



بهینه‌سازی تولید فسفات دو نشاسته‌ای استیله (E1414) و ارزیابی ویژگی‌های آن جهت کاربرد در محصولات کنسروی

حامد صابریان^{۱*}، علی فروهر^۲

۱- دکتری، استادیار گروه پژوهشی فرآوری پسماند و ضایعات کشاورزی، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، اصفهان

۲- دکتری، استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ های مقاله :	<p>نشاسته به عنوان یکی از پرکاربردترین پلی‌ساکاریدهای طبیعی در صنایع غذایی، به دلیل ویژگی‌هایی چون تورم، گرانی و توانایی تشکیل ژل مورد توجه است؛ با این حال، محدودیت‌هایی نظیر ناپایداری حرارتی، پس‌روی و آب‌اندازی موجب کاهش کارایی آن در فرآیندهای صنعتی می‌شود. به منظور رفع این محدودیت‌ها، اصلاح شیمیایی نشاسته به ویژه به صورت دوگانه (استیلاسیون و فسفریلاسیون) روشی مؤثر برای بهبود عملکرد آن است. در این پژوهش، تولید و بهینه‌سازی فسفات دو نشاسته‌ای استیله (E1414) با استفاده از طرح سطح پاسخ (RSM) و طراحی مرکب مرکزی (CCD) مورد بررسی قرار گرفت. عوامل مؤثر شامل درصد عامل ایجادکننده اتصالات عرضی (STMP/STPP) در بازه ۱ تا ۱۰ درصد و غلظت استیک انیدرید در بازه مشابه بود. خواص فیزیکوشیمیایی، از جمله درصد گروه‌های استیل و درجه جانشینی (DS)، قدرت تورم، آب‌اندازی، شفافیت و خواص حرارتی (RVA)، به‌عنوان پاسخ‌های اصلی ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که افزایش غلظت استیک انیدرید موجب افزایش معنی‌دار درجه استیلاسیون (تا ۲/۰۴٪) و بهبود ظرفیت تورم، کاهش آب‌اندازی و افزایش شفافیت شد، در حالی که افزایش عامل اتصالات عرضی موجب کاهش تورم و پایداری بیشتر در برابر حرارت و تنش برشی گردید. در نهایت، غلظت بهینه برای تولید نشاسته اصلاح‌شده، ۱۰٪ استیک انیدرید و ۱٪ عامل ایجادکننده اتصالات عرضی (STMP/STPP) تعیین شد. این ترکیب سبب ایجاد نشاسته‌ای با پایداری حرارتی و برشی بالا، شفافیت مناسب و حداقل آب‌اندازی گردید. بنابراین، نشاسته E1414 به‌عنوان یک پایدارکننده و قوام‌دهنده مؤثر برای کاربرد در محصولات کنسروی و فرآورده‌های غذایی با فرآیند حرارتی شدید پیشنهاد می‌شود.</p>
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳	
تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۵	
کلمات کلیدی:	
نشاسته، اصلاح دوگانه، استیلاسیون، اتصالات عرضی، RVA	
DOI: 10.48311/fsct.2026.117188.82903	
* مسئول مکاتبات:	
Saberian@acecr.ac.ir	

۱-مقدمه

واکنش، منبع گیاهی نشاسته و اندازه و ویژگی‌های ساختاری گرانول خام نشاسته وابسته است [۵].

نمک‌های فسفات می‌توانند باعث ایجاد پیوند عرضی بین زنجیره‌های خطی یا شاخه‌دار آمیلوپکتین شوند. این نوع نشاسته‌های اصلاح‌شده با تشکیل پیوندهای اتری یا استری با گروه‌های هیدروکسیل مولکول‌های نشاسته تشکیل می‌شوند [۶]. در این دسته از نشاسته‌ها، استحکام گرانول نشاسته با تشکیل یک شبکه سه‌بعدی افزایش می‌یابد [۷]. پیوند عرضی با ایجاد پیوندهای شیمیایی که به عنوان پل بین مولکول‌ها عمل می‌کنند، پیوندهای هیدروژنی را در گرانول نشاسته تقویت می‌کند و در نتیجه، از تجزیه گرانول‌های متورم جلوگیری می‌کند و گرانیروی در حضور اسید و تحت شرایط برشی بالا باقی می‌ماند. این نوع نشاسته همچنین در برابر گرما پایدار است و در طول انجماد زدایی، نشاسته سرعت پسروری پایینی دارد اما دمای ژلاتینه شدن آن افزایش می‌یابد. اثرات منفی پیوند عرضی (مانند کاهش شفافیت خمیر و پایداری در دماهای سرد) نیز با اصلاحاتی مانند استری شدن یا اتری شدن بهبود می‌یابد [۸].

فسفات دو نشاسته‌ای استیله (E414) یکی از انواع نشاسته اصلاح شده با روش اصلاح دو گانه است. اصلاح منفرد نشاسته، مانند ایجاد اتصالات عرضی، می‌تواند برخی از اثرات منفی را نیز در نشاسته ایجاد کند (مانند کاهش قدرت ژل‌کنندگی، تمایل بالا به پسروری). بنابراین، اصلاح دوگانه نشاسته مطرح شده است [۹]. این ترکیب با ایجاد پیوندهای عرضی و جایگزینی گروه‌های هیدروکسیل با گروه‌های فسفات و استیل، ساختار نشاسته را پایدارتر کرده و آن را برای کاربرد در محصولات غذایی با شرایط فرآیندی سخت مناسب می‌سازد [۲].

فسفات دوشناسته‌ای استیله، یک نشاسته اصلاح شده است که ابتدا نشاسته با ترکیبات فسفات (مانند تری سدیم متافسفات) واکنش می‌دهد تا اتصالات عرضی در آن ایجاد

نشاسته به‌عنوان منبع اصلی کربوهیدرات در بسیاری از گیاهان عالی و دومین بیوپلیمر طبیعی فراوان پس از سلولز، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع غذایی و صنعتی دارد. با این حال، استفاده از نشاسته طبیعی در سطح صنعتی با محدودیت‌هایی از قبیل مقاومت کم در برابر تنش‌های برشی، تجزیه حرارتی در حین فرآوری، و تمایل زیاد به آب‌اندازی و پسروری مواجه است [۱]. برای رفع این محدودیت‌ها، روش‌های مختلفی برای اصلاح نشاسته به‌کار گرفته شده‌اند که به‌طور کلی به سه دسته اصلاح شیمیایی، فیزیکی و آنزیمی تقسیم می‌شوند. اصلاح شیمیایی نشاسته از طریق افزودن گروه‌های عاملی مانند فسفات و استیل به ساختار مولکولی آن انجام می‌شود. این اصلاحات می‌توانند خواصی نظیر حلالیت، پایداری حرارتی، گرانیروی، و مقاومت در برابر برش را بهبود بخشند [۲].

نشاسته استیله بوسیله استری کردن نشاسته طبیعی با استیک انیدرید در حضور یک کاتالیزور قلیایی ایجاد می‌شود. در این نوع نشاسته ۳ گروه هیدروکسیل در کربن‌های شماره ۲، ۳ و ۶ با گروه استیل جایگزین می‌شوند. میزان گروه‌های استیل مجاز در این نوع نشاسته حداکثر ۲/۵ درصد می‌باشد که درجه جایگزینی (DS) حدود ۰/۱ درصد را نتیجه می‌دهد [۳]. استیلاسیون نشاسته‌ها با هدف بهبود ویژگی غلیظ‌کنندگی نشاسته، بهبود پایداری و مقاومت در برابر رترورگراسیون، بهبود پایداری در برابر انجماد-رفع انجماد، بهبود شفافیت، قدرت ژله‌کنندگی و انحلال پذیری گرانول‌های نشاسته انجام می‌شود [۴]. ویژگی‌های نشاسته استیله به منبع گیاهی نشاسته، درجه جایگزینی، نسبت آمیلوز به آمیلوپکتین و نحوه اصلاح مولکول‌های نشاسته وابسته است. در واکنش استیلاسیون، تعداد گروه‌های استیل ایجاد شده در مولکول نشاسته و کارایی واکنش به نوع و غلظت واکنشگر (استیک انیدرید، وینیل استات)، pH، حضور کاتالیزور، زمان

آب و گرانیوی اوج را افزایش و دمای خمیری شدن را کاهش داد [۱۲]. حیدریان و همکاران (۱۴۰۴) مشاهده کردند که فسفریلاسیون نشاسته سبب ایجاد مقاومت نشاسته در برابر دماهای بالا و نیروی برشی شد و پیشنهاد کردند که این نشاسته می‌تواند دمای بالا و تنش برشی را حین پاستوریزاسیون و هموژنیزاسیون تحمل کند و بنابراین برای کاربرد در سس مناسب است [۱۳]. اصلاح نشاسته با فسفات‌ها، به ویژه از طریق اصلاح دوگانه، خواص فیزیکوشیمیایی مانند درجه جایگزینی و محتوای فسفات را افزایش می‌دهد و در نتیجه باعث بهبود محتوای آب و ویژگی‌های عملکردی مناسب برای کاربردهای غذایی کاربرد می‌شود [۱۴]. اصلاح نشاسته با فسفات‌ها به طور قابل توجهی بر خواص خمیری شدن و تورم تأثیر می‌گذارد. محتوای فسفر بالاتر منجر به کاهش گرانیوی خمیر و تغییر مورفولوژی گرانول می‌شود [۱۵].

تحقیقات در دسترس در زمینه تولید فسفات دو نشاسته‌ای استیله محدود است. بهینه‌سازی تولید این محصول، مخصوصاً از نظر نوع و میزان عامل ایجاد کننده اتصالات عرضی و استیلاسیون، می‌تواند منجر به ویژگی‌ها و کاربردهای خاصی شود. بنابراین، هدف از این مطالعه، بهینه‌سازی تولید فسفات دو نشاسته‌ای استیله (E1414) در بازه گسترده‌ای از عامل ایجاد کننده اتصالات عرضی (۱-۱۰٪) و استیلاسیون (۱-۱۰٪)، بود تا محصولات متفاوتی ایجاد کند. سپس نشاسته‌های اصلاح شده دوگانه از نظر خواص فیزیکوشیمیایی با یکدیگر مقایسه شدند تا ظرفیت نشاسته‌های منتخب برای کاربرد در مواد غذایی مشخص شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

استیک انیدرید (با خلوص ۹۸٪) از شرکت پارس شیمی تهیه شد. هیدروکسید سدیم، هیدروکسید پتاسیم، اسید هیدروکلریک، سولفات سدیم، فنول فتالین و اتانول از

شود که قابلیت تورم آن محدود شده است؛ این نشاسته با کد E 1412 شناخته می‌شود. از واکنش استیلاسیون نشاسته با انیدرید استیک، نشاسته‌ای تولید می‌شود که قابلیت تورم نشاسته به میزان بسیار کمتری تحت تأثیر قرار می‌گیرد؛ این نشاسته با کد E 1420 شناخته می‌شود. ترکیب هر دو این روش‌ها برای اصلاح نشاسته سبب می‌شود تا محصول بدست آمده ویژگی‌های حد متوسط از دو نوع قبل را نشان دهد. این نشاسته با کد E 1414 شناخته می‌شود [۱۰]. فسفات دو نشاسته استیله به طور گسترده در تولید مواد غذایی مانند سس سالاد، غذاهای کنسرو شده و پودینگ استفاده می‌شود. میزان فسفر باقی مانده مجاز در این نوع نشاسته، ۰/۱۴ درصد برای نشاسته‌های گندم و سیب زمینی و ۰/۰۴ درصد برای سایر منابع و میزان گروه استیل مجاز آن تا ۲/۵ درصد می‌باشد. در این نشاسته اصلاح شده، با افزایش سطح اتصالات عرضی، گرانیوی کاهش پیدا می‌کند [۱۱].

در زمینه تولید و ارزیابی ویژگی‌های فسفات دو نشاسته‌ای استیله، تحقیقاتی صورت گرفته است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. لیو و همکاران (۲۰۲۲) بررسی کردند که چگونه فسفوریل‌اسیون و استیلاسیون بر خواص نشاسته شاه بلوط تأثیر می‌گذارند و بر نقش اصلاحات شیمیایی در بهبود ویژگی‌های نشاسته تأکید کردند. فسفوریل‌اسیون موجب افزایش حلالیت، ظرفیت تورم و شفافیت خمیر، و کاهش پسروی و پایداری انجماد-ذوب شد. مشخص شده است که ترکیب گروه‌های فسفات، هیدراتاسیون را افزایش داده و خواص خمیر را بهبود می‌بخشد و تأثیر درجه جایگزینی (DS) را بر این اثرات برجسته می‌کند. استیلاسیون به عنوان اصلاحی شناخته می‌شود که شفافیت خمیر را بهبود می‌بخشد و تشکیل ساختارهای منظم را کاهش می‌دهد و در نتیجه خمیر روان‌تری ایجاد می‌کند. این مطالعه نشان داد که اثرات این اصلاحات بر اساس منبع نشاسته و شرایط واکنش متفاوت است و نتایج متفاوتی را در انواع نشاسته نشان می‌دهد [۲]. بی آر و کری (۲۰۱۴) مشاهده کردند که فسفات‌ها کردن نشاسته *S. lycocarpum* به طور قابل توجهی جذب

شرکت دکتر مجللی خریداری شدند. STMP و STPP از شرکت مرک خریداری شدند. نشاسته سیب‌زمینی از شرکت طلاچین خریداری شد.

۲-۲-۲- بهینه‌سازی تولید فسفات دو نشاسته ای استیل (E1414)

برای تولید نشاسته E1414، فرآیند دو مرحله‌ای انجام شد. ابتدا مرحله ایجاد اتصالات عرضی با STMP انجام شد و سپس استیلاسیون با استفاده از استیک انیدرید صورت پذیرفت. از طرح آماری بر پایه RSM و با دو متغیر (۱) عامل ایجاد کننده اتصالات عرضی (۱-۱۰٪) و (۲) درصد استیک انیدرید (۱-۱۰٪) برای تولید این نوع نشاسته استفاده شد (جدول ۱).

۲-۲-۱- مرحله اول: ایجاد اتصالات عرضی در نشاسته

ایجاد اتصالات عرضی در نشاسته سیب‌زمینی مطابق با روش شی و همکاران (۲۰۱۳) صورت پذیرفت. ابتدا میزان ۱۰۰ گرم نشاسته سیب‌زمینی در یک بشر ریخته شد و عامل ایجاد کننده اتصالات عرضی [STMP (99%)/STPP (1%)] نیز به میزان ۱ تا ۱۰٪ به آن اضافه شد. سپس ۱۴۰ میلی‌لیتر آب مقطر به آن افزوده شد و پس از تنظیم pH برابر با ۱۱ با استفاده از ۰/۱ نرمال، به مدت ۳ ساعت در دمای ۴۵ درجه سانتیگراد، روی همزن مغناطیسی، همزده شد. برای اینکه در محلول‌های حاوی STMP اتصالات عرضی ایجاد شود، نیاز است تا pH بالای ۹ باشد و به همین خاطر pH ۱۱ انتخاب شد. با توجه به تغییر pH طی مدت همزدن، مجدداً تنظیم pH انجام پذیرفت. سپس با استفاده از ۰/۱ HCl نرمال، خنثی‌سازی تا pH ۶ صورت گرفت. ۴ مرتبه شستشو با آب مقطر صورت گرفت و سپس به مدت ۲۴ ساعت در خشک کن با دمای ۴۰ درجه سانتیگراد، خشک شد [۱۶].

۲-۲-۲- مرحله دوم: استیلاسیون نشاسته

استیل کردن نشاسته طبق روش سینگ سودی و سینگ (۲۰۰۵) انجام شد. ابتدا ۱۰۰ گرم از نشاسته خام سیب‌زمینی در ۲۲۵ میلی‌لیتر آب ریخته و به مدت یک ساعت همزده شد. سپس pH توسط محلول سود ۳ درصد به ۸ رسانده شد و استیک انیدرید به صورت قطره قطره و به آرامی به سوسپانسیون در حال همزده شدن اضافه گردید و همزمان pH روی ۸ تا ۸/۵ ثابت نگه داشته شد. پس از اتمام واکنشگر مصرفی، همزدن به مدت ۶۰ دقیقه دیگر ادامه یافت. سپس pH توسط اسید کلریدریک ۰/۵ مولار روی ۴/۵ تنظیم شد و سه مرتبه با آب مقطر شستشو شد. در نهایت، نشاسته حاصل در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد خشک شد. ابتدا بهینه‌سازی استیلاسیون نشاسته با میزان استیک انیدرید ۲/۵ تا ۱۵٪ وزنی/وزنی صورت گرفت تا بازه مناسب استیلاسیون برای کاربرد در مواد غذایی مشخص شود. برای تولید E1414، نشاسته‌ای که در مرحله قبلی اتصالات عرضی روی آن ایجاد شده بود، برای استیلاسیون مطابق جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفت [۴].

۳-۲- تعیین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و حرارتی نشاسته

۳-۲-۱- تعیین درجه استیل شدن و درجه جانشینی

۱ گرم از نمونه‌های نشاسته به ارلن ۲۵۰ میلی‌لیتری افزوده شد و ۵۰ میلی‌لیتر اتانول ۷۵ درصد به آن اضافه شد. ارلن محتوی نمونه به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب ۵۰ درجه سلسیوس قرار داده و سپس سرد شد. ۴۰ میلی‌لیتر از ۰/۵ KOH مولار به ارلن افزوده شد و به مدت نیم ساعت همزدن انجام شد. سپس تیتراسیون بوسیله ۰/۵ HCl مولار در حضور معرف فنل فتالین انجام شد. آزمون برای نمونه شاهد (نمونه خام استیل نشده) نیز مطابق روش مذکور انجام شد و درصد استیل و درجه جانشینی (DS) مطابق فرمول‌های ۱ و ۲ محاسبه شد [۱۷].

$$\text{Acetyl (\%)} = \frac{\text{Blank (ml)} \times \text{Sample(ml)} \times \text{Molarity of HCl} \times 0.043 \times 100}{\text{sample weight (gr)}} \quad (1)$$

$$DS = \frac{162 \times 162 \times \text{Acetyl (\%)}}{4300 - (42 \times 162 \times \text{Acetyl (\%)})} \quad (2)$$

[۱۷]. باتوجه به محدودیت استفاده از جداول، تنها آب‌اندازی در روز پنجم گزارش شده است.

۲-۳-۴- تعیین شفافیت خمیر (عبور نور)

شفافیت خمیر با استفاده از روش محمود و همکاران (۲۰۰۰) با اندازه‌گیری درصد عبور (T) محلول نشاسته ۱٪ (w/w) (pH 6.5) در ۶۵۰ نانومتر پس از جوشاندن در حمام آب به مدت ۳۰ دقیقه تعیین شد [۱۹].

۲-۳-۵- بررسی ویژگی‌های خمیری شدن نشاسته با استفاده از آنالیزگر سریع گرانروی (RAV)

جهت بررسی رفتار خمیری شدن نشاسته‌های منتخب به عنوان تابعی از دما، از دستگاه آنالیزگر سریع گرانروی (Rapid Viso Analyser-RVA, Petern, Australia) و مطابق روش ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) استفاده شد. ابتدا ۳ گرم از هر نمونه نشاسته در ۲۵ گرم آب مقطر (با غلظت ۱۰/۷٪ وزنی/وزنی ماده جامد) در یک قوطی آلومینیومی معلق شد. پروفایل دمای استاندارد شامل تعادل در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد، گرم کردن تا ۹۵ درجه سانتیگراد، یک مرحله نگهداری، خنک کردن تا ۵۰ درجه سانتیگراد و یک دوره تثبیت بود. شاخص‌های کلیدی خمیری شدن شامل گرانروی اوج^۱ (حداکثر گرانروی در حین گرم کردن)، گرانروی نهایی^۲ (گرانروی پس از خنک شدن)، فروپاشی^۳ (گرانروی اوج منهای گرانروی حداقل، نشان‌دهنده پایداری حرارتی) و بازگشت قوام^۴ (گرانروی نهایی گرانروی حداقل، نشان‌دهنده تمایل به پسروی) بر حسب سانتی‌پواز

۲-۳-۲- تعیین میزان حلالیت و قدرت تورم

سوسپانسیون ۲ درصد نشاسته‌ها آماده شده و در حمام آب گرم در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه همراه با همزدن، حرارت‌دهی شدند. پس از سرد شدن نمونه‌ها تا دمای ۲۵ درجه سانتیگراد، به مدت ۱۵ دقیقه در دور ۲۵۰۰ سانتی‌رفیوژ شدند. ماده خشک محلول رویی و ژل حاصل با خشکاندن آن‌ها در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد حاصل شد تا حلالیت و قدرت تورم نشاسته با استفاده از روابط زیر حاصل شود [۱۸].

$$WSI = \frac{W1}{0.1} * \quad (3)$$

$$SP = \frac{Ws}{0.1 (100\% - WSI)} \quad (4)$$

که در اینجا WSI: شاخص انحلال در آب، W1: وزن مایع رویی خشک شده و Ws: وزن رسوب می باشد.

۲-۳-۳- آب‌اندازی

سوسپانسیون ۵٪ نمونه‌های نشاسته تهیه شده در حمام آب ۹۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شد و به سرعت در حمام یخ، تا دمای محیط سرد شد. نمونه تهیه شده در زمان‌های ۱، ۳ و ۵ روز در ۳۰۰۰ g به مدت ۱۵ دقیقه سانتی‌رفیوژ شدند و میزان آب‌اندازی مشخص شد

3 - Breakdown

4 - Setback

1 - Peak viscosity

2 - Final viscosity

(%) برای استیلاسیون نشاسته سیب زمینی استفاده شد و درصد گروه‌های استیل و درجه جایگزینی آن‌ها مشخص شد (نتایج آن ذکر نشده است). با افزایش غلظت استیک انیدرید از ۲/۵ به ۱۲/۵ درصد، درصد گروه‌های استیل جایگزین شده بر روی نشاسته نیز به طور معنی‌داری (از ۰/۳۸ تا ۲/۵۸ درصد) افزایش یافت؛ اگرچه تفاوت معنی‌داری بین نمونه استیله شده با ۱۲/۵ و ۱۵ درصد استیک انیدرید وجود نداشت. از آنجایی که درصد گروه‌های استیل مجاز در نشاسته‌های استیله غذایی، حداکثر ۲/۵ درصد می‌باشد [۴] و از طرف دیگر، میزان استیک انیدرید مصرفی در قیمت نهایی محصول اثر بسزایی دارد، بنابراین غلظت بیشینه ۱۰ درصد استیک انیدرید (با درصد گروه‌های استیل ۲/۰۹ درصد و درجه جایگزینی ۰/۰۸۱) و غلظت کمینه ۱٪ آن برای بهینه‌سازی تولید نشاسته E1414، انتخاب شد.

۲-۳- بهینه‌سازی تولید فسفات دو نشاسته‌ای استیله (E1414)

ابتدا مرحله ایجاد اتصالات عرضی با STMP انجام شد و سپس استیلاسیون با استفاده از استیک انیدرید صورت پذیرفت. از طرح آماری بر پایه RSM و با دو عامل ایجاد کننده اتصالات عرضی STMP (۱۰-۱٪) و درصد استیک انیدرید (۱۰-۱٪) برای تولید این نوع نشاسته استفاده شد. مقادیر درصد گروه‌های استیل و برخی از شاخص‌های فیزیکوشیمیایی نشاسته‌های E1414 از قبیل میزان آب‌اندازی، ظرفیت نگه‌داری آب، قدرت تورم، میزان شفافیت و خواص حرارتی نمونه‌ها تحت شرایط مختلف آزمون در جدول ۱ مشاهده می‌گردد.

(p) ثبت شدند. هر شاخص سه بار تکرار شد تا از تکرارپذیری آزمون، اطمینان حاصل شود [۲۰].

۴-۲- تجزیه و تحلیل آماری

آنالیز داده‌های مربوط به تولید نشاسته استیله (E1414) با طرح یک فاکتور در یک زمان (One Factor at a Time) انجام شد. جهت مقایسه میانگین‌ها از آنالیز واریانس (ANOVA) و آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده شد. جهت بهینه‌سازی تولید فسفات دو نشاسته‌ای استیله (E1414) از روش سطح پاسخ (RSM) در قالب طرح مرکب مرکزی (CCD) و تجزیه واریانس (ANOVA) و نرم افزار آماری Design Expert 7 استفاده شد. نقطه مرکزی در سه تکرار انجام شد تا خطای خالص ممکن را تخمین بزنند. برای هر فاکتور، یک دامنه آزمایشی براساس نتایج آزمون‌های اولیه انتخاب شد. بعد از بهینه‌سازی، آزمون‌های تاییدی^۵ در شرایط بهینه انجام شدند و میانگین داده‌های آزمون‌ها با مقادیر پیش بینی شده معادله مدل مقایسه شدند. نتایج این آزمون‌ها، حاصل میانگین مقادیر آزمون‌ها در حداقل دو تکرار می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بهینه‌سازی تولید نشاسته استیله (E1420)

استیلاسیون یکی از عمومی‌ترین روش‌های پایدارسازی نشاسته است. نشاسته استیله بر اساس درجه جایگزینی به دو گروه نشاسته استیله با درجه جایگزینی پایین و درجه جایگزینی بالا تقسیم می‌شود. نشاسته استیله با درجه جایگزینی پایین (کمتر از ۰/۱) و درصد گروه‌های استیل کمتر از ۲/۵ درصد، عموماً در صنایع غذایی کاربرد دارد زیرا در ایجاد قوام، بافت و پایداری نقش دارد [۳]. در این پژوهش ابتدا از غلظت‌های مختلف استیک انیدرید (۲/۵-۱۵

Table 1. Effect of acetic anhydride and STMP concentration on the different responses of in E1414

No.	B:Acetic anhydride Con. (%)	A:Cross-linking agent (%)	Acetyl group (%)	DS (%)	Swelling Power (%)	Synerisis (day 5) (%)	T (%)
1	1	1	0.32	0.012	28.19	14.64	41.59
2	1	10	0.32	0.012	24.55	3.67	37.10
3	10	1	2.04	0.078	38.76	0	61.05
4	10	10	1.83	0.070	36.99	1.51	49.98
5	5.5	1	0.75	0.028	35.46	13.77	40.73
6	5.5	10	0.75	0.028	27.72	2.86	44.08
7	1	5.5	0.32	0.012	35.45	9.00	39.40
8	10	5.5	1.82	0.070	41.85	3.70	48.08
9	5.5	5.5	0.97	0.037	33.09	12.80	42.40
10	5.5	5.5	0.75	0.028	37.77	10.52	45.51
11	5.5	5.5	0.75	0.028	37.28	11.00	43.90

ضریب تبیین نزدیک است که بیانگر وجود همبستگی بالا بین مقادیر آزمون و مقادیر پیش‌بینی شده است. آزمون عدم برازش (Lack-of-fit) بیانگر عدم موفقیت مدل جهت نشان دادن داده‌ها در نقاطی که در دامنه مدل رگرسیونی وجود ندارند، می‌باشد. مطابق جدول ۲، عدم برازش معنی‌دار نبود. بنابراین همه نتایج حاکی از این بودند که مدل رگرسیونی درجه دو تحت شرایط مختلف عامل ایجاد اتصالات عرضی و غلظت استیک انیدرید، به خوبی درصد گروه‌های استیل نشاسته‌ها را پیش‌بینی می‌کند.

نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) چند مدل رگرسیونی برای درصد گروه‌های استیل و درجه جایگزینی فسفات دو نشاسته‌ای استیل حاکی از آن بود که مدل درجه دو برای درصد گروه‌های استیل نشاسته‌ها معنی‌دار بود و ضریب تبیین (R^2) محاسبه شده برای آن ۰/۹۸۸ بود که بیانگر آن است که ۹۸/۸٪ تغییر در پاسخ‌ها توسط مدل برازش شده قابل تبیین است. همچنین ضریب تبیین اصلاحی ($R^2_{adj} = 0.976$) به

Table 2. Examination of the coefficients of the quadratic model for evaluating the percentage of starch acetyl groups (%) in E1414

Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F	
Model	4.019345	5	0.803869	82.94979	< 0.0001	significant
A-crosslink	0.007704	1	0.007704	0.794979	0.4134	
B-ac	3.728817	1	3.728817	384.7699	< 0.0001	
AB	0.011556	1	0.011556	1.192469	0.3246	
A ²	8.11E-05	1	8.11E-05	0.008368	0.9307	
B ²	0.254319	1	0.254319	26.24268	0.0037	
Residual	0.048455	5	0.009691			
Lack of Fit	0.017638	3	0.005879	0.381579	0.7804	not significant
Pure Error	0.030817	2	0.015408			
Total	4.0678	10				

معنی‌داری با یکدیگر داشتند [۱۷]. سینگ سودی و همکاران (۲۰۰۵) درصد استیلاسیون نشاسته‌های برنج را در محدوده ۲/۲۶ تا ۳/۶۸ گزارش کردند و علت این مقادیر بالاتر درصد گروه‌های استیل را به میزان آمیلوز کمتر نشاسته برنج نسبت دادند. درصد گروه استیل در گرانول‌های بزرگتر بیشتر از گرانول‌های کوچک است [۴].

۳-۳- قدرت تورم

نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) چند مدل رگرسیونی برای قدرت تورم نمونه‌های فسفات دو نشاسته‌ای استیله انجام شد و نتایج حاکی از آن بود که مدل درجه دو برای ظرفیت جذب آب نشاسته‌ها معنی‌دار بود و ضریب تبیین (R^2) محاسبه شده برای آن ۰/۸۸۴ بود که بیانگر وجود همبستگی بالا بین مقادیر آزمون و مقادیر پیش بینی شده است.

آنالیز رگرسیون چندگانه (مدل درجه دوم) بر روی داده‌های آزمون انجام شد و معادله (۷) برای پاسخ‌های پیش بینی شده قدرت تورم نشاسته‌ها به صورت اعداد واقعی بدست آمد:

$$\text{Swelling Power (\%)} = 27.85 + 2.39 A + 0.14 B + 0.023 AB - 0.274 A^2 + 0.074 B^2 \quad (7)$$

در این رابطه A و B به ترتیب میزان عامل ایجاد اتصالات عرضی (STMP) و غلظت استیک انیدرید می باشند.

همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، تنها اثر خطی متغیر B و مربع اثر عامل A معنی‌دار بود که به این معنی است که غلظت استیک انیدرید و مربع غلظت عامل ایجاد کننده اتصالات عرضی بر قدرت تورم نشاسته‌ها موثر بوده است ($p < 0.05$). در واقع، غلظت پایین STMP اثری بر قدرت تورم نشاسته‌ها نداشته است اما در غلظت‌های بالاتر عامل ایجاد کننده اتصالات عرضی (STMP)، قدرت تورم کاهش یافته است.

آنالیز رگرسیون مدل درجه دوم بر روی داده‌های آزمون انجام شد و معادله (۶) برای پاسخ‌های پیش بینی شده درصد گروه‌های استیل نشاسته‌ها به صورت اعداد واقعی بدست آمد:

$$\text{Acetyl group (\%)} = 0.26 + 0.010 A + 0.018 B - 0.003 AB - 0.0003 A^2 + 0.0156 B^2 \quad (6)$$

در این رابطه A و B به ترتیب میزان عامل ایجاد اتصالات عرضی (STMP) و غلظت استیک انیدرید می‌باشند.

همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، تنها اثر خطی متغیر B و مربع آن معنی‌دار بود که به این معنی است که تنها غلظت استیک انیدرید بر درصد گروه‌های استیل نشاسته‌ها موثر بوده است ($p < 0.05$) و این شاخص تحت تاثیر غلظت عامل ایجاد کننده اتصالات عرضی (STMP) قرار نگرفته است.

خجسته نیا و همکاران (۱۳۹۹)، میزان استیل نشاسته‌های بلوط و گندم استیله شده با ۶ درصد استیک انیدرید را به ترتیب ۱/۰۴ و ۱/۸۴ درصد ذکر کردند. درجه جانشینی این دو نشاسته نیز به ترتیب ۰/۰۳۹ و ۰/۰۹۹ درصد بود. آن‌ها بیان کردند که نحوه قرارگیری آمیلوز و آمیلوپکتین داخل گرانول، اندازه گرانول کوچکتر بلوط و حتی سرعت افزودن واکنشگر، یکنواختی در همزدن و زمان واکنش از عواملی هستند که بر میزان استیله شدن نشاسته‌ها تاثیر می‌گذارد [۲۱]. عقیلی دهنوی و همکاران (۱۳۹۶) درصد استیلاسیون نشاسته نخود استیله شده با ۶ و ۸ درصد استیک انیدرید را به ترتیب ۱/۷۹ و ۱/۹۸ درصد و درجه نشینی آن‌ها را ۰/۰۶۹ و ۰/۰۷۶ درصد ذکر کردند که تفاوت معنی‌داری با همدیگر نداشتند [۲۲]. اگرچه میرمقتدایی و همکاران (۲۰۰۹) نتیجه متفاوتی را برای استیلاسیون نشاسته جو دوسر استیله شده با ۶ و ۸ درصد استیک انیدرید بدست آوردند به نحوی که درصد استیل این نشاسته در دو غلظت مذکور به ترتیب ۱/۵۴ و ۲/۹۲ درصد گزارش شد که تفاوت

Table 3. Examination of the coefficients of the quadratic model for evaluating the swelling power of E1414 starches

Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F	
Model	251.68	5	50.34	7.6	0.022	significant
A-crosslink	28.79	1	28.79	4.35	0.0915	
B-ac	144.16	1	144.16	21.77	0.0055	
AB	0.88	1	0.88	0.13	0.7305	
A ²	77.85	1	77.85	11.76	0.0187	
B ²	5.8	1	5.8	0.88	0.3922	
Residual	33.11	5	6.62			
Lack of Fit	19.86	3	6.62	1	0.5354	not significant
Pure Error	13.25	2	6.62			
Cor Total	284.79	10				

(ابی کلروهیدرین) می‌شوند. افزایش غلظت POCL3 نیز کاهش فاکتور تورم نشاسته‌ها را به دنبال دارد که علت آن تشکیل پوسته بیرونی سخت است که تورم را محدود می‌کند [۶]. بنابراین خمیر نشاسته تولید شده با سطح مناسبی از عامل ایجاد کننده اتصالات عرضی، گرانتورتر از نوع خام است. این نوع نشاسته در برابر تخریب در زمان طولانی پخت، غلظت بالای اسید و همزدن شدید پایدار خواهد بود. کاربرد گروه‌های استیل در نشاسته می‌تواند دسترسی آب به مناطق آمورف را تسهیل کند، که دلیل آن به هم‌ریختگی ساختاری درون گرانولی ناشی از اثرات فضایی و اختلال در پیوندهای هیدروژنی در گرانول‌های نشاسته است [۱۷].

عقیلی دهنوی و همکاران (۱۳۹۶) مشاهده کردند که با استیلاسیون نشاسته نخود در سطح ۶ و ۸ درصد، قدرت تورم تفاوتی با نمونه شاهد نداشت اما با ایجاد اتصالات عرضی با فسفوریل کلرید (در دو سطح ۰/۵ و ۰/۱۰ درصد)، قدرت تورم نسبت به نمونه شاهد به شدت کاهش یافت اگرچه تفاوتی بین دو نشاسته حاوی اتصالات عرضی وجود نداشت [۲۲]. کو و همکاران (۲۰۱۰) بیان کردند که اگرچه فاکتور تورم همبستگی زیادی با درجه اتصالات عرضی داشت، الگوهای پراش اشعه ایکس هیچ تغییر قابل توجهی در بلورینگی نشاسته ذرت را نشان نداد. با اندازه‌گیری SEM نشان داده شد که یک ناحیه سیاه روی سطح دانه‌های نشاسته

ملک پور و همکاران (۱۳۹۵) مشاهده کردند که استیله کردن در سطح ۶ درصد موجب افزایش قدرت تورم گرانول‌های نشاسته (از ۱۴/۲۱ به ۱۹/۳۵ درصد) و کاهش سینرسیس نشاسته جو (از ۶۵/۱۰ به ۴۵/۸۱ درصد) (پس از ۲۴ ساعت نگهداری در دمای ۴ درجه سانتیگراد) می‌گردد. افزایش قدرت تورم به علت وارد شدن گروه‌های حجیم و آبدوست استیل به مولکول نشاسته و ایجاد ممانعت فضایی و دافعه بین مولکول‌های نشاسته است که در نهایت موجب تسهیل نفوذ آب به قسمت آمورف نشاسته می‌شود [۲۳].

خجسته نیا و همکاران (۱۳۹۹) بیان کردند که ایجاد اتصالات عرضی موجب کاهش و استیلاسیون نشاسته گندم و بلوط موجب افزایش قدرت تورم آن‌ها می‌شود [۲۱] که مشابه نتایج میرمقتدایی و همکاران (۲۰۰۹) در مورد نشاسته یولاف بود [۱۷]. به نظر می‌رسد که افزایش غلظت عامل ایجاد کننده اتصالات عرضی نیز می‌تواند موجب ایجاد پیوندهای محکم بین زنجیره‌های نشاسته در گرانول شود و موجب سختی سطح نشاسته و محدودیت در جذب آب و تورم گرانول شود [۲۴]. سینگ و همکاران (۲۰۱۶) بیان کردند که غلظت‌های بالاتر عوامل ایجاد کننده اتصالات عرضی سریع از قبیل فسفوریل کلرید، موجب کاهش بیشتر ظرفیت تورم در مقایسه با عامل ایجاد کننده اتصالات عرضی گند از قبیل EPI

خمیر نشاسته است که منجر به خروج آب به دام افتاده می‌شود. آب‌اندازی نشاسته به معنی پتانسیل و تمایل ژل نشاسته به پسروری است و به نوعی مقاومت ژل نشاسته را نشان می‌دهد [۲۰]. میزان آب‌اندازی نمونه‌ها تحت شرایط مختلف آزمون (غلظت‌های مختلف عامل ایجاد اتصالات عرضی و استیک انیدرید) طی روزهای اول تا پنجم اندازه‌گیری شد و برای روز پنجم به صورت تجمعی بیان شده است (جدول ۴). نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) حاکی از آن بود که مدل درجه دوم برای تعیین آب‌اندازی نشاسته‌ها در روز پنجم معنی‌دار بود. عدم برازش نیز برای این مدل‌ها معنی‌دار نبود.

آنالیز مدل درجه دوم برای آب‌اندازی نشاسته‌ها در روز پنجم انجام شد و معادله آب‌اندازی در روز پنجم برای پاسخ‌های پیش‌بینی شده به صورت اعداد واقعی ذکر شده است:

$$\text{Syneresis (day 5) (\%)} = 14.84 - 0.40 A + 0.60 B + 0.15 AB - 0.11 A^2 - 0.21 B^2 \quad (8)$$

در این رابطه A و B به ترتیب میزان عامل ایجاد اتصالات عرضی (STMP) و غلظت استیک انیدرید می‌باشند.

با اتصالات عرضی مشاهده شد که در مورد نشاسته خام وجود نداشت [۲۵].

پانگ و همکاران (۲۰۱۹) دریافتند که نشاسته خام نسبت به نوع اصلاح شده E1414 نسبت به pH بسیار وابسته بود و در pH اسیدی ۳، کمترین قدرت تورم را داشت. همچنین تایید کردند که ایجاد اتصالات عرضی موجب پایداری و استحکام گرانول‌های نشاسته می‌شود که تمایل کمتری به شکستن تحت شرایط شدید حرارتی و اسیدی دارد. در میان نشاسته‌های اصلاح شده، نشاسته با اتصالات عرضی بیشینه (۸۹/۵ درصد) و گروه استیل بیشینه (۱/۶ تا ۲ درصد)، کمترین قدرت تورم را نشان داد اگرچه بیشترین قدرت تورم مربوط به E1414 متوسط (با ۱/۵ تا ۲ درصد گروه استیل و ۲۸/۸ درصد اتصالات عرضی) بود. علت آن می‌تواند به میزان نسبتاً بالای گروه استیل مرتبط باشد که نسبت به اتصالات عرضی، اثر بیشتری بر قدرت تورم داشته است [۲۶].

۴-۳- آب‌اندازی

آب‌اندازی به علت افزایش اتصالات بین رشته‌ای و برقراری پیوند بین آمیلوز و آمیلوپکتین در نشاسته، در حین نگهداری

Table 4. Examination of the coefficients of the quadratic model for evaluating E1414 syneresis on the 5th day

Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F	
Model	264.03	5	52.81	12.76	0.0071	significant
A-Crosslink	69.18	1	69.18	16.72	0.0095	
B-ac	81.54	1	81.54	19.7	0.0068	
AB	38.89	1	38.89	9.4	0.0279	
A ²	12.41	1	12.41	3	0.1439	
B ²	44.23	1	44.23	10.69	0.0222	
Residual	20.69	5	4.14			
Lack of Fit	17.81	3	5.94	4.12	0.2014	not significant
Pure Error	2.88	2	1.44			
Total	284.73	10				

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، اثرات عامل ایجاد کننده اتصالات عرضی، غلظت استیک انیدرید و اثر متقابل آن‌ها بر میزان آب‌اندازی نمونه‌ها در روز پنجم معنی‌دار بود.

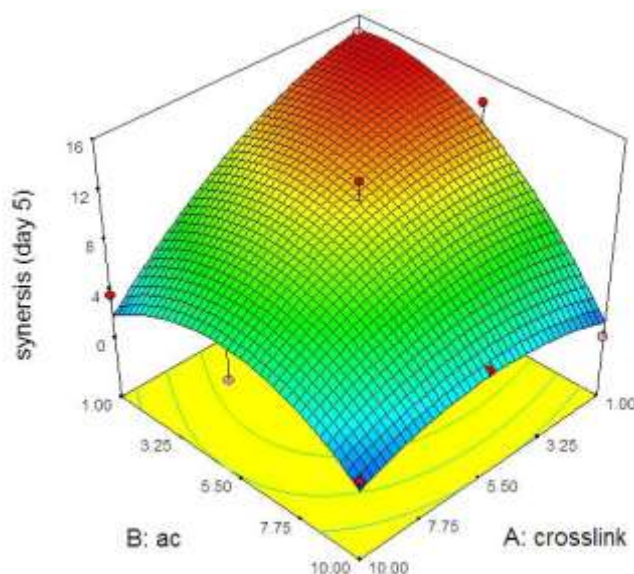


Figure 1. Interaction between acetic anhydride concentration and crosslinking agent on the syneresis of E1414 on the fifth day of storage

کاتور و همکاران (۲۰۰۶) در مورد نشاسته سیب زمینی بود [۲۴]. آن‌ها علت این مسأله را به حضور گروه‌های استیل و در نتیجه افزایش ظرفیت نگهداری آب طی نگهداری ژل‌ها در یخچال نسبت دادند. علت افزایش آب‌اندازی طی زمان نگهداری نیز نشت زنجیره‌های آمیلوز و آمیلوپکتین می‌باشد. آمیلوز طی ساعات آغازین نگهداری و آمیلوپکتین طی مراحل بعدی کریستاله می‌شود و این مسأله می‌تواند علت تفاوت قابل ملاحظه آب‌اندازی در روز اول و سایر روزها در نشاسته سیب زمینی محتوی آمیلوز بالا باشد.

اگرچه بیشتر محققین بیان کردند که عامل اتصالات عرضی باعث افزایش آب‌اندازی می‌شود، اما نتایج این تحقیق نشان داد که کمترین آب‌اندازی در بیشترین غلظت STMP صورت می‌گیرد که احتمالاً علت آن، کاهش جذب آب و تورم نشاسته‌ها در غلظت‌های بالاتر STMP باشد (که مطابق جدول ۳ می‌باشد). زیرا هنگامی که جذب آب و تورم نشاسته کمتر باشد، آب‌اندازی نیز می‌تواند کمتر شود.

مطابق شکل ۱، هر دو عامل غلظت STMP و غلظت استیک انیدرید اثر منفی بر آب‌اندازی نشاسته‌ها داشته‌اند اگرچه اثر غلظت استیک انیدرید در غلظت‌های کمتر عامل ایجادکننده اتصالات عرضی، بیشتر بود؛ یعنی در غلظت ۱ درصد STMP، بیشترین میزان آب‌اندازی در غلظت ۱ درصد استیک انیدرید اتفاق افتاد. میرمقتدایی و همکاران (۲۰۰۹) بیان کردند که علت پدیده آب‌اندازی در ژل‌های نشاسته، افزایش اتصالات مولکولی بین زنجیره‌های نشاسته در دمای پایین است که موجب خروج آب از ساختار ژل می‌شود [۱۷]. عقیلی دهنوی و همکاران (۱۳۹۶) بیان کردند که حضور عوامل ایجادکننده اتصالات عرضی موجب افزایش آب‌اندازی و حضور گروه‌های استیل در مولکول نشاسته نخود موجب کاهش آب‌اندازی آن می‌شود به نحوی که آب‌اندازی نمونه شاهد، نشاسته استیله در سطح ۸ درصد و نشاسته با اتصالات عرضی در سطح ۰/۱ درصد فسفوریل کلرید به ترتیب ۲۷/۵، ۲۶ و ۲۸ درصد بود [۲۲].

سینگ سودی و سینگ (۲۰۰۵) نیز مشاهده کردند که با استیلاسیون نشاسته برنج، میزان سینرسیس به صورت قابل توجهی کاهش یافت [۴] که مشابه نتایج خجسته نیا و همکاران (۱۳۹۹) در مورد نشاسته بلوط و گندم [۲۱] و نتایج

۳-۵- اندازه‌گیری شفافیت خمیر نشاسته‌های بهینه

E1414

شفافیت و پایداری خمیر نشاسته طی نگه‌داری در دمای پایین موثر هستند [۸].

همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، تنها اثر خطی متغیر B معنی‌دار بود که به این معنی است که تنها غلظت استیک انیدرید بر میزان شفافیت نشاسته‌ها موثر بوده است ($p < 0.05$) و این شاخص تحت تاثیر غلظت عامل ایجاد کننده اتصالات عرضی (STMP) قرار نگرفته است.

شفافیت محصول نشاسته می‌تواند در کاربردی کردن محصول بسیار مهم باشد؛ زیرا استفاده از نشاسته اصلاح شده در محصولاتی که شفافیت در آن یک ویژگی مثبت است، با چالش روبرو است. اتصالات عرضی و استیلاسیون بر

Table 5. Examination of the coefficients of the quadratic model for evaluating T (%) in E1414

Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F	
Model	338.67	4	84.67	5.92	0.0280	significant
A-crosslink	24.85	1	24.85	1.74	0.2355	
B-ac	280.44	1	280.44	19.61	0.0044	
AB	10.82	1	10.82	0.76	0.4177	
B ²	22.56	1	22.56	1.58	0.2558	
Residual	85.80	6	14.30			
Lack of Fit	80.96	4	20.24	8.37	0.1096	not significant
Pure Error	4.84	2	2.42			
Total	424.47	10				

حاوی اتصالات عرضی پس از حرارت دادن در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد تقریباً دست نخورده به نظر می‌رسید و در نتیجه شفافیت خمیر کاهش می‌یابد [۲۵]. علاوه بر این، به نظر می‌رسد که کاهش تورم نشاسته‌های حاوی اتصالات عرضی ممکن است تا حدی مسئول کاهش شفافیت خمیر آنها باشد.

۳-۶- بررسی ویژگی‌های حرارتی خمیر

نشاسته‌های E1414

برای آزمون RVA، سه نمونه E1414 انتخاب شد. میزان استیک انیدرید نمونه‌ها ۱۰ درصد انتخاب شد زیرا با افزایش غلظت آن، درجه استیلاسیون، قدرت تورم و شفافیت نمونه‌ها افزایش و میزان آب‌اندازی کاهش یافت. با این حال، سه غلظت STMP کمینه (۱٪)، بیشینه (۱۰٪) و میانگین (۵/۵٪) انتخاب شد زیرا هم در غلظت کمینه و هم بیشینه، میزان آب‌اندازی نمونه‌ها کاهش یافت.

آنالیز رگرسیون چندگانه (مدل درجه دوم) بر روی داده‌های آزمون انجام شد و معادله (۹) برای پاسخ‌های پیش بینی شده میزان شفافیت نشاسته‌ها به صورت اعداد واقعی بدست آمد:

$$T (\%) = 39.29 - 0.0054 A + 0.404 B - 0.081 AB + 0.142 B^2$$

(9)

در این رابطه A و B به ترتیب میزان عامل ایجاد اتصالات عرضی (STMP) و غلظت استیک انیدرید می‌باشند.

کو و همکاران (۲۰۱۰) بیان کردند که ایجاد اتصالات عرضی STMP/STPP (به میزان ۵٪) منجر به کاهش معنی‌دار شفافیت خمیر از ۳۰/۱۵ درصد به ۱/۰۱ درصد شد. با این حال، تفاوت معنی‌داری بین نمونه‌های حاوی اتصالات عرضی وجود نداشت. آن‌ها کاهش قابل توجه در شفافیت خمیر را به تغییر در ساختار گرانولی نشاسته نسبت دادند؛ به این معنا که در مقایسه با نشاسته خام، ساختار نشاسته‌های

نمونه شاهد است. همچنین، مقاومت نمونه‌های اصلاح شده در برابر دما و هم زدن نیز افزایش یافته است. هرچند کاتیون‌های موجود در نشاسته نیز بر این عامل موثر هستند. قبلاً مشخص شده است که زمان طولانی‌تر برای دستیابی به گرانروی اوج می‌تواند به غلظت بالاتر کاتیون‌های دو ظرفیتی، کلسیم و منیزیم، و/ یا محتوای آمیلوز بالاتر در نشاسته مربوط شود [۲۸]. بنابراین با توجه به اینکه گرانروی نهایی نمونه‌های اصلاح شده E1414 و نمونه نشاسته اصلاح نشده تقریباً مشابه می‌باشد اما توانایی تحمل فرآیند دمایی طولانی‌تر و شدیدتری نسبت به نوع اصلاح نشده دارند، در محصولات با فرآیند حرارتی شدیدتر ارجحیت دارند.

در اولین مرحله از آزمایش RVA، جذب آب گرانول‌های نشاسته، تحت تاثیر افزایش دما به سرعت انجام می‌شود. هنگامی که مخلوط گرم می‌شود، گرانول‌های نشاسته آب جذب کرده و متورم می‌شوند و آب جذب شده به ذوب شدن نواحی کریستالی گرانول‌های نشاسته کمک می‌کند. نتیجه این اتفاق نیز حرکت سریع‌تر آب به درون گرانول نشاسته می‌باشد. این امر منجر به افزایش ناگهانی گرانروی مخلوط نشاسته و آب می‌شود. با این حال، در این مرحله، از هم‌گسیختگی گرانول‌ها نیز اتفاق می‌افتد و برآیند دو پدیده تورم و از هم‌گسیختگی گرانول‌های نشاسته، گرانروی اوج را کنترل می‌کند [۲۷].

با توجه به شکل ۲ و جدول ۶ مشخص می‌گردد که زمان و دمای رسیدن به گرانروی اوج نمونه‌های E1414 بیشتر از

Table 6. Comparison of viscosity indices of dual modified starch paste (E1414)

samples	Peak Viscosity	Hold Viscosity	Final Viscosity	Breakdown	Setback
10% Acetyl + 1% C.R	3022	1665	5278	1357	3613
10% Acetyl + 5.5% C.R	2911	1404	4788	1507	3384
10% Acetyl + 10% C.R	3626	1862	4836	1764	2974
CONTROL	6717	2135	4496	4582	2361

C.R= cross-link agent

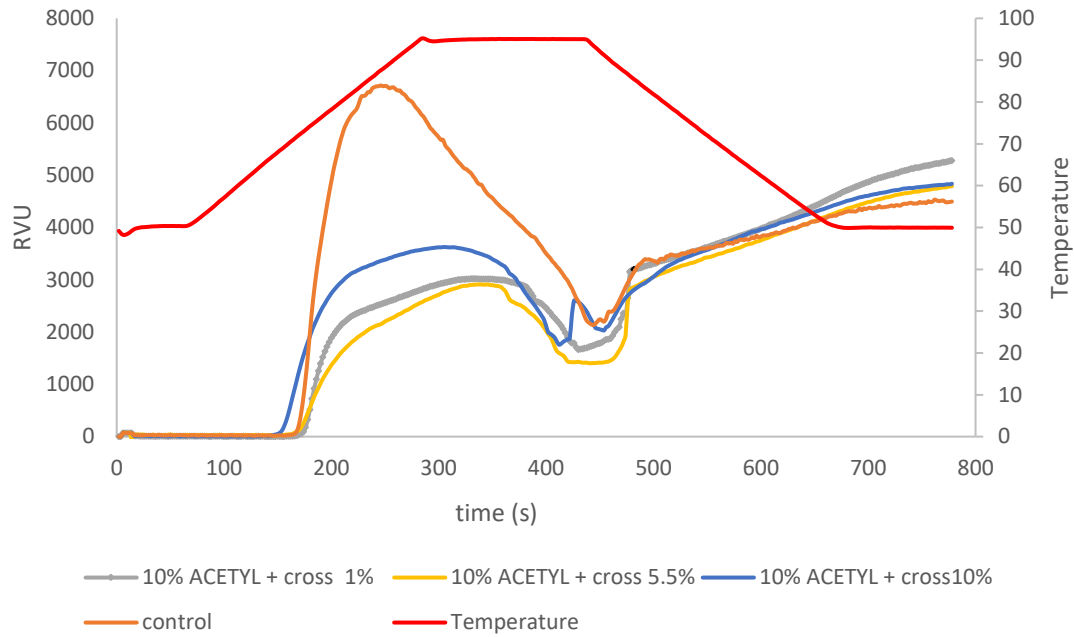


Figure 2. Comparison of viscosity changes of dual modified starch paste (E1414)

خود نشان می‌دهد. لذا همانطور که ذکر شد در این مرحله، برآیند تورم و ازهم گسیختگی ساختاری گرانول‌های نشاسته، گرانروی اوج را کنترل می‌کند. لذا با استفاده از ۱۰٪ عامل اتصال عرضی، تعادل پدیده‌های درگیر در این مرحله به گونه‌ای رقم می‌خورد که با حفظ ساختار گرانول به همراه تورم گرانول‌ها، گرانروی اوج بالاتری نسبت به سایر نمونه‌های نشاسته E1414 حاصل می‌گردد.

در مورد ۱ و ۵/۵ درصد عامل اتصالات عرضی، تفاوت محسوسی در گرانروی اوج دیده نمی‌شود. اگرچه عامل استیل منجر به کاهش استحکام گرانول می‌شود، تورم را زیاد می‌کند و گرانروی را افزایش می‌دهد. پریو گارسیا و همکاران (۲۰۱۲) نیز نشان دادند که استیله کردن نشاسته جو با استیک انیدرید و وینیل استات منجر به تغییر اندازه مولکول از ۱۹ میکرومتر در نشاسته طبیعی به ۲۲ و ۱۰۴ میکرومتر به ترتیب در نشاسته استیله شده با وینیل استات و استیک انیدرید شده است [۳۰]. ایجاد اتصالات عرضی، استحکام گرانول را افزایش داده و گرانروی را کاهش می‌دهد. تعادل اثرات این دو عامل، گرانروی نمونه را مشخص می‌کند. در مطالعه گونزالز و پرز (۲۰۰۲)، گرانروی اوج نشاسته برنج استیله شده در مقایسه با نشاسته طبیعی افزایش یافت که علت

گرانروی خمیر نشاسته، شاخصی مهم در ارزیابی حسی، ارزیابی‌های کیفی نشاسته و در طراحی تجهیزات در خطوط تولید مواد غذایی می‌باشد. گرانروی اوج در خمیر نشاسته تحت تأثیر میزان خروج آمیلوز، تشکیل کمپلکس آمیلوز-لیپید، اصطکاک بین گرانول‌های متورم شده و میزان تورم گرانول‌ها قرار می‌گیرد. سودهی و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادند که پس از استیلاسیون، دمای خمیری شدن نشاسته کاهش یافت و همچنین شاخص گرانروی اوج نشاسته استیله افزایش یافت [۴]. مطابق شکل ۲ مشاهده می‌گردد که در همه نمونه‌های اصلاح شده E1414، دمای گرانروی اوج افزایش یافته است. دمای ژلاتینه شدن تابعی از میزان درجه اتصالات عرضی درون نشاسته است. بنابراین به نظر می‌رسد این دسته از نمونه‌های اصلاح شده می‌توانند به عنوان پایدار کننده در محصولاتی بکار روند که دمای فراوری بالایی دارند و نیازمند گرانروی پایینی در خلال فرآیند می‌باشند [۲۹].

در مقایسه با نمونه شاهد، گرانروی اوج در همه نمونه‌های نشاسته E1414 کاهش یافته است. همچنین با مقایسه شاخص گرانروی اوج در نمونه‌های نشاسته E1414 مشخص شد که این شاخص در نمونه با ۱۰ درصد عامل ایجاد کننده اتصالات عرضی، بیشترین گرانروی اوج را از

مطابق شکل ۲، بر اساس اختلاف مقدار گرانیوی نگهداری و گرانیوی اوج، مشخص می‌گردد که در نمونه‌های E1414 نسبت به نمونه شاهد پایداری در برابر حرارت افزایش یافته است. با بررسی روند این شاخص در بین نشاسته‌های اصلاح شده E1414 معلوم می‌گردد که با افزایش عامل اتصال دهنده، پایداری گرانول‌ها افزایش یافته است. قبلاً مشخص شده است که نشاسته‌های استیله نسبت به نشاسته‌های اولیه، گرانیوی گرم بالاتری را نشان دادند که احتمالاً به علت افزایش قدرت تورم و حلالیت در این نوع نشاسته و یا به دلیل تضعیف نیروهای مرتبط در نواحی آمورف گرانول‌ها باشد [۴]. اماجولا و همکاران (۲۰۱۲) نیز نشان دادند که ایجاد اتصالات عرضی منجر به کاهش فروپاشی نسبت به نمونه اولیه شده است. دلیل این امر نیز ممانعت از تشکیل پیوند با آب و کاهش تورم نشاسته عنوان شد [۳۳]. بسته به میزان واکنش و منبع گیاهی نشاسته، اتصالات عرضی می‌تواند اثرات متفاوتی بر ویژگی‌ها و خواص نشاسته اصلاح شده داشته باشد. سطوح بسیار کم پیوند عرضی معمولاً ساختار گرانول را تثبیت می‌کند تا به نشاسته اصلاح شده اجازه دهد تا به درجه بالاتری از تورم گرانول در حین حرارت دادن نسبت به نشاسته اولیه اصلاح نشده دست یابد. در چنین مواردی، قدرت تورم بالاتر و گرانیوی اوج بالاتر خمیر نشاسته را می‌توان مشاهده کرد. در مقابل، سطوح بالای پیوند عرضی به تدریج منجر به کاهش تورم گرانول، حلالیت، میزان خروج آمیلوز و گرانیوی اوج می‌شود. بنابراین نشاسته‌های دارای پیوند عرضی معمولاً دمای خمیری شدن و مقاومت بالاتری نسبت به شرایط اسیدی-حرارتی دارند. افزایش آنتالپی و دمای خمیری شدن نشاسته، به کاهش تحرک مولکولی در مناطق آمورف گرانول، به دلیل افزایش تعداد پیوندهای عرضی مولکولی نسبت داده می‌شود [۳۴].

آن را به افزایش جذب آب، حلالیت و تورم نسبت دادند. این محققان معتقدند که افزایش گرانیوی طی سرد کردن بیانگر تمایل نشاسته به برگشت‌پذیری است و نشاسته طبیعی برنج تمایل بالاتری را به برگشت‌پذیری قوام نشان می‌دهد [۳۱].

بر اساس شکل ۲ و جدول ۶ مشاهده می‌شود که فروپاشی نشاسته در نمونه‌های اصلاح شده نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است و این امر می‌تواند به دلیل استحکام بیشتر ناشی از برقراری پیوندهای اتصال عرضی در نمونه اصلاح شده باشد. مقادیر فروپاشی بالاتر نشان می‌دهد که گرانول‌های نشاسته نسبت به عملیات حرارتی و برش مکانیکی مقاومت کمتری دارند. مقادیر فروپاشی کمتر ممکن است ناشی از تورم کمتر گرانول‌های نشاسته به دلیل ظرفیت هیدراتاسیون کمتر باشد. همچنین می‌تواند به علت حرکت مولکول‌های آمیلوز در نواحی آمورف باشد. مولکول‌های آمیلوز به عنوان یک مهارکننده تورم عمل می‌کنند تا تجزیه دانه‌های نشاسته متورم را کاهش دهند [۳۲].

از مهمترین شاخص‌های مربوط به آنالیز خمیر نشاسته، گرانیوی نهایی است که نشان‌دهنده عملکرد نمونه در کاربردهای صنعتی است. اتصال عرضی، پایداری نشاسته را افزایش می‌دهد در حالی که استیله کردن به طور قابل توجهی آن را کاهش می‌دهد [۱۰]. نتیجه مشاهده شده در این بخش (شکل ۲) نشان داد که نشاسته‌های E1414 نسبت به نمونه شاهد دارای گرانیوی نهایی بالاتری می‌باشند. همچنین با در نظر گرفتن روند تغییرات گرانیوی نمونه‌های نشاسته اصلاح شده E1414 می‌توان بیان داشت این دسته از نشاسته‌های اصلاح شده دارای الگوی تورمی گرانولی از نوع متوسط^۱ می‌باشد به این معنی که گرانیوی خمیر نشاسته در فاز گرمایش با شیب کم افزایش دارد؛ گرانیوی دوره نگهداری دارای ثبات خوبی بوده و در فاز نگهداری سرد، بازگشت قوام زیاد نمایان می‌شود.

اصلاح دوگانه نشاسته سیب‌زمینی به روش فسفریلاسیون و استیلاسیون منجر به تولید نشاسته‌ای با عملکرد فنی بهبودیافته در مقایسه با نشاسته خام گردید. این نوع اصلاح موجب ایجاد تعادل مطلوب میان قدرت تورم، پایداری حرارتی و کاهش آب‌اندازی شد. نتایج حرارتی نشاسته نیز نشان داد که نشاسته‌های اصلاح‌شده E1414 نسبت به نمونه شاهد دارای گرانیوی اوج کمتر و پایداری حرارتی و برشی بالاتری هستند که این ویژگی‌ها، آن را برای فرآیندهای حرارتی طولانی و پمپاژ در صنعت غذا مناسب می‌سازد. در مجموع، نشاسته E1414 با ترکیب ۱٪ عامل ایجاد کننده اتصالات عرضی (STMP/STPP) و ۱۰٪ استیک انیدرید به‌عنوان ترکیب بهینه معرفی گردید و از نظر رفتار رئولوژیکی و پایداری ژل در شرایط نگهداری، عملکرد مطلوبی نشان داد. با توجه به پایداری حرارتی بالا، گرانیوی کنترل‌شده و کاهش آب‌اندازی، نشاسته اصلاح‌شده E1414 می‌تواند به‌عنوان پایدارکننده و قوام‌دهنده در محصولات کنسروی دارای مواد جامد معلق مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات آینده، امکان ترکیب این نوع نشاسته با هیدروکلوئیدهای طبیعی جهت افزایش ارزش تغذیه‌ای و بهبود ویژگی‌های بافتی محصولات غذایی مورد بررسی قرار گیرد.

سپاسگزاری

این مقاله با حمایت مالی جهاد دانشگاهی (ACECR) از طرح فناوریانه ملی با عنوان «کسب دانش فنی و تولید آزمایشی چهار نشاسته اصلاح‌شده پرکاربرد در صنایع غذایی از ضایعات سیب‌زمینی» با کد طرح ۱۰۳۷ انجام شده است. بدینوسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از جهاد دانشگاهی ابراز می‌داریم.

تأمین مالی

نویسنده اعلام می‌کند که هیچ بودجه‌ای دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

بر اساس جدول ۶ مشخص شد که بازگشت قوام در نمونه‌های نشاسته E1414 از نمونه شاهد بیشتر می‌باشد. بر اساس نتایج این جدول، با افزایش درصد عامل اتصال عرضی، بازگشت قوام کاهش می‌یابد. همچنین مشخص گردید که با کاهش درصد عامل اتصال دهنده، تاثیر گروه‌های استیل افزایش یافته و به دنبال آن بازگشت قوام افزایش می‌یابد. این تاثیر در ویژگی آب‌اندازی نیز مشاهده شد (شکل ۱). مقدار بازگشت قوام، درجه پسروی کوتاه مدت خمیر نشاسته را طی فرآیند خنک‌سازی، به ویژه تبلور مجدد آمیلوز نشان می‌دهد. بازگشت قوام بیشتر به میزان خروج آمیلوز از نشاسته نسبت داده می‌شود [۳۲] زیرا توسعه شبکه اولیه ژل تحت تاثیر ژل آمیلوز است [۵]. سودهی و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادند که استیلاسیون نشاسته، منجر به برگشت پذیری قوام بالاتری خواهد شد [۴].

بنابراین بر اساس گرانیوی نهایی و مقاومت دمایی بالاتر مشاهده شده در نمونه‌های نشاسته E1414 نسبت به نمونه شاهد، می‌توان بیان داشت که نشاسته‌های مورد بررسی (E1414) می‌توانند یکی از گزینه‌های مناسب برای استفاده در محصولات جامداتی باشد که در حین فرآوری به گرانیوی کمی احتیاج دارند تا فرآیند حرارتی، پمپ کردن و پرکردن به خوبی انجام شود و در طی نگهداری، قوام مطلوب محصول با افزایش گرانیوی فرمولاسیون ایجاد شود تا بافت یا احساس دهانی مطلوب حاصل گردد. اگرچه بر اساس این ویژگی‌ها، نشاسته اصلاح‌شده با ۱۰ درصد استیک انیدرید و ۱ درصد STMP، ارجحیت دارد زیرا گرانیوی نهایی بالاتری دارد و در عین حال، گرانیوی اوج در زمان طولانی‌تری از فرآیند اتفاق می‌افتد که نشان دهنده مقاومت حرارتی بالاتر این نمونه می‌باشد. بنابراین، کاربرد این ترکیب غذایی در محصولات کنسروی دارای مواد جامد غوطه‌ور در سس پیشنهاد می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری کلی

تمام فعالیت‌ها توسط نویسنده انجام شده است.

نویسنده تأیید می‌کند که هیچ گونه تضاد منافع مالی یا منافع رقابتی در این مطالعه ندارد.

منافع رقابتی

۵- منابع

- [1] Rincón-Aguirre, A., Bello Pérez, L. A., Mendoza, S., del Real, A., & Rodriguez Garcia, M. E. (2018). Physicochemical studies of taro starch chemically modified by acetylation, phosphorylation, and succinylation. *Starch-Stärke*, 70(3-4), 1700066.
- [2] Liu, C., Yan, H., Liu, S., & Chang, X. (2022). Influence of Phosphorylation and Acetylation on Structural, Physicochemical and Functional Properties of Chestnut Starch. *Polymers*, 14(1), 172.
- [3] Bello-Pérez, L.A., et al., Effect of low and high acetylation degree in the morphological, physicochemical and structural characteristics of barley starch. *LWT-Food Science and Technology*, 2010. 43(9): 1434-1440.
- [4] Sodhi, N.S. and N. Singh, Characteristics of acetylated starches prepared using starches separated from different rice cultivars. *Journal of Food Engineering*, 2005. 70(1): 117-127.
- [5] Huang, Q., et al., The effect of enzymatic pretreatments on subsequent octenyl succinic anhydride modifications of cornstarch. *Food Hydrocolloids*, 2010. 24(1): 60-65.
- [6] Singh, J., Colussi, R., McCarthy, O. J., & Kaur, L. (2016). Chapter 8 - Potato Starch and Its Modification. In J. Singh & L. Kaur (Eds.), *Advances in Potato Chemistry and Technology (Second Edition)* (Second Edition ed., pp. 195-247). Academic Press.
- [7] Woo, K., & Seib, P. (2002). Cross-linked resistant starch: Preparation and properties. *Cereal chemistry*, 79(6), 819-825.
- [8] Mali, S., Silva, R. A. S., Grossmann, M. V. E., Silva, R. S. F., & Borsato, D. (2001). Optimization of the production of acetylated distarch adipates using the novel software 'MULTIPLEX'. *International Journal of Food Science and Technology*, 36(6), 641-647.
- [9] Kurakake, M., Akiyama, Y., Hagiwara, H., & Komaki, T. Higley Effects of cross-linking and low molecular amylose on pasting characteristics of waxy corn starch. *Food Chemistry*, 116(1), 66-70.
- [10] Lewandowicz, J., J. Le Thanh-Blicharz, and A. Szwengiel, The effect of chemical modification on the rheological properties and structure of food grade modified starches. *Processes*, 2022. 10(5): p. 938.
- [11] Cui, B., et al., Effect of cross-linked acetylated starch content on the structure and stability of set yoghurt. *Food Hydrocolloids*, 2014. 35: 576-582.
- [12] Br, R., & Cury, R. (2014). Chemical, morphological, rheological and thermal properties of Solanum lycocarpum phosphorylated starches.
- [13] Heydarian, M., Hashemi, M., Beiraghi-Toosi, S., Goli-Movahhed, Q., & Milani, E. (2025). Optimizing reaction conditions for the production of phosphorylated wheat starch by sodium trimetaphosphate (STMP) in order to be used in the formulation of sauces. *Journal of Food Science & Technology (2008-8787)*, 21(159).
- [14] Rahim, A., Nugroho, M. A. F., Hutomo, G. S., Kadir, S., Laude, S., & Mubarak, H. (2021). Physicochemical properties of phosphate butyrate arenga starches from dual modifications. 681(1), 012043.
- [15] Joseph, D., Jyothi, A. N., & Sreekumar, J. (2024). Optimization of Synthesis of Cassava Starch Phosphates by Response Surface Methodology and Characterization of the Modified Starches. *Starch-Starke*.
- [16] Shi, M., Chen, Y., Yu, S., & Gao, Q. (2013). Preparation and properties of RS III from waxy maize starch with pullulanase. *Food Hydrocolloids*, 33(1), 19-25.
- [17] Mirmoghtadaie, L., M. Kadivar, and M. Shahedi, Effects of cross-linking and acetylation on oat starch properties. *Food Chemistry*, 2009. 116(3): 709-713.
- [18] Ačkar, Đ., Babić, J., Šubarić, D., Kopjar, M., & Miličević, B. (2010). Isolation of starch from two wheat varieties and their modification with epichlorohydrin. *Carbohydrate polymers*, 81(1), 76-82.
- [19] Sitohy, M. Z., Labib, S. M., El-Saadany, S. S., & Ramadan, M. F. (2000). Optimizing the conditions

- for starch dry phosphorylation with sodium mono- and dihydrogen orthophosphate under heat and vacuum. *Starch-Stärke*, 52(4), 095-100.
- [20] Zhang, D., Lin, Z., Lei, W., & Zhong, G. (2020). Synergistic effects of acetylated distarch adipate and sesbania gum on gelatinization and retrogradation of wheat starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 156: 171-179.
- [21] Khojestehtnia, Nahid, Farast, Masoumeh, and Tadini, Mehrnoush. (2019). Studying the effect of chemical modification on the functional properties of oak starch. *Food Processing and Preservation*, 12(1), 35-48.
- [22] Aghili Dehnavi, F., Farzaneh, Golkar, Abdul Khaleq, Molavi, Homan, & Hojjat El-Islami. (2018). The effect of acetylation and cross-linking process on physicochemical, functional and structural properties of chickpea starch (Jam variety). *Research and Innovation in Food Sciences and Technology*, 6(4), 389-402.
- [23] Malekpour, Zahra, Hojatoleslami, Mohammad, Molavi, Homan, and Keramat, Javad. (2016). Studying the effect of acetylation modification on the physicochemical properties of barley starch. *Food and Nutrition Sciences*, 14(1 (53)), 55-64.
- [24] Kaur, L., J. Singh, and N. Singh, Effect of cross-linking on some properties of potato (*Solanum tuberosum* L.) starches. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2006. 86: 1945-1954
- [25] Koo, S.H., K.Y. Lee, and H.G. Lee, Effect of cross-linking on the physicochemical and physiological properties of corn starch. *Food hydrocolloids*, 2010. 24(6): 619-625.
- [26] Pang, Z., Xu, R., Luo, T., Che, X., Bansal, N., & Liu, X. (2019). Physicochemical properties of modified starch under yogurt manufacturing conditions and its relation to the properties of yogurt. *Journal of food engineering*, 245, 11-17.
- [27] Kumar, R. and B. Khatkar, Thermal, pasting and morphological properties of starch granules of wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. *Journal of food science and technology*, 2017. 54: 2403-2410.
- [28] Higley, J., et al., The Rapid Visco Analyzer (RVA) as a tool for differentiating potato cultivars on the basis of flour pasting properties. *American journal of potato research*, 2003. 80: 195-206.
- [29] Ai, Y. and J.I. Jane, Gelatinization and rheological properties of starch. *Starch-Stärke*, 2015. 67(3-4): 213-224.
- [30] García, F.P., et al., Modification and chemical characterization of barley starch. *International Journal of Applied Science and Technology*, 2012. 2(4).
- [31] González, Z. and E. Pérez, Effect of acetylation on some properties of rice starch. *Starch-Stärke*, 2002. 54(3-4): 148-154.
- [32] Yan ,W., et al., Gelatinization, Retrogradation and Gel Properties of Wheat Starch–Wheat Bran Arabinoxylan Complexes. *Gels*, 2021. 7(4): p. 200.
- [33] Omojola, M., N. Manu, and S. Thomas, Effect of cross linking on the physicochemical properties of cola starch *African Journal of Food Science*, 2012. 6(4): 91-95.
- [34] Bonomi, F., et al., *Characterization, Properties and Applications*. 2017: Walter de Gruyter GmbH & Co KG.


Scientific Research
Optimization of the production of acetylated distarch phosphate (E1414) and evaluation of its properties for use in canned products
Hamed Saberian^{1*}, Ali Forouhar²

1-Assistant Professor of Department of Agro-Industrial Waste Processing, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR) at IUT, Isfahan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Article History:</p> <p>Received: 2025/10/25</p> <p>Review: 2025/11/10</p> <p>Accepted: 2025/11/26</p>	<p>Starch, as one of the most widely used natural polysaccharides in the food industry, is of interest due to its properties such as swelling, viscosity and gel formation ability; however, limitations such as thermal instability, retrogradation and syneresis reduce its efficiency in industrial processes. To overcome these limitations, chemical modification of starch, especially in a dual form (acetylation and phosphorylation), is an effective method to improve its performance. In this study, the production and optimization of acetylated distarch phosphate (E1414) were investigated using response surface modeling (RSM) and central composite design (CCD). The effective factors included the percentage of cross-linking agent (STMP/STPP) in the range of 1 to 10% and the concentration of acetic anhydride in the same range. Physicochemical properties, including percentage of acetyl groups and degree of substitution (DS), swelling power, syneresis, transparency and thermal properties (RVA), were evaluated as the main responses. The results showed that increasing the concentration of acetic anhydride significantly increased the degree of acetylation (up to 2.04%) and improved swelling capacity, reduced syneresis and increased transparency, while increasing the cross-linking factor reduced swelling and increased stability against heat and shear stress. Finally, the optimal concentration for the production of modified starch was determined to be 10% acetic anhydride and 1% cross-linking agent (STMP/STPP). This combination resulted in a starch with high thermal and shear stability, suitable transparency and minimal syneresis. Therefore, E1414 starch is recommended as an effective stabilizer and thickener for use in canned products and food products with intense heat processing.</p>
<p>Keywords:</p> <p>Starch, Dual modification, Acetylation, Cross-linking, RVA</p>	
<p>DOI: 10.48311/fsct.2026.115687.0</p> <p>*Corresponding Author E- Saberian@acecr.ac.ir</p>	