال‌دهنده عرضی در صنعت غذا است [۱۷]. نشاسته اصلاح‌شده با این مخلوط (کد E1422) که تواماً دو فرآیند اتصال عرضی (توسط adipic anhydride) و استیلاسیون (توسط acetic anhydride) بر روی آن انجام شده است در مقایسه با نشاسته معمولی خود در برابر تنش و دمای بالا، محیط اسیدی و چرخه انجماد و انجمادزدایی مقاوم بوده و دارای قدرت تورم کمتر و دمای ژلاتیناسیون پایین‌تری می‌باشد [۱۵ و ۱۸]. از نشاسته acetylated distarch adipate در صنعت به‌عنوان تغلیظ کننده، پایدارکننده، بافت‌دهنده<sup>۱۱</sup>، اصلاح‌کننده طعم<sup>۱۰</sup>، جایگزین

3. Cross-linking  
4. Esterification  
5. Etherification  
6. Oxidation  
7. Pasting Temperature  
8. Acetylation  
9. Acetic Anhydride  
10. Vinyl Acetate  
11. Texturizer

1. Amylograph Viscosity  
2. Native Starches

هیدروکسید سدیم ۰/۲۵٪ خیسانده شد. سپس آب آن را دور ریخته و مجدداً دانه‌ها به نسبت ۱ به ۵ با آب مقطر درون مخلوط‌کن خانگی به مدت ۲ دقیقه با حداکثر سرعت مخلوط شدند. مخلوط به‌دست‌آمده از صافی پارچه‌ای عبور داده شد. مایع جداشده دور ریخته شد و رسوب باقی‌مانده بر روی صافی مجدداً با آب مقطر به نسبت ۱ به ۵ درون مخلوط‌کن با دور تند، مخلوط گردید. مایع جداشده مرحله دوم پس از عبور از صافی نگه داشته و رسوب باقی‌مانده مجدداً به همان نسبت قبل با آب مقطر درون مخلوط‌کن، مخلوط شد (مرحله مخلوط کردن رسوب نشاسته با آب مقطر و عبور مخلوط از صافی ۲ بار دیگر تکرار شد). مایع جداشده حاصل از مراحل قبل با هم مخلوط و برای مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۳۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ (Farzaneh Arman Co, Ltd, Hs18500R- ساخت ایران) گردید. لایه زرد رنگ پروتئینی روی رسوب نشاسته جدا و رسوب با آب مقطر شسته شد. رسوب نشاسته با استفاده از اسیدکلریدریک ۲ N خنثی شد و مخلوط مجدداً سانتریفیوژ گردید. در آخر رسوب نشاسته در آون با دمای ۴۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. نشاسته خشک‌شده آسیاب و الک (مش ۱۰۰) گردید. پودر نشاسته به‌دست‌آمده در دمای ۴ درجه سلسیوس در ظروف پلاستیکی نگهداری شد [۷].

## ۲-۲- طراحی آزمایش‌ها و اصلاح شیمیایی نشاسته آمارانت

اصلاح شیمیایی نشاسته آمارانت با استفاده از مخلوط آدیپیک‌اسید و استیک‌انیدرید با در نظر گرفتن سه فاکتور غلظت مخلوط اصلاح‌کننده، زمان واکنش و  $pH$  سوسپانسیون هر کدام در سه سطح صورت گرفت. بر این اساس ۹ تیمار با استفاده از روش تاگوچی به‌منظور یافتن تیمار بهینه طراحی گردید (جدول ۱) [۲۳]. به‌منظور انجام فرایند اصلاح ابتدا مخلوط آدیپیک‌اسید و استیک‌انیدرید از طریق مخلوط کردن دو ماده با نسبت ۱ به ۳۰ آماده شد. ۱۰۰ گرم نشاسته با آب مقطر (۲۵۰ میلی‌لیتر) ترکیب و سوسپانسیون تهیه شده به مدت ۱۰ دقیقه جهت همگن‌سازی در دمای محیط مخلوط گردید. سپس  $pH$  سوسپانسیون با استفاده از سود ۱ نرمال (روی ۸/۵ و غلظت‌های ۴٪، ۶٪ و ۸٪) قطره‌قطره به سوسپانسیون اضافه شد، طی این مدت  $pH$  با استفاده از هیدروکسید سدیم در نزدیکی  $pH$  مورد نظر نگه‌داشته شد. پس از افزودن کامل مخلوط آدیپیک‌اسید و استیک‌انیدرید سوسپانسیون به مدت نیم

چربی و ... در تهیه فرآورده‌های غذایی نظیر سس‌های چیلی و سویا، ماست، خامه، مایونز، پودینگ، غذای کودک و... استفاده می‌شود [۱۰ و ۱۸]. پژوهش مالی و گروسمن [۱۷] بر روی نشاسته acetylated distarch adipate کاساواای پیش‌زلاتینه‌شده تهیه شده با اکستروژن نشان داد که نشاسته اصلاح‌شده در مقایسه با نشاسته معمولی خود، ویسکوزیته سرد، شاخص جذب آب و سختی ژل بهتری دارد و چسبندگی ژل، شفافیت خمیر و رترورگراسیون آن کاهش یافته‌است. نشاسته مومی سیب‌زمینی اصلاح شده با ترکیب آدیپیک‌اسید و استیک‌انیدرید در مقایسه با نشاسته معمولی خود ثبات ویسکوزیته بهتر، مقاومت اسیدی، تحمل نمک و تجزیه شدن خوبی را نشان داد [۱۰]. زیبا و همکاران [۱۹]، ویژگی‌های نشاسته معمولی و رترورگرا شده سیب‌زمینی اصلاح‌شده با استفاده از مخلوط آدیپیک‌اسید و استیک‌انیدرید را بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد، مقاومت نشاسته‌های اصلاح‌شده در مقایسه با نشاسته‌های اصلاح‌نشده در برابر آمیلولیز افزایش یافت. اصلاح انجام شده سبب افزایش ویسکوزیته‌های خمیر نشاسته در آزمون خمیری شدن شد و به‌طور معنی‌داری بر افزایش اندیس جریان و ضریب قوام نشاسته معمولی و رترورگرا شده سیب‌زمینی مؤثر بود. باین‌حال، عوامل مؤثر در اصلاح شیمیایی نظیر منبع گیاهی نشاسته، مقدار گروه‌های آمیلوز و آمیلوپکتین نشاسته، نوع ترکیب و یا مخلوط اصلاح‌کننده (عامل استری‌کننده و اتصال‌دهنده عرضی)، شرایط واکنش (نظیر زمان واکنش و  $pH$  محیط) می‌توانند بر نتیجه نهایی فرایند اصلاح تأثیرگذار باشند [۲۲-۲۰]. لذا، هدف از این مطالعه ضمن بررسی تأثیر اصلاح شیمیایی با مخلوط آدیپیک‌اسید و استیک‌انیدرید بر ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی و عملکردی نشاسته آمارانت، تعیین شرایط بهینه اصلاح نشاسته با استفاده از مخلوط مذکور نیز بود.

## ۲- مواد و روش‌ها

دانه‌های گیاه آمارانت از شرکت هانی‌فود (تهران) خریداری شد. آدیپیک‌اسید و استیک‌انیدرید و سایر مواد شیمیایی استفاده شده در این پژوهش تولید شرکت مرک آلمان با درجه خلوص بالا و مخصوص آنالیزهای شیمیایی بودند.

### ۲-۱- استخراج نشاسته

دانه‌های آمارانت به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط در محلول

(SP) نشاسته به ترتیب مطابق رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه گردید [۷].

$$= (\%) \text{ انحلال}$$

$$\text{وزن مایع خشک شده (g)}$$

$$\text{وزن نشاسته (g)}$$

$$= (\text{g/g}) \text{ قدرت تورم}$$

$$\text{وزن رسوب نشاسته (g)}$$

$$\text{وزن ماده خشک رسوب نشاسته (g)}$$

## ۲-۵- شفافیت خمیر نشاسته<sup>۷</sup>

سوسپانسیون نشاسته ۱٪ وزنی/حجمی تهیه و به مدت ۱ ساعت در حمام آبی در دمای ۹۰ درجه سلسیوس همراه با همزدن ملایم حرارت دید. سپس خمیر نشاسته تشکیل شده بلافاصله تا دمای محیط خنک گردید. شفافیت خمیر نشاسته‌ها توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر *UV/VIS* در طول موج  $650 \text{ nm}$  در برابر آب مقطر به‌عنوان نمونه شاهد اندازه‌گیری شد. شفافیت خمیرهای نشاسته، در روزهای اول، دوم، سوم و هفتم نگهداری اندازه‌گیری گردید [۶].

## ۲-۶- خصوصیات حرارتی نشاسته

اندازه‌گیری ویژگی‌های حرارتی نشاسته با کمی تغییر مطابق روش *Sindhu* و *Singh Khatkar* [۲۵] و با استفاده از دستگاه کالری‌متری افتراقی<sup>۸</sup> (*DSC*) انجام شد. سوسپانسیون نشاسته در آب مقطر با نسبت ۱ به ۳ (وزنی/وزنی) در ظرف آلومینیومی مخصوص دستگاه تهیه شد. درب ظرف آلومینیومی بطوریکه مانع از نفوذ جریان هوا گردد به‌خوبی بسته شد و برای برقراری هر چه بهتر پیوند بین آب و نشاسته به مدت تقریباً ۱۲ ساعت در دمای محیط قرار گرفت. نمونه‌ها داخل دستگاه *DSC (DSC-400, Sanaf DSC)* - ساخت ایران قرار گرفته و با سرعت ۱۰ درجه سلسیوس در دقیقه از دمای ۳۰ تا ۱۲۰ درجه سلسیوس حرارت داده شدند. یک ظرف خالی دستگاه به‌عنوان رفرنس استفاده شد. دماهای شروع<sup>۹</sup> ( $T_0$ )، پیک<sup>۱۰</sup> ( $T_p$ )، نهایی<sup>۱۱</sup> ( $T_c$ ) و آنتالپی ژلاتیناسیون<sup>۱۲</sup> ( $\Delta H$ ) به‌طور خودکار توسط دستگاه *DSC* محاسبه گردید

ساعت در دمای محیط مخلوط گردید. زمان کل واکنش ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه بود. فرآیند اصلاح شیمیایی با تنظیم *pH* سوسپانسیون بر روی ۵ با استفاده از اسیدکلریدریک (۱N) پایان یافت. سوسپانسیون نشاسته به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۳۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ (*Farzaneh Arman Co, Ltd, Hs18500R* - ساخت ایران) گردید. رسوب حاصل با آب مقطر (۲۰۰ میلی‌لیتر) شسته و دوباره سانتریفیوژ شد (مرحله شستشو سه مرتبه انجام شد). رسوب نشاسته در آن به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۴۰ درجه سلسیوس خشک و بعد آسیاب و الک (مش ۱۰۰) گردید [۱۰ و ۲۴].

**Table 1** Starch chemical modification treatments designed by Taguchi method

| Treatments (Runs)  | Concentration (%) | Time (min) | pH  |
|--------------------|-------------------|------------|-----|
| MS4-1 <sup>1</sup> | 4                 | 60         | 8   |
| MS4-2              | 4                 | 90         | 8.5 |
| MS4-3              | 4                 | 120        | 9   |
| MS6-1              | 6                 | 60         | 8.5 |
| MS6-2              | 6                 | 90         | 9   |
| MS6-3              | 6                 | 120        | 8   |
| MS8-1              | 8                 | 60         | 9   |
| MS8-2              | 8                 | 90         | 8   |
| MS8-3              | 8                 | 120        | 8.5 |

## ۲-۳- رنگ

اندازه‌گیری اندیس‌های  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  پودرهای نشاسته توسط دستگاه هانترلب (*Reston, VA-model No.4510*) - ساخت آمریکا) انجام شد.

## ۲-۴- اندازه‌گیری قدرت تورم<sup>۶</sup> و انحلال<sup>۶</sup>

به این منظور یک سوسپانسیون ۱٪ وزنی/حجمی از نشاسته تهیه و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۸۵ درجه سلسیوس حرارت دید. به‌منظور جلوگیری از رسوب نشاسته، حرارت دهی همراه با همزدن ملایم انجام گرفت. نمونه‌ها پس از رسیدن به دمای محیط با سرعت  $3500 \text{ rpm}$  برای ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ و مایع جدا شده به پلیت جهت خشک شدن در آن ۱۲۰ درجه سلسیوس منتقل گردید. رسوب باقی‌مانده جهت محاسبه قدرت تورم وزن شد. قابلیت انحلال ( $S\%$ ) و قدرت تورم

7. Starch Paste Clarity  
8. Differential Scanning Calorimetry (DSC)  
9. Onset Temperature  
10. Peak Temperature  
11. Conclusion Temperature  
12. Gelatinization Enthalpy

1. MS: Modified Starch (نشاسته اصلاح شده)  
2. Lightness ( $L^*$ )  
3. a: Redness  
4. b: Yellowness  
5. Swelling Power  
6. Solubility

[۲۵].

سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت.

## ۲-۷- پایداری انجماد و انجمادزدایی<sup>۱</sup>

سوسپانسیون نشاسته (۵٪ w/v) در دمای ۹۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آبی حرارت دهی شد. پس از خنک شدن خمیر تشکیل شده تا دمای محیط، ۱۰ گرم از آن درون فالکون ۱۵ میلی‌لیتری وزن شد. سیکل انجماد و انجماد زدایی با انجماد نمونه‌ها در دمای ۱۸- درجه سلسیوس برای تقریباً ۲۰ ساعت و انجماد زدایی تا دمای محیط انجام شد. ۵ سیکل انجماد و انجماد زدایی تکرار شده و پس از هر سیکل نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۳۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ ساخت (Farzaneh Arman Co, Ltd, Hs18500R- ایران) شدند. پایداری در برابر سیکل انجماد و انجمادزدایی برحسب درصد سینرسیس<sup>۲</sup> محاسبه گردید [۸].

$$(\%) = \frac{\text{وزن آب جدا شده در هر سیکل}}{\text{وزن کل نمونه}}$$

## ۲-۸- ویسکوزیته ظاهری<sup>۳</sup> خمیر نشاسته

ابتدا سوسپانسیون نشاسته همگن شده (۵٪ w/v) به مدت ۲۰ دقیقه درون حمام آبی با دمای ۹۵ درجه سلسیوس حرارت داده شد و سپس خمیر تشکیل شده تا دمای محیط خنک گردید. به منظور بررسی روند تغییرات ویسکوزیته ظاهری خمیر نشاسته، ویسکوزیته نمونه‌ها توسط دستگاه رئومتر سیلندر متحدالمرکز<sup>۴</sup> (Anton paar, MCR 501) ساخت اتریش، مجهز به سیلندر متحدالمرکز (CC27) در دمای محیط و در سرعت‌های ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دور در دقیقه اندازه‌گیری شد. همچنین، جهت بررسی پایداری ویسکوزیته خمیر نشاسته، ویسکوزیته آن در سرعت ثابت ۲۰ دور در دقیقه طی مدت‌زمان ۳۰ دقیقه اندازه‌گیری گردید [۲۶ و ۲۷].

## ۲-۹- تجزیه و تحلیل آماری

تمامی آنالیزهای آماری با استفاده از نرم‌افزار Minitab 18 در سطح اطمینان ۹۵٪ انجام شد. جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها، از آنالیز تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار فیشر (LSD) در

1. Freeze-thaw Stability
2. Syneresis
3. Apparent viscosity
4. Concentric cylinder

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- قدرت تورم و انحلال

قدرت تورم نشان‌دهنده ظرفیت نگهداری آب نشاسته است که بر کیفیت و بافت محصول تأثیر می‌گذارد و معمولاً برای نشان دادن تفاوت بین انواع نشاسته‌ها و نیز بررسی تأثیر اصلاح نشاسته بکار می‌رود [۲۸]. مقایسه میانگین داده‌ها نشان می‌دهد که مخلوط آدیپیک‌اسید و استیک‌انیدرید به طور معنی‌داری ( $p < 0.05$ ) باعث افزایش قدرت تورم نشاسته‌های اصلاح شده (MS) در مقایسه با نشاسته معمولی (N) شد (جدول ۲). حضور استیک‌انیدرید در محیط سبب انجام فرآیند استیلاسیون می‌شود که طی آن گروه‌های استیل با گروه‌های هیدروکسیل نشاسته جایگزین می‌گردد. گروه‌های حجیم استیل با ایجاد دافعه فضایی بین مولکول‌ها نفوذ آب را در نواحی آمورف گرانول‌ها تسهیل می‌کند که منجر به افزایش قدرت تورم گرانول‌ها می‌شود [۱۴ و ۲۹]. همچنین، نتایج حاصل از بررسی داده‌های قدرت تورم نشاسته‌های اصلاح‌شده نشان می‌دهد که افزایش زمان واکنش و pH می‌تواند باعث بهبود قدرت تورم گرانول‌ها گردد. در بین نشاسته‌های اصلاح‌شده با غلظت ۴٪ نمونه MS4-3 (زمان واکنش ۱۲۰ دقیقه، pH: ۹)، غلظت ۶٪ نمونه MS6-2 (زمان واکنش ۹۰ دقیقه، pH: ۹) و غلظت ۸٪ نمونه MS8-3 (زمان واکنش ۱۲۰ دقیقه، pH: ۷.۵) بیشترین مقدار قدرت تورم را به دست آوردند. مطالعات پیشین بر روی نشاسته acetylated distarch adipate سیب‌زمینی مومی [۱۰]، نشاسته استیله‌شده ذرت [۳۰] و نشاسته استیله‌شده گیاه یام [۳۱] نشان داد که افزایش زمان واکنش و pH شرایطی مطلوب را برای جایگزینی هرچه بیشتر گروه عاملی استیل ترکیب اصلاح‌کننده با گروه‌های عاملی نشاسته فراهم می‌کند. افزایش درصد جایگزینی نیز باعث بهبود قابلیت جذب آب، انحلال و قدرت تورم گرانول‌های نشاسته گردید. بعلاوه، بررسی نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش غلظت مخلوط آدیپیک‌اسید و استیک‌انیدرید نیز موجب افزایش قدرت تورم نشاسته‌های اصلاح‌شده، شد. با این حال، مقایسه سطوح مختلف اصلاح مشخص ساخت که تغییرات قدرت تورم متناسب با افزایش غلظت صورت نگرفت بطوریکه با افزایش غلظت مخلوط اصلاح‌کننده از ۶٪ به ۸٪ قدرت تورم گرانول‌های نشاسته کاهش یافت. فرآیند اتصال

$pH$  ۹ باشد. غلظت ۸٪ در مقایسه با غلظت ۶٪ میزان انحلال کمتری داشت که علت آن را می‌توان به کاهش تمایل به آب نشاسته در اثر حضور بیشتر عوامل اتصال‌دهنده عرضی دانست. در بین نمونه‌های غلظت ۸٪ نمونه  $MS8-2$  (۹۰ دقیقه،  $pH$ : ۸) کمترین انحلال را داشت که احتمالاً به علت فعالیت بیشتر عامل اتصال‌دهنده عرضی آدیپیک‌اسید در  $pH$  ۸ است. سینگ و همکاران افزایش قدرت تورم و قابلیت انحلال نشاسته‌های ذرت و سیب‌زمینی را در اثر استیل‌اسیون گزارش کردند [۲۸].  $Trela$  و همکاران [۳۳] نشان دادند که فرآیند استیل‌اسیون نشاسته کاساوا قدرت تورم و انحلال را افزایش داد اما با افزایش غلظت استیک‌انیدرید قدرت تورم و انحلال کاهش یافت. آنها دلیل این کاهش را افزایش گروه‌های استیل جایگزین شده با گروه‌های هیدروکسیل بیان کردند که در غلظت‌های بالا تمایل به جذب آب گرانول نشاسته را کاهش می‌دهد. مطالعات انجام‌شده بر روی نشاسته‌های اصلاح‌شده ذرت و سیب‌زمینی با عوامل اتصال‌دهنده متفاوت نشان داد که قدرت تورم و انحلال در اثر فرآیند اتصال عرضی کاهش می‌یابد و با افزایش غلظت عامل اتصال‌دهنده این کاهش نیز بیشتر می‌شود. آنها دلیل این کاهش را ایجاد ساختار منظم و کاهش قابلیت جذب و نگهداری آب توسط گرانول‌های نشاسته بیان کردند [۳۴، ۳۵].

عرضی از طریق ایجاد پیوند کووالانسی که مانند پلی بین مولکول‌های نشاسته عمل می‌کند، باعث تقویت پیوند بین زنجیره‌های نشاسته شده در نتیجه قابلیت جذب و نگهداری آب را کاهش می‌دهد که به دنبال آن قدرت تورم گرانول نیز کاهش می‌یابد [۸]. با افزایش غلظت مخلوط اصلاح‌کننده، مقدار عامل اتصال‌دهنده افزایش یافته و این امر می‌تواند دلیل کاهش قدرت تورم نشاسته‌های اصلاح‌شده با غلظت ۸٪ نسبت به ۶٪ باشد. در بین نشاسته‌های اصلاح‌شده، نمونه‌های  $MS4-1$  (۶۰ دقیقه،  $pH$ : ۸) کمترین و  $MS6-2$  (۶۰، ۹۰ دقیقه،  $pH$ : ۹) بیشترین میزان قدرت تورم را داشتند. قابلیت انحلال نشاسته‌های اصلاح‌شده در مقایسه با نشاسته معمولی به‌طور معنی‌داری ( $p < 0.05$ ) افزایش یافت (جدول ۲). تغییرات حلالیت نتیجه تغییرات مورفولوژی نشاسته طی فرآیند اصلاحات شیمیایی می‌باشد [۱۶]. کاهش برهم‌کنش بین زنجیره‌های نشاسته و افزایش آب‌دوستی ناشی از جایگزینی گروه‌های هیدروکسیل با استیل این امکان را به آمیلوز نشاسته می‌دهد تا حل شده و به بیرون از گرانول متورم نشاسته منتقل شود [۳۲]. افزایش غلظت مخلوط آدیپیک‌اسید و استیک‌انیدرید تا ۶٪ قابلیت انحلال نشاسته را افزایش داد. در بین نمونه‌های غلظت ۶٪ نمونه  $MS6-2$  (۹۰ دقیقه،  $pH$ : ۹) بیشترین انحلال را نشان داد که می‌تواند به دلیل امکان جایگزینی بیشتر گروه هیدروکسیل نشاسته با گروه استیل در

**Table 2** Effect of modification with adipic acid/ acetic anhydride mixture on amaranth starch properties

| Samples        | Swelling power (g/g)        | Solubility (%)             | L*                         | a                            | b                          |
|----------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| <sup>1</sup> N | 10.88 ± 1.209 <sup>e</sup>  | 10.92 ± 0.37 <sup>f</sup>  | 93.57 ± 0.23 <sup>c</sup>  | -0.26 ± 0.01 <sup>d</sup>    | 4.38 ± 0.09 <sup>a</sup>   |
| <b>MS4-1</b>   | 23.06 ± 0.31 <sup>d</sup>   | 12.37 ± 0.32 <sup>e</sup>  | 93.74 ± 0.28 <sup>c</sup>  | -0.18 ± 0.02 <sup>c</sup>    | 4.106 ± 0.16 <sup>ab</sup> |
| <b>MS4-2</b>   | 25.22 ± 0.79 <sup>cd</sup>  | 12.81 ± 0.36 <sup>de</sup> | 93.81 ± 0.19 <sup>c</sup>  | -0.17 ± 0.00 <sup>bc</sup>   | 3.98 ± 0.15 <sup>b</sup>   |
| <b>MS4-3</b>   | 25.66 ± 0.85 <sup>bc</sup>  | 13.21 ± 0.26 <sup>cd</sup> | 94.24 ± 0.16 <sup>a</sup>  | -0.16 ± 0.03 <sup>abc</sup>  | 3.9 ± 0.26 <sup>bc</sup>   |
| <b>MS6-1</b>   | 27.80 ± 0.901 <sup>ab</sup> | 14.53 ± 0.57 <sup>ab</sup> | 94.25 ± 0.33 <sup>a</sup>  | -0.15 ± 0.04 <sup>abc</sup>  | 3.60 ± 0.21 <sup>d</sup>   |
| <b>MS6-2</b>   | 28.48 ± 1.28 <sup>a</sup>   | 14.81 ± 0.53 <sup>a</sup>  | 94.35 ± 0.1 <sup>a</sup>   | -0.14 ± 0.02 <sup>abc</sup>  | 3.53 ± 0.18 <sup>de</sup>  |
| <b>MS6-3</b>   | 25.53 ± 0.66 <sup>bc</sup>  | 13.76 ± 0.78 <sup>bc</sup> | 94.24 ± 0.13 <sup>a</sup>  | -0.15 ± 0.005 <sup>abc</sup> | 3.65 ± 0.12 <sup>cd</sup>  |
| <b>MS8-1</b>   | 26.28 ± 1.99 <sup>abc</sup> | 13.86 ± 0.56 <sup>bc</sup> | 94.23 ± 0.25 <sup>ab</sup> | -0.13 ± 0.03 <sup>ab</sup>   | 3.31 ± 0.09 <sup>ef</sup>  |
| <b>MS8-2</b>   | 24.76 ± 0.54 <sup>cd</sup>  | 13.74 ± 0.44 <sup>bc</sup> | 93.88 ± 0.14 <sup>bc</sup> | -0.13 ± 0.02 <sup>ab</sup>   | 3.58 ± 0.23 <sup>de</sup>  |
| <b>MS8-3</b>   | 26.54 ± 3.04 <sup>abc</sup> | 13.95 ± 0.29 <sup>bc</sup> | 94.35 ± 0.00 <sup>a</sup>  | -0.12 ± 0.02 <sup>a</sup>    | 3.17 ± 0.01 <sup>f</sup>   |

- Mean values from duplicate ± SD. Means within columns with different letters are significantly different ( $P < 0.05$ ).

MS4-1: Concentration=4%, Time= 60 min and pH=8, MS4-2: Concentration=4%, Time= 90 min and pH=8.5, MS4-3: Concentration=4%, Time= 120 min and pH=9, MS6-1: Concentration=6%, Time= 60 min and pH=8.5, MS6-2: Concentration=6%, Time= 90 min and pH=9, MS6-3: Concentration=6%, Time= 120 min and pH=8, MS8-1: Concentration=8%, Time= 60 min and pH=9, MS8-2: Concentration=8%, Time= 90 min and pH=8, MS8-3: Concentration=8%, Time= 120 min and pH=8.5.

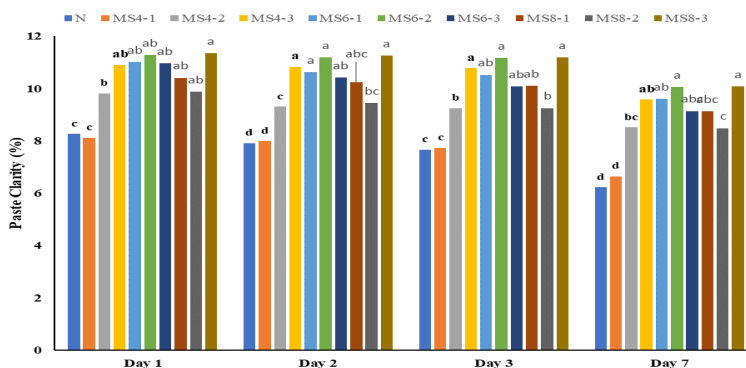
1. N : Native Starch (نشاسته معمولی / اصلاح نشده)

## ۳-۲- رنگ و شفافیت خمیر

نتایج بررسی میانگین رنگ پودرهای نشاسته نشان می‌دهد اصلاح انجام شده به جز در مورد نمونه‌های *MS4-1* و *MS4-2* باعث افزایش معنی‌دار ( $p < 0/05$ ) اندیس روشنایی شد (جدول ۲). بهبود روشنایی پودر نشاسته‌های اصلاح‌شده احتمالاً می‌تواند به دلیل کاهش ناخالصی‌هایی مانند فیبر، لیپید و غیره نشاسته معمولی باشد که به مولکول‌های نشاسته متصل بوده‌اند و به دلیل ادغام گروه‌های عاملی اتصال‌دهنده عرضی در مولکول‌های نشاسته طی فرآیند اصلاح حذف شده‌اند. دلیل احتمالی دیگر برای بهبود رنگ نشاسته‌های اصلاح‌شده را می‌توان به استفاده از *NaOH* طی فرآیند اصلاح مرتبط دانست که اثر سفیدکنندگی<sup>۱</sup> دارد خصوصاً در نشاسته‌هایی که فرآیند اصلاح آنها همراه با ایجاد اتصال عرضی باشد [۸]. همچنین، مخلوط آدیپیک‌اسید و استیک‌انیدرید موجب کاهش معنی‌دار ( $p < 0/05$ ) اندیس زردی (به جز نمونه *MS4-1*) و قرمزی تمامی نشاسته‌های اصلاح‌شده در مقایسه با نشاسته معمولی آمارات ( $N$ ) شد (جدول ۲). در بین نشاسته‌های اصلاح‌شده، نشاسته *MS8-3* (۱۲۰ دقیقه،  $pH$ : ۸/۵) بیشترین اندیس روشنایی و کمترین مقدار زردی و قرمزی را نشان می‌دهد.

شفافیت خمیر نشاسته تحت تأثیر عواملی نظیر منبع نشاسته، اندازه گرانول، درجه جایگزینی (غلظت ترکیب اصلاح‌کننده)،  $pH$  نوع اصلاح شیمیایی، قدرت تورم گرانول‌ها، وضعیت پراکنندگی گرانول‌ها (در خمیر شکل‌گرفته) و رتروگراداسیون قرار می‌گیرد [۱۶ و ۳۶]. بررسی شفافیت خمیر نشاسته‌ها نشان داد (شکل ۱) که اصلاح شیمیایی انجام‌شده، به جز در مورد نمونه *MS4-1* سبب افزایش معنی‌دار ( $p < 0/05$ ) شفافیت خمیر نشاسته‌های اصلاح‌شده در مقایسه با نشاسته معمولی شد. علت این افزایش را می‌توان به بهبود قدرت تورم گرانول‌های نشاسته آمارات در اثر فرآیند اصلاح شیمیایی

نسبت داد. در بین نشاسته‌های اصلاح‌شده دو نمونه *MS8-3* (۸٪، ۱۲۰ دقیقه،  $pH$ : ۸/۵) و *MS4-1* (۴٪، ۶۰ دقیقه،  $pH$ : ۸) به ترتیب بیشترین و کمترین شفافیت خمیر را داشتند. مقایسه نشاسته‌های اصلاح‌شده نشان می‌دهد که افزایش زمان واکنش و  $pH$  باعث بهبود شفافیت خمیر نمونه‌ها شد که می‌تواند به دلیل تأثیر مثبت آنها در بهبود شرایط اصلاح باشد که در نهایت منجر به افزایش قدرت تورم گرانول‌های نشاسته می‌گردد. همچنین، افزایش غلظت مخلوط آدیپیک‌اسید و استیک‌انیدرید نیز سبب افزایش شفافیت خمیر گردید. فرآیند استیل‌اسیون صورت گرفته در حضور استیک‌انیدرید موجود در مخلوط اصلاح‌کننده علاوه بر، افزایش قابلیت نگهداری آب گرانول‌های نشاسته که منجر به افزایش قدرت تورم آنها می‌شود، با محدود ساختن شکل‌گیری ساختاری منظم باعث می‌شود تا میزان شفافیت نشاسته‌های اصلاح‌شده در مقایسه با نشاسته معمولی خود بیشتر گردد [۱۶]. مطالعات انجام‌شده بر روی نشاسته‌های استیله شده سیب‌زمینی، ذرت و کاساوا نشان داد که خمیر نشاسته استیله شده در مقایسه با نشاسته معمولی خود شفاف‌تر بودند [۲۸ و ۳۷]. *Kapelka* و همکاران [۱۲] گزارش کردند که استفاده از آدیپیک‌اسید شفافیت خمیر نشاسته را کاهش داد و این کاهش با افزایش غلظت عامل اتصال‌دهنده عرضی بیشتر شد. *Van Hung* و *Morita* [۳۸] نیز نتایج مشابهی را در رابطه با تأثیر اتصال عرضی بر شفافیت نشاسته گندم گزارش کردند. نتایج تحقیق *Trela* و همکاران [۳۳] نشان داد که افزایش غلظت استیک‌انیدرید نیز می‌تواند باعث شکل‌گیری پیوندهای سست در اثر برهم‌کنش گروه‌های استیل شود که این اتفاق موجب کاهش قدرت تورم و نهایتاً کاهش شفافیت شد. شفافیت خمیر تمامی نشاسته‌ها با گذشت زمان کاهش یافت که علت این کاهش می‌تواند به دلیل پدیده رتروگراداسیون باشد.



**Fig 1** Starch paste clarity changes of amaranth native starch (NS) and modified starches (MS)

- Mean values from triplicate  $\pm$  SD. Different letters in each Day indicate significant ( $P < 0.05$ ) difference.

MS4-1: Concentration=4%, Time= 60 min and pH=8, MS4-2: Concentration=4%, Time= 90 min and pH=8.5, MS4-3: Concentration=4%, Time= 120 min and pH=9, MS6-1: Concentration=6%, Time= 60 min and pH=8.5, MS6-2: Concentration=6%, Time= 90 min and pH=9, MS6-3: Concentration=6%, Time= 120 min and pH=8, MS8-1: Concentration=8%, Time= 60 min and pH=9, MS8-2: Concentration=8%, Time= 90 min and pH=8, MS8-3: Concentration=8%, Time= 120 min and pH=8.5.

غلظت مخلوط اصلاح کننده تا ۶٪ دماهای ژلاتیناسیون

۳-۳- خصوصیات حرارتی نشاسته

نشاسته های اصلاح شده را کاهش داد. در بین نمونه های غلظت ۶٪، نمونه MS6-2 کمترین دماهای ژلاتیناسیون را نشان داد که بیانگر تأثیر مثبت  $pH$  ۹ در بهبود روند اصلاح شیمیایی می باشد. افزایش غلظت مخلوط اصلاح کننده از ۶٪ به ۸٪ باعث افزایش دماهای ژلاتیناسیون شد. با افزایش غلظت مخلوط آدیپیک اسید و استیک انیدرید مقدار ترکیب آدیپیک اسید (عامل اتصال دهنده عرضی) در محیط نیز افزایش می یابد که باعث ایجاد پیوندهای عرضی بیشتر می شود. آنتالپی ژلاتیناسیون معیاری برای کریستالیزاسیون (کمیت و کیفیت) و نشان دهنده از بین رفتن نظم مولکولی درون گرانول طی فرآیند ژلاتیناسیون است [۱۶]. اصلاح انجام شده به طور معنی داری ( $p < 0.05$ ) آنتالپی ژلاتیناسیون نشاسته های اصلاح شده (MS) در مقایسه با نشاسته معمولی (N) را کاهش داد. جایگزینی گروه استیل در گرانول های نشاسته باعث شکستن و در نتیجه از دست رفتن نسبی حالت کریستالی گرانول های نشاسته می شود. بی نظمی ایجاد شده موجب می گردد تا انرژی حرارتی کمتری برای تغییر فاز نیاز باشد و در نتیجه آنتالپی ژلاتیناسیون کاهش می یابد [۴۱]. مقایسه داده ها نشان داد که افزایش غلظت مخلوط آدیپیک اسید و استیک انیدرید موجب افزایش آنتالپی ژلاتیناسیون شد بطوریکه، نمونه های MS4-1 (۴٪، ۶۰ دقیقه،  $pH$ : ۸) و MS8-2 (۸٪، ۹۰ دقیقه،  $pH$ : ۸) به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار آنتالپی ژلاتیناسیون را در بین نشاسته های اصلاح شده نشان دادند. افزایش آنتالپی

خصوصیات حرارتی نشاسته های اصلاح شده (MS) و معمولی (N) امارانت در جدول ۳ گزارش شده است. ترکیب آدیپیک اسید و استیک انیدرید دماهای ژلاتیناسیون (دمای شروع، دمای پیک و دمای نهایی) نشاسته های اصلاح شده را در مقایسه با نشاسته معمولی کاهش داد. این کاهش برای تمامی نشاسته های اصلاح شده به جز نمونه های MS4-1 (دمای شروع)، MS8-2 (دمای پیک) و دو نمونه MS8-2 و MS8-1 (دمای نهایی) معنی دار ( $p < 0.05$ ) بود. Liu و همکاران [۳۹] نشان دادند که اتصال عرضی نشاسته برنج دماهای ژلاتیناسیون را در مقایسه با نشاسته اصلاح نشده (معمولی) کاهش داد در حالی که نشاسته برنج مومی با اتصالات عرضی دمای شروع بیشتری داشت. دماهای ژلاتیناسیون هر دو برنج معمولی و مومی در اثر استیلناسیون در مقایسه با نشاسته طبیعی خود کاهش یافت. Babic و همکاران [۴۰] و Yadav و Patki [۴۱] نیز نتیجه مشابهی را بر اثر استیلناسیون نشاسته های ذرت و نخود گزارش کردند. کاهش دماهای ژلاتیناسیون در اثر اصلاح نشاسته با ترکیب آدیپیک اسید و استیک انیدرید می تواند به دلیل جایگزینی گروه های استیل و افزایش پیوند هیدروژنی درون مولکولی نشاسته در اثر این جایگزینی باشد که موجب کاهش دماهای ژلاتیناسیون در مقایسه با نشاسته معمولی می شود. در حالی که فرآیند اتصال عرضی از طریق ایجاد ساختاری منظم و محدود ساختن فرآیند ژلاتیناسیون موجب افزایش دمای ژلاتیناسیون می شود. افزایش



مورد نیاز برای برهم زدن نظم کریستال‌های بسیار منظم شکل- گرفته در اثر اتصال عرضی باشد [۱۶].

ژلاتیناسیون می‌تواند نتیجه افزایش میزان گرانول‌های ژلاتینه شده نشاسته به دلیل تضعیف پیوندهای درون و یا بین مولکولی در اثر حضور گروه استیل باشد و یا ناشی از افزایش انرژی

**Table 3** Thermal properties of amaranth native (NS) and modified (MS) starches

| Samples | Onset Temp. (°C)           | Peak Temp. (°C)            | Conclusion Temp. (°C)        | Gelatinization Enthalpy (J g <sup>-1</sup> ) |
|---------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|--|
| N       | 67.9 ± 0.141 <sup>a</sup>  | 95.50 ± 0.14 <sup>a</sup>  | 113.95 ± 0.07 <sup>a</sup>   | 18.25 ± 0.1 <sup>a</sup>                     |
| MS4-1   | 67.85 ± 0.63 <sup>a</sup>  | 89.55 ± 0.07 <sup>bc</sup> | 104.80 ± 0.28 <sup>cde</sup> | 10.21 ± 0.44 <sup>h</sup>                    |
| MS4-2   | 66.25 ± 0.21 <sup>b</sup>  | 89.20 ± 0.28 <sup>c</sup>  | 105.30 ± 0.14 <sup>cd</sup>  | 10.39 ± 0.38 <sup>gh</sup>                   |
| MS4-3   | 65.90 ± 0.28 <sup>bc</sup> | 88.90 ± 0.28 <sup>c</sup>  | 105.25 ± 1.77 <sup>cd</sup>  | 12.58 ± 0.35 <sup>d</sup>                    |
| MS6-1   | 65.40 ± 0.141 <sup>c</sup> | 87.45 ± 0.07 <sup>d</sup>  | 103.75 ± 0.354 <sup>de</sup> | 10.59 ± 0.00 <sup>fgh</sup>                  |
| MS6-2   | 60.45 ± 0.07 <sup>e</sup>  | 86.3 ± 0.00 <sup>e</sup>   | 103.25 ± 0.35 <sup>e</sup>   | 10.85 ± 0.02 <sup>efg</sup>                  |
| MS6-3   | 60.90 ± 0.14 <sup>e</sup>  | 88.95 ± 0.35 <sup>c</sup>  | 110.00 ± 0.00 <sup>b</sup>   | 10.96 ± 0.00 <sup>ef</sup>                   |
| MS8-1   | 65.70 ± 0.14 <sup>bc</sup> | 90.40 ± 0.707 <sup>b</sup> | 106.35 ± 0.07 <sup>c</sup>   | 13.86 ± 0.00 <sup>c</sup>                    |
| MS8-2   | 65.90 ± 0.14 <sup>bc</sup> | 96.05 ± 0.07 <sup>a</sup>  | 113.90 ± 1.13 <sup>a</sup>   | 17.73 ± 0.23 <sup>b</sup>                    |
| MS8-3   | 64.05 ± 0.07 <sup>d</sup>  | 89.10 ± 1.13 <sup>c</sup>  | 112.85 ± 0.63 <sup>a</sup>   | 11.19 ± 0.03 <sup>e</sup>                    |

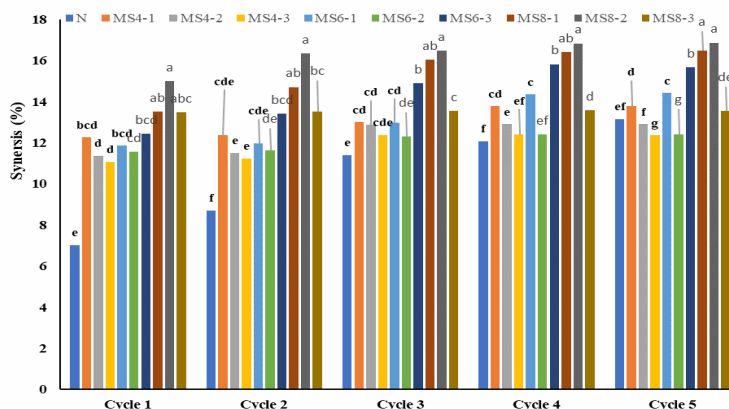
- Mean values from duplicate ± SD. Means within columns with different letters are significantly different (P < 0.05).

MS4-1: Concentration=4%, Time= 60 min and pH=8, MS4-2: Concentration=4%, Time= 90 min and pH=8.5, MS4-3: Concentration=4%, Time= 120 min and pH=9, MS6-1: Concentration=6%, Time= 60 min and pH=8.5, MS6-2: Concentration=6%, Time= 90 min and pH=9, MS6-3: Concentration=6%, Time= 120 min and pH=8, MS8-1: Concentration=8%, Time= 60 min and pH=9, MS8-2: Concentration=8%, Time= 90 min and pH=8, MS8-3: Concentration=8%, Time= 120 min and pH=8.5.

با نشاسته معمولی آمارانت (N) کاهش یافت (شکل ۲).

### ۳-۴- پایداری انجماد و انجمادزایی

پایداری انجماد و انجمادزایی خمیر تمامی نشاسته‌های اصلاح شده (MS) به‌طور معنی‌داری ( $p < 0/05$ ) در مقایسه



**Fig 2** Freeze-thaw stability of native (NS) and modified (MS) amaranth starches

- Mean values from triplicate ± SD. Different letters in each Cycle indicate significant ( $p < 0/05$ ) difference.

Different letters indicate significant ( $p < 0/05$ ) difference.

MS4-1: Concentration=4%, Time= 60 min and pH=8, MS4-2: Concentration=4%, Time= 90 min and pH=8.5, MS4-3: Concentration=4%, Time= 120 min and pH=9, MS6-1: Concentration=6%, Time= 60 min and pH=8.5, MS6-2: Concentration=6%, Time= 90 min and pH=9, MS6-3: Concentration=6%, Time= 120 min and pH=8, MS8-1: Concentration=8%, Time= 60 min and pH=9, MS8-2: Concentration=8%, Time= 90 min and pH=8, MS8-3: Concentration=8%, Time= 120 min and pH=8.5.

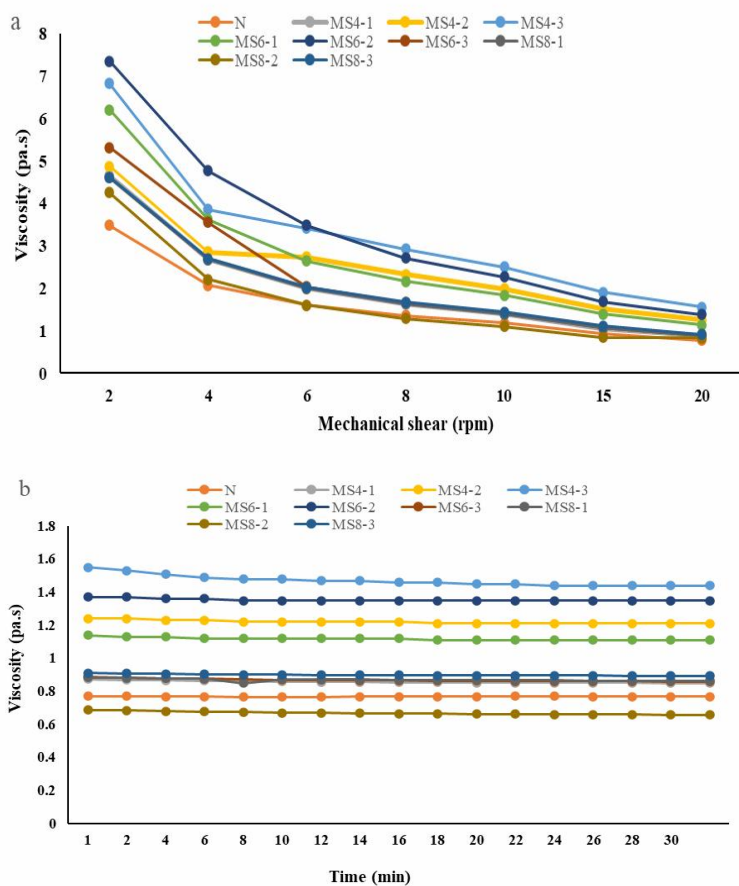
به معنی تمایل بیشتر نشاسته به رتروگراداسیون می‌باشد [۴۳]. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد کمترین و بیشترین میزان سینرسیس در بین نشاسته‌های اصلاح شده به ترتیب مربوط به نمونه MS4-3 (۱۲۰ دقیقه، pH: ۹) و نمونه MS8-2

سینرسیس خروج آب از خمیر به دلیل چینش مجدد مولکول‌ها همراه با تشکیل ساختاری منظم‌تر طی خنک شدن و نگهداری خمیر نشاسته است [۴۲]. سینرسیس به‌نوعی تمایل نشاسته به رتروگراداسیون را نیز نشان می‌دهد. افزایش درصد سینرسیس

زنجیره‌های بلند آمیلوپکتین در ساختار نشاسته، نیز سبب تشکیل ساختار کریستالی‌تری می‌شوند که نهایتاً تمایل به رتروگراداسیون را افزایش می‌دهد [۳۲ و ۴۵]. درصد سینرسیس نشاسته‌های اصلاح شده و نشاسته معمولی آمارانت با افزایش سیکل انجماد و انجام‌زدایی افزایش یافت با این حال این افزایش برای نشاسته معمولی در مقایسه با نشاسته‌های اصلاح شده کمی بیشتر بود.

۳-۵- ویسکوزیته ظاهری خمیر  
ویسکوزیته ظاهری تمامی نشاسته‌های آمارانت (اصلاح شده و معمولی) با افزایش سرعت برشی کاهش یافت (شکل ۳-ا).

۸٪، ۹۰ دقیقه،  $pH$ : ۸) بود. علت افزایش ناپایداری با افزایش غلظت ترکیب آدیپیک‌اسید و استیک‌انیدرید را می‌توان به افزایش مقدار عامل اتصال‌دهنده عرضی نسبت داد. اتصال عرضی ایجاد شده باعث شکل‌گیری ساختاری منظم در ساختار خمیر نشاسته می‌شود که تمایل به جذب و نگهداری آب گرانول‌ها را کاهش می‌دهد [۴۴]. همچنین، گروه‌های استات در نشاسته می‌توانند پیوند مجدد بین آمیلوزها را طی سرد شدن خمیر نشاسته تسهیل کنند [۴۴]. ابتدا آن دسته از زنجیره‌های آمیلوز که طی فرآیند حرارت دهی حل شده‌اند تمایل بیشتری به سازمان‌دهی مجدد حین سرد شدن ژل نشاسته را نشان می‌دهند که این امر باعث ایجاد تعداد بیشتری از پیوندهای عرضی طی شکل‌گیری ژل می‌شود. همچنین، پراکندگی



**Fig 3** a) Effect of mechanical shear on starch paste viscosity, b) Starch paste viscosity changes at a constant rate in 30 min

MS4-1: Concentration=4%, Time= 60 min and  $pH$ =8, MS4-2: Concentration=4%, Time= 90 min and  $pH$ =8.5, MS4-3: Concentration=4%, Time= 120 min and  $pH$ =9, MS6-1: Concentration=6%, Time= 60 min and  $pH$ =8.5, MS6-2: Concentration=6%, Time= 90 min and  $pH$ =9, MS6-3: Concentration=6%, Time= 120 min and  $pH$ =8, MS8-1: Concentration=8%, Time= 60 min and  $pH$ =9, MS8-2: Concentration=8%, Time= 90 min and  $pH$ =8, MS8-3: Concentration=8%, Time= 120 min and  $pH$ =8.5.

کوچک‌تر بهتر» (رابطه ۵) در نظر گرفته شد. پس از آنالیز به هر یک از ویژگی‌های نشاسته بر اساس میزان اهمیت آنها وزن‌های ۱ تا ۵ (۱ بیشترین اهمیت و ۵ کمترین اهمیت) داده شد. بی‌مقیاس سازی نتایج با روش  $RPD^3$  صورت گرفت (رابطه ۶). در نهایت تمام نتایج با وزن یکسان در پاسخ نهایی نقش داده شده‌اند و نتایج بی‌وزن شده با روش تاگوچی آنالیز شدند. شرایط بهینه تعیین شده عبارت بودند از: غلظت ۶٪، زمان ۱۲۰ دقیقه و  $pH$  ۹.

رابطه (۴)

$$S/N = -10 \times \log_{10} [\text{sum} (1/Y^2)/n]$$

رابطه (۵)

$$S/N = -10 \times \log_{10} [\text{sum} (Y^2)/n]$$

که در آن،  $Y$  = پاسخ‌هایی برای ترکیب سطح عامل داده شده و  $n$  = تعداد پاسخ‌ها در ترکیب سطح عامل است.

رابطه (۶)

$$RPD = \frac{(Sol - BestSol)}{BestSol} \times 100$$

که در آن  $sol$  مقدار داده در یک آزمایش و  $best\ sol$  بهترین داده در بین تمامی داده‌ها در یک آزمایش است.

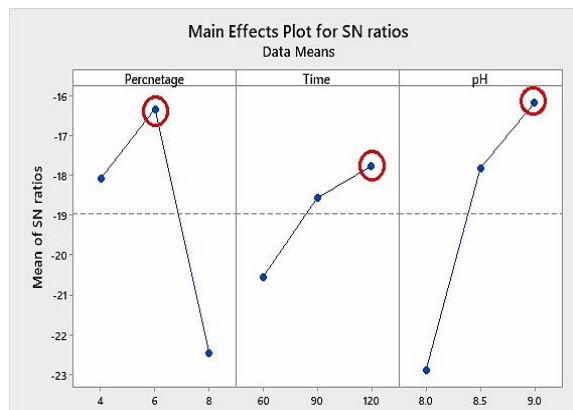


Fig 4 Main effects of each factors using S/N ratio

## ۴- نتیجه‌گیری کلی

نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه نشان داد که اصلاح شیمیایی انجام‌شده به‌طور معنی‌داری باعث ایجاد تغییر در ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و عملکردی نشاسته آمارانت شد. مخلوط آدیپیک‌اسید و استیک‌انیدرید قدرت تورم، انحلال، ویسکوزیته و شفافیت خمیر نشاسته‌های اصلاح‌شده را در مقایسه با نشاسته معمولی بهبود بخشید. پودر نشاسته‌های اصلاح‌شده

هنگام اعمال نیروی برشی گرانول‌های متورم شده نشاسته خود را در جهت موازی با مسیر نیروی واردشده قرار می‌دهند. در اثر نیروی اعمال شده ذرات بزرگ‌تر شکسته و به ذرات کوچک‌تر تبدیل می‌شوند در نتیجه، کشش و مقاومت ناشی از برهم‌کنش بین گرانول‌ها کاهش یافته و جریان پیدا می‌کنند که منجر به کاهش ویسکوزیته می‌شود [۲۷، ۲۶ و ۴۷]. کاهش ویسکوزیته در اثر افزایش نرخ برشی نشان‌دهنده رفتار رقیق‌شونده خمیرهای نشاسته است. نشاسته‌های اصلاح شده آمارانت ( $MS$ ) در مقایسه با نشاسته معمولی خود ( $N$ ) ویسکوزیته بیشتری نشان‌دادند. ویسکوزیته ظاهری تابعی از قدرت تورم و اندازه گرانول‌های نشاسته است [۴۸]. طی فرآیند اصلاح با جایگزینی و ورود گروه‌های استیل به ساختار نشاسته، پیوند بین‌مولکولی نشاسته (آمیلاز و آمیلوپکتین) سست‌تر و قدرت تورم و انحلال نشاسته افزایش می‌یابد. این امر دسترسی نواحی بی‌شکل نشاسته را به آب تسهیل کرده و موجب افزایش قابلیت نگهداری آب در ماتریس نشاسته و شکل‌گیری ماتریس منظم‌تر می‌گردد در نتیجه نشاسته اصلاح‌شده در برابر تغییر شکل در مقایسه با نشاسته معمولی خود مقاومت بیشتری نشان می‌دهد [۴۸ و ۴۹]. پس از کاهش شدید ویسکوزیته در سرعت‌های برشی اولیه، کاهش ویسکوزیته در سرعت‌های بالاتر روند ملایم‌تری را نشان داد که این امر می‌تواند به دلیل کاهش اندازه توده‌های کلئیدی خمیر در اثر افزایش نرخ برشی باشد [۴۷]. شکل ۳- $b$ ، ویسکوزیته ظاهری نشاسته‌های معمولی و اصلاح‌شده آمارانت را در سرعت ثابت ( $20\ rpm$ ) نشان می‌دهد. ویسکوزیته تمامی نشاسته‌ها در مدت‌زمان ۳۰ دقیقه هیچ تغییری نکرد که این امر نشان‌دهنده پایداری خمیر نشاسته‌ها تحت این شرایط است.

۳-۶- بهینه‌سازی شرایط اصلاح نشاسته

جهت تعیین شرایط بهینه اصلاح شیمیایی نشاسته آمارانت با مخلوط آدیپیک‌اسید و استیک‌انیدرید از آنالیز سیگنال به نویز روش تاگوچی در نرم‌افزار مینی‌تیب ( $minitab\ 18$ ) و با دو الگوی «مقدار بزرگ‌تر بهتر» و «مقدار کوچک‌تر بهتر» استفاده شد. برای نتایج آزمایش‌های قدرت تورم، انحلال، اندیس روشنایی، شفافیت خمیر الگوی «مقدار بزرگ‌تر بهتر» (رابطه ۴) و نتایج آزمایش‌های خصوصیات حرارتی (با توجه به فرآورده نهایی) و پایداری انجماد و انجمادزدایی الگوی «مقدار

1. Larger is better

2. Smaller is better

3. Relative Percentage Deviation

- (2017). Amaranth (*Amaranthus* spp.) starch isolation, characterization, and utilization in development of clear edible films. *Journal of Food Processing and Preservation*. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13217>.
- [7] Choi, H., Kim, W., & Shin, M. (2004). Properties of Korean amaranth starch compared to waxy millet and waxy sorghum starches. *Starch/Stärke*, 56, 469–477. <https://doi.org/10.1002/star.200300273>.
- [8] Hazarika, B.J., & Sit, N. (2016). Effect of dual modification with hydroxypropylation and cross-linking on physicochemical properties of taro starch. *Carbohydrate Polymers*, 140, 269–278. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.12.055>.
- [9] Juszek, L., Oczadly, Z., & Gałkowska, D. (2013). Effect of modified starches on rheological properties of ketchup. *Food Bioprocess Technol*, 6, 1251–1260. <http://doi.org/10.1007/s11947-012-0813-x>.
- [10] Luo, F.X., Huang, Q., Fu, X., Zhang, L.X., & Yu, S.J. (2009). Preparation and characterization of cross-linked waxy potato starch. *Food Chemistry*, 115(2), 563–568. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.12.052>.
- [11] Ackar, D., Babic, J., Jozinovic, A., Miličević, B., Stela Jokic, S., Miličević, R., Rajic, M., & Subaric, D. (2015). Starch modification by organic acids and their derivatives: A review. *Molecules*, 20 (10), 19554–19570. <https://doi.org/10.3390/molecules201019554>.
- [12] Kapelko, M., Zieba, T., Michalski, A., & Gryszkin, A. (2015). Effect of cross-linking degree on selected properties of retrograded starch adipate. *Food Chemistry*, 167, 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.06.096>.
- [13] Krempel, M., Griffin, K., & Houryieh, H. (2019). Hydrocolloids as emulsifiers and stabilizers in beverage preservation. In: Grumezescu, A.M., & Holban, A.M. editors. *Preservatives for the beverage industry: The science of beverages*, Vol. 15. Woodhead Publishing; p. 445.
- [14] Mirmoghtadaie, L., Kadivar, M., & Shahedi, M. (2009). Effects of cross-linking and acetylation on oat starch properties. *Food Chemistry*, 116 (3), 709–713. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.03.019>.
- روشنایی بیشتر، قرمزی و زردی کمتری را نشان دادند. اصلاح شیمیایی موجب کاهش دماهای ژلاتیناسیون، آنتالپی ژلاتیناسیون و پایداری انجماد و انجمادزدایی نشاسته‌های اصلاح‌شده، شد. با این حال، با توجه به اینکه فرآورده غذایی ترکیبی از ترکیبات غذایی مختلف مانند شکر، نمک، هیدروکلئیدها و غیره است که می‌تواند بر پایداری انجماد و انجمادزدایی نشاسته تأثیرگذار باشد، امکان استفاده از نشاسته آمارانت اصلاح‌شده با مخلوط آدیپیک‌اسید و استیک‌انیدرید به‌عنوان یک تغلیظ‌کننده، پایدارکننده و یا جایگزین چربی در فرمولاسیون محصول غذایی نیازمند مطالعات بیشتر می‌باشد. همچنین، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، شرایط بهینه اصلاح، غلظت ۶٪، زمان واکنش ۱۲۰ دقیقه و pH ۹ تعیین گردید.

## ۵- منابع

- [1] Sindhu, R., & Singh Khatkar, B. (2016). Characterization of Amaranth (*Amaranthus Hypochondriacus*) starch. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 5(6), 463–469.
- [2] Hasannia, F., Tajaddodi Talab, K., Shahidi, S. A., & Ghorbani Hasan Saraei, A. (2022). Effect of steam curing on pasting and textural properties, starch structure and the quality of a local aromatic rice variety. *Journal of Food Processing and Preservation*, e16857.
- [3] Zhu, F. (2017). Structures, physicochemical properties, and applications of amaranth starch. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(2), 313–325. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.862784>.
- [4] Aguilar-Felices, E.G., Romero-Viacava, M., Enciso-Roca, E., Herrera-Calderon, O., Común-Ventura, P., Ángel Yuli-Posadas, R., Chacaltana-Ramos, L., & Pari-Olarte, B. (2019). Antioxidant activity of the germinated seed of four varieties of *Amaranthus caudatus* L. from Peru. *Pharmacogn J*, 11(3), 588–593.
- [5] Singh, N., Kaur, Sh., Kaur, A., Isono, N., Ichihashi, Y., Noda, T., & Chand Rana, J. (2014). Structural, thermal, and rheological properties of *Amaranthus hypochondriacus* and *Amaranthus caudatus* starches. *Starch/Stärke*, 66, 457–467. <https://doi.org/10.1002/star.201300157>.
- [6] Chandla, N.K., Saxena, D.C., & Singh, S.

- Technology. 2 (4).
- [22] Song, L. (2010). Chemical modification of starch and preparation of starch based nanocomposites. A Dissertation. In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy. A Dissertation Presented to The Graduate Faculty of The University of Akron.
- [23] Shahidi, S. A. (2022). Effect of solvent type on ultrasound-assisted extraction of antioxidant compounds from *Ficaria viciifolia*: Optimization by response surface methodology. *Food and Chemical Toxicology*, 163, 112981.
- [24] Babic, J., Subaric, D., Ackar, D., Kovacevic, D., Pilizota, V., & Kopjar, M. (2007). Preparation and characterization of acetylated tapioca starches. *Deutsche Lebensmittel-Rundschau*. 103(12), 580-585.
- [25] Sindhu, R. & Khatkar, B.S. (2018). Thermal, structural and textural properties of amaranth and buckwheat starches. *Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3474-6>.
- [26] Uriyapongson, J., & Rayas-Duarte, P. (1994). Comparison of yield and properties of Amaranth starches using wet and dry-wet milling processes. *Cereal Chemistry*. 71(6), 571-577.
- [27] Zapata-Luna, R.L., Ayora-Talavera, T., Pacheco, N., García-Márquez, E., Espinosa-Andrews, H., Ku-González, A., Ruiz-Ruiz, J., & Cuevas-Bernardino, J.C. (2021). Physicochemical, morpho-structural and rheological characterization of starches from three *Phaseolus* spp. landraces grown in Chiapas. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 15(2), 1410-1421. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00739-z>.
- [28] Singh, J., Kaur, L., & Singh, N. (2004). Effect of acetylation on some properties of corn and potato starches. *Starch-Starke*. 56, 586-601. <https://doi.org/10.1002/star.200400293>.
- [29] Xu, Y.X., Dzenis, Y., & Hanna, M.A. (2005). Water solubility, thermal characteristics and biodegradability of extruded starch acetate foams. *Industrial Crops and Products*. 21(3), 361-368. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2004.05.004>.
- [30] Han, F., Liu, M., Gong, H., Lu, S., & Zhang, B. (2012). Synthesis, characterisation and functional properties low substituted acetylated corn starch. *International Journal*
- [15] Mortensen, A., Aguilar, F., Crebelli, R., Domenico, A., Dusemund, B., Frutos, M.J., Galtier, P., David Gott, D., Gundert-Remy, U., Lambre, C., Leblanc, J.Ch., Lindtner, O., Moldeus, P., Mosesso, P., Parent-Massin, D., Oskarsson, A., Stankovic, I., Waalkens-Berendsen, I., Wright, M., Younes, M., Tobback, P., Horvath, Z., Tasiopoulou, S., & Woutersen, R.A. (2017). Re-evaluation of oxidised starch (E 1404), monostarch phosphate (E 1410), distarch phosphate (E 1412), phosphated distarch phosphate (E 1413), acetylated distarch phosphate (E 1414), acetylated starch (E 1420), acetylated distarch adipate (E 1422), hydroxypropyl starch (E 1440), hydroxypropyl distarch phosphate (E 1442), starch sodium octenyl succinate (E 1450), acetylated oxidised starch (E 1451) and starch aluminium octenyl succinate (E 1452) as food additives. *EFSA Journal*. 15(10):4911. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2017.4911>.
- [16] Singh, J., Kaur, L., & McCarthy, O.J. (2007). Factors influencing the physicochemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications-a review. *Food Hydrocolloids*. 21(1), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.02.006>.
- [17] Mali, S., & Grossmann, M.V.E. (2001). Preparation of Acetylated Distarch Adipates by Extrusion. *LWT - Food Science and Technology*. 34 (6), 384-389. <https://doi.org/10.1006/fstl.2001.0768>.
- [18] Sarka, E., & Bubnik, Z. (2009). Using Image Analysis to Identify Acetylated Distarch Adipate in a Mixture. *Starch/Stärke*. 61 (8), 457-462. <https://doi.org/10.1002/star.200800118>.
- [19] Zieba, T., Gryszkin, A., & Kapelko, M. (2014). Selected properties of acetylated adipate of retrograded starch. *Carbohydrate Polymers*. 99, 687-691. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.064>.
- [20] Ayucitra, A. (2012). Preparation and characterisation of acetylated corn starches. *International journal of chemical engineering and application*, 3(3), 156-159. <https://doi.org/10.7763/IJCEA.2012.V3.178>.
- [21] García, F.P., Méndez, J.P., Méndez Marzo, M.A., Bello Pérez, L.A., & Gutiérrez, A.D.R. (2012). Modification and Chemical Characterization of Barley Starch. *International Journal of Applied Science and*

- acetylated normal and waxy rice starch. *Starch/Staerke*. 51(7), 249–252. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-379X\(199907\)51:7<249::AID-STAR249>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-379X(199907)51:7<249::AID-STAR249>3.0.CO;2-O).
- [40] Babić, J., Šubarić, D., Nedić Tiban, N., & Kopjar, M. (2009). Acetylation and characterization of corn starch. *Journal of Food Science & Technology-Mysore*. 46(5), 423–426.
- [41] Yadav, D.K., & Patki, P.E. (2015). Effect of acetyl esterification on physicochemical properties of chick pea (*Cicer arietinum* L.) starch. *Journal of Food Science and Technology*. 52(7), 4176–4185. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1388-5>.
- [42] Sindhu, R., Devi, A., & Khatkar, B.S. (2021). Morphology, structure and functionality of acetylated, oxidized and heat moisture treated amaranth starches. *Food Hydrocolloids*. 118, 106800. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106800>.
- [43] Simsek, S., Ovando-Martínez, M., Whitney, K., Bello-Pérez, L.A. (2012). Effect of acetylation, oxidation and annealing on physicochemical properties of bean starch. *Food Chemistry*. 134(4), 1796–1803. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.078>.
- [44] Wickramasinghe, H.A.M., Yamamoto, K., Yamauchi, H., & Noda, T. (2009). Effect of low level of starch acetylation on physicochemical properties of potato starch. *Food Science and Biotechnology*. 18(1), 118-123.
- [45] Colussi, R., El Halal, Sh.L.M., Pinto, V.Z., Josiane Bartz, J., Gutkoski, L.C., Zavareze, E.R., & Dias, A.R.G. (2015). Acetylation of rice starch in an aqueous medium for use in food. *LWT - Food Science and Technology*. 62(2), 1076-1082. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.053>.
- [46] Carrillo-Navas, H., Hernández-Jaimes, C., Utrilla-Coello, R.G., Meraz, M., Vernon-Carter, E.J., & Alvarez-Ramirez, J. (2014). Viscoelastic relaxation spectra of some native starch gels. *Food Hydrocolloids*. 37, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.10.023>.
- [47] Izidoro, D.R., Junior, B.D., Haminiuk, Ch.W.I. Sierakowski, M.R., Freitas, R.J.S., & Paula Scheer, A. (2007). Granules morphology and rheological behavior of
- of Biological Macromolecules. 50(4), 1026–1034. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2012.02.030>.
- [31] Hasanuddin, A., Rahim, A., & Kadir, S. (2020). Characteristics of acetylated Banggai yam starch on pH and concentration of anhydride acetic. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 29 (5s), 784-793.
- [32] Salcedo, J., Hernández, J., & Fernández, A. (2016). Effect of the acetylation process on native starches of yam (*Dioscorea* spp.). *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. 69(2), 7997-8006. <http://dx.doi.org/10.15446/rfna.v69n2.59144>.
- [33] Trela, V.D., Ramallo, A.L., & Albani, O.A. (2020). Synthesis and characterization of acetylated cassava starch with different degrees of substitution. *Food/Feed Science and Technology -Brazilian Archives of Biology and Technology*. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4324-2020180292>.
- [34] Kaur, L., Singh, J., & Singh, N. (2006). Effect of cross linking on some properties of potato (*Solanum tuberosum* L.) starches. *Journal of the Science and Food Agriculture*. 86, 1945–1954. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2568>.
- [35] Koo, S.H., Lee, K.Y., & Lee, H.G. (2010). Effect of cross-linking on the physicochemical and physiological properties of corn starch. *Food Hydrocolloids*. 24(6-7), 619-625. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.02.009>.
- [36] Bhandari, P.N., & Singhal, R.S. (2002). Effect of succinylation on the corn and amaranth pastes. *Carbohydride polymers*. 48, 233-240. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(01\)00310-1](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(01)00310-1).
- [37] Mbougoung, P.D., Tenin, D., Scher, J., & Tchiégang, C. (2012). Influence of acetylation on physicochemical, functional and thermal properties of potato and cassava starches. *Journal of Food Engineering*. 108, 320–326.
- [38] Van Hung, Ph., & Morita, N. (2005). Effects of granule sizes on physicochemical properties of cross-linked and acetylated wheat starches. *Starch/Stärke*. 57,413-420. <https://doi.org/10.1002/star.200500417>.
- [39] Liu, H. Ramsden, L., & Corke, H. (1999). Physical properties of cross-linked and

- agriculture and natural resources. <https://doi.org/10.2991/aer.k.200325.051>.
- [49] Guerra-DellaValle, D., Sánchez-Rivera, M.M., Zamudio-Flores, P.B., Méndez-Montevalvo, G., & Bello-Pérez, L.A. (2009). Effect of chemical modification type on physicochemical and rheological characteristics of banana starch. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 8(2), 197-203.
- green banana (*Musa cavendishii*) and corn (*Zea mays*) starch gel. *Ciência e Agrotecnologia*. 31(5), 1443-1448. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000500026>.
- [48] Ansharullah, A., Natsir, M., & Tamrin. (2019). Rheological behavior of native Sago starch in comparison with other native starches. *Advances in Engineering Research*. 5<sup>th</sup> International conference on food,



## Physicochemical and functional properties of modified amaranth starch with adipic acid and acetic anhydride mixture

Mohammadi, S. <sup>1</sup>, Alimi, M. <sup>2\*</sup>, Shahidi, S. A. <sup>3</sup>, Shokoohi, Sh. <sup>4</sup>

1. Department of Food Science and Technology, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.
3. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.
4. Assistant Professor, Chemical, Polymeric and Petrochemical Technology Development Research Division, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

### ABSTRACT

#### Article History:

Received 2022/ 08/ 05  
Accepted 2021/ 10/ 30

#### Keywords:

Amaranth starch,  
Chemical modification,  
Swelling power,  
Taguchi,  
Thermal properties.

**DOI:** 10.22034/FSCT.19.130.197

**DOR:** 20.1001.1.20088787.1401.19.130.17.6

\*Corresponding Author E-Mail:  
ahoorra\_mazdak@yahoo.com

This study aimed to investigate the effect of chemical modification with adipic acid/acetic anhydride mixture (1:30) on the physicochemical and functional properties of amaranth starch and also to determine the optimal conditions for amaranth starch chemical modification with the mentioned mixture. Amaranth starch was isolated and then modified under nine different treatments designed by the Taguchi method using three main chemical modification factors, including the mixture of adipic acid /acetic anhydride concentration (4%, 6%, and 8%), reaction time (60, 90 and 120 min) and suspension pH (8, 8.5 and 9). Swelling power, solubility, color, paste clarity, thermal properties, freeze-thaw stability, and apparent viscosity of starch samples were investigated. Modification optimal conditions were determined using Taguchi analysis and the related percentage deviation (RPD) method. The result obtained from this study showed that the chemical modification significantly changed the physicochemical and functional properties of amaranth starch. Adipic acid/acetic anhydride mixture improved the swelling power, solubility, viscosity, and paste clarity of modified starch than native. Modified starch powders showed more lightness, less yellowness, and redness in color. Chemical modification reduced gelatinization temperatures, gelatinization enthalpy, and freeze-thaw stability. However, since other food components such as sugars, salt, hydrocolloids, etc., influence the freeze-thaw stability of starch, the possibility of modified amaranth starch utilization as a stabilizer, thickener, or fat replacer in food products with the mentioned mixture needs additional research is required to be conducted. The optimum modification conditions were a concentration of 6%, a reaction time of 120 minutes, and a pH of 9.