

مجله علوم و صنایع غذایی ایران



سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی-پژوهشی

بهینه سازی شرایط واکنش تولید نشاسته گندم فسفریله توسط تری متافسفات سدیم (STMP) به منظور استفاده در فرمولاسیون انواع سس ها

محمدکاظم حیدریان^۱، مجید هاشمی^{۲*}، شهرام بیرقی طوسی^۳، غلامعلی گلی موحد^۴، الناز میلانی^۴

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

۲- استادیار، گروه پژوهشی فراوری مواد غذایی، پژوهشکده علوم و فناوری مواد غذایی جهاد دانشگاهی خراسان رضوی، مشهد، ایران.

۳- مربی، گروه پژوهشی فراوری مواد غذایی، پژوهشکده علوم و فناوری مواد غذایی جهاد دانشگاهی خراسان رضوی، مشهد، ایران.

۴- دانشیار، گروه پژوهشی فراوری مواد غذایی، پژوهشکده علوم و فناوری مواد غذایی جهاد دانشگاهی خراسان رضوی، مشهد، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۸

کلمات کلیدی:

نشاسته گندم،

فسفریلاسیون،

خمیری شدن، سس

نشاسته به دلیل مقرون به صرفه بودن، ایمنی بالا و زیست تخریب پذیری، در صنایع مختلف غذایی و غیرغذایی به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد. اگرچه، ویژگی های ی مانند نامحلول بودن در آب سرد، عدم تحمل گرما، مقاومت کم نسبت به تنش های اعمالی و پایداری انجماد- ذوب کم، کاربرد نشاسته طبیعی برای مصارف مختلف صنعتی را محدود می کند. نشاسته گندم یکی از رایج ترین انواع نشاسته در بسیاری از کشورها به ویژه ایران است و می توان آن را برای کاربرد در محصولات مختلف اصلاح کرد. یکی از کارآمدترین تکنیک ها برای اصلاح نشاسته، اصلاح شیمیایی است، اما نگرانی هایی را در مورد آلودگی محیط زیست و هزینه های بالای مواد شیمیایی ایجاد می کند. به همین دلیل در این مطالعه به منظور کاهش مصرف مواد شیمیایی، شرایط واکنش تولید نشاسته فسفریله با تری- متافسفات سدیم (STMP) با استفاده از سه متغیر مستقل pH (۹/۵، ۱۰/۵ و ۱۱/۵)، دما (۱۱۰، ۱۳۰ و ۱۵۰ درجه سانتی گراد) و غلظت واکنشگر (۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد)، بهینه سازی شد. ملاک بهینه سازی وجود شاخص تورم و حلالیت بالاتر، شفافیت بالاتر خمیر، سینرسیس کمتر ژل و پایداری انجماد- ذوب بالاتر به منظور استفاده در انواع سس انتخاب گردید. سپس به منظور بررسی خصوصیات ساختاری، حرارتی و خمیری شدن، آزمون های تکمیلی بر نمونه نشاسته بهینه و طبیعی انجام شد؛ نتایج نشان داد که نشاسته تولید شده تحت شرایط بهینه به دلیل بهبود ویژگی بافتی، ایجاد ویسکوزیته بالاتر و افزایش تحمل گرما برای استفاده در فرمولاسیون انواع سس ها مناسب می باشد.

DOI:10.22034/FSCT.22.159.92.

* مسئول مکاتبات:

majid_hashemi1@yahoo.com

۱-مقدمه

گندم یکی از رایج ترین ارقام مورد استفاده در رژیم غذایی انسان است. این محصول علاوه بر تولید آرد، نان و ماکارونی، در تولید نشاسته نیز کاربرد فراوانی دارد [۱]. در بسیاری از کشورها (مانند ایران و بسیاری از کشورهای اروپایی) نشاسته گندم رایج ترین نوع نشاسته است که می توان آن را برای تولید انواع مختلف نشاسته اصلاح شده استفاده کرد [۲].

نشاسته به عنوان پلی ساکارید اصلی در گیاهان، کاربردهای گسترده ای در بسیاری از محصولات غذایی و غیر غذایی دارد. این ماده بیشتر به عنوان منبع انرژی برای انسان بوده و همچنین با عمل به عنوان غلیظ کننده، تثبیت کننده کلوئیدی، حجیم کننده، احتباس آب و عوامل ژل کننده، بر خواص فیزیکوشیمیایی غذاها تأثیر می گذارد [۳]. نشاسته طبیعی یک تثبیت کننده و تنظیم کننده بافت مناسب در سیستم های غذایی است [۴]، اما محدودیت هایی مانند مقاومت برشی و حرارتی کم، تجزیه حرارتی و میل بالا نسبت به رترودگراسیون، حلالیت کم، شفافیت و پایداری ضعیف کاربرد آن را در برخی از محصولات غذایی محدود می کند [۵، ۶]. برای غلبه بر محدودیت های نشاسته طبیعی و تولید قابلیت های جدید، اصلاح نشاسته امری ضروری است که از سالیان گذشته انجام می گیرد. نشاسته های مختلف اصلاح شده عموماً از طریق روش های فیزیکی، شیمیایی، ژنتیکی یا آنزیمی تولید می شوند [۷، ۸]. اصلاح نشاسته تاریخچه طولانی دارد و برای معرفی گروه های عاملی به مولکول های نشاسته استفاده شده است. [۹]. اصلاح شیمیایی نشاسته را می توان با انواع واکنش های شیمیایی مختلف مانند هیدرولیز اسیدی، اکسیداسیون، اتریفیکاسیون، استریفیکاسیون و اتصال عرضی ایجاد کرد [۱۰]. در میان این روش ها، ایجاد اتصالات عرضی معمولاً برای اصلاح نشاسته طبیعی مورد استفاده قرار می گیرد که در آن از عوامل اتصال عرضی مختلف مانند تری متافسفات سدیم (STMP)، تری پلی فسفات سدیم (STPP)،

اپی کلروهیدرین (EPI) و کلرید فسفریل (POCl_3) استفاده شده است [۱۱]. با استفاده از این روش، پیوندهای بین مولکولی و درون مولکولی در مکان های تصادفی در گرانول های نشاسته تشکیل می شوند که گرانول ها را تثبیت و تقویت می کنند [۱۲]. همچنین، اتصال عرضی نشاسته تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله منبع نشاسته، غلظت و ترکیب عامل ایجاد پیوند متقابل، میزان جایگزینی، pH، زمان واکنش و دما قرار دارد [۱۳]. در مطالعه حاضر، STMP به دلیل ماهیت غیر سمی، نرخ نفوذ کمتر و قابلیت اتصال متقابل بهتر به عنوان یک عامل ایجاد کننده اتصال عرضی برای نشاسته گندم مورد استفاده قرار گرفت [۱۴].

نشاسته مورد استفاده در فرمولاسیون سس باید بتواند دمای فرایند پاستوریزاسیون را تحمل کند و پایداری و بافت مورد نظر را در فرآورده نهایی حاصل کند. مطالعات نشان می دهند که اصلاح اتصال عرضی نشاسته ویژگی های رئولوژیکی، پایداری حرارتی، مقاومت در برابر برش، شفافیت خمیر و پایداری انجماد-ذوب را افزایش می دهد و همه این ها مجموعاً به خاصیت غلیظ شدن نشاسته شبکه ای در محصولات غذایی مختلف مانند سوپ و سس کمک می کنند [۱۵]. بنابراین هدف از این مطالعه بهینه سازی روش تولید نشاسته گندم فسفریله با تری متافسفات سدیم (STMP) به منظور استفاده در فرمولاسیون سس بود. در این مطالعه علاوه بر بهینه سازی شرایط تولید نشاسته گندم فسفریله و به منظور درک تغییرات ایجاد شده، خصوصیات ساختاری، حرارتی، ژل دهندگی، خمیری شدن و مورفولوژیکی، نشاسته گندم بهینه اصلاح شده با نشاسته طبیعی گندم مورد بررسی قرار گرفت.

۲-مواد و روش

۲-۱-مواد

شستشو داده شد و دو مرتبه توسط اتانول-فیلتراسیون شسته شده و درون هود خشک گردید [۱۷].

۲-۴- اندازه گیری مقدار آمیلوز

۰/۱ گرم نشاسته در ۸ میلی لیتر محلول دی متیل سولفوکساید^۱ ۹۰ درصد در دمای ۸۵°C به مدت ۱۵ حل شد و پس از به حجم رساندن در ۲۵ میلی لیتر، یک میلی لیتر از این محلول به فالکون پنجاه میلی لیتری منتقل گردید و ۴۰ میلی لیتر آب دیونیزه و پنج میلی لیتر محلول ید (۰/۰۰۲۵mol/L) ید در ۰/۰۰۶۵mol/L یدید پتاسیم) اضافه و به حجم رسانده شد. جذب محلول پس از ۱۵ دقیقه در طول موج ۶۰۰ نانومتر تعیین شد. از محلول حاوی تمام واکنش گر ها بدون نمونه نشاسته به عنوان شاهد جذب استفاده گردید. نمودار استاندارد با استفاده از آمیلوز و آمیلوپکتین خالص شده رسم شد [۱۸].

۲-۵- تعیین میزان فسفر و درجه جایگزینی فسفر در

نشاسته فسفریله

میزان فسفر موجود در نشاسته اصلاح شده با استفاده از روش رنگ سنجی، در نتیجه ی واکنش با آمونیوم مولیبدات مطابق با روش جکسون (۱۹۶۷) تعیین شد [۱۹]. در ابتدا ۰/۱ از نمونه های نشاسته با ۱۵ میلی لیتر از مخلوط سه اسید نیتریک اسید، پرکلریک اسید و سولفوریک اسید (با نسبت های به ترتیب از چپ به راست ۱:۴:۱۰) هضم شدند. بعد از شفاف شدن رنگ، نمونه ها به یک فلاسک پنجاه میلی لیتری استاندارد منتقل شد و با ۱۰ میلی لیتر آب مقطر رقیق گردیدند. سپس پنج میلی لیتر معرف آمونیوم مولیبدات به فلاسک ها اضافه و با آب مقطر به حجم رسانیده شد. نمونه شاهد نیز با استفاده از پنج میلی لیتر معرف آمونیوم مولیبدات تهیه گردید. جذب نمونه ها در ۴۹۰ نانومتر با استفاده از

نشاسته گندم با خلوص بالا از شرکت نشاسته خوشه زرین تهیه شد. ترکیبات شیمیایی مورد استفاده از شرکت مرک آلمان تهیه شدند. آمیلوپکتین خالص استخراج شده از نشاسته ذرت مومی (۱۱۰۱۲۰) و آمیلوز خالص حاصل از نشاسته سیب زمینی آمیلوزی (A0512) از شرکت سیگما تهیه گردید.

۲-۲- اندازه گیری رطوبت، پروتئین، چربی و خاکستر

اندازه گیری رطوبت به روش آون گذاری، پروتئین به روش کجلدال، چربی به روش سوکسله و خاکستر به روش سوزاندن در کوره، بر طبق روش های استاندارد (AOAC, 2000) و در سه تکرار انجام شد [۱۶].

۲-۳- تولید نشاسته های فسفریله به روش تری متافسفات

سدیم

نشاسته خام (۶۰ گرم) در ۹۰ میلی لیتر آب مقطر در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد توسط همزن مغناطیسی حل شد و ۵ درصد سولفات سدیم بر اساس وزن نشاسته به آن اضافه گردید و pH سوسپانسیون بوسیله سود یک مولار در مقادیر ۹/۵، ۱۰/۵ و ۱۱/۵ تنظیم گردید. سپس مخلوط STMP/STPP به نسبت ۱:۹۹ در غلظت های ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد اضافه شد. محیط واکنش در pH های ذکر شده به مدت ۱ ساعت همراه با هم زدن نگهداری گردید و سپس تا حدود ۱۰-۱۵ درصد رطوبت در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد با استفاده از آون دارای جریان هوا خشک شد. مخلوط خشک شده به یک ظرف بسته منتقل شد و به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۱۰، ۱۳۰ و ۱۵۰ درجه سانتیگراد حرارت دید. پس از خنک کردن تا دمای اتاق، نشاسته در ۱۲۰ میلی لیتر نشاسته مقطر حل شد و pH آن توسط اسید کلریدریک به ۶/۵ رسید. در نهایت نشاسته اصلاح شده حاصل بوسیله سانتریفوژ (۳۰۰۰g، ۱۰ دقیقه) بازیابی و چهار مرتبه با آب مقطر

1. Dimethyl sulfoxide (DMSO)

اسپکتروفتومتر تعیین شد. منحنی استاندارد با استفاده از جذب رقت‌های مختلف پتاسیم دی‌هیدروژن ارتوفسفات تهیه شد. در نهایت میزان درجه جایگزینی فسفر با استفاده از معادله ذیل تعیین گردید:

$$DS = \frac{162 \times P}{3100 - (102 \times P)}$$

که DS درجه جایگزینی، P درصد میزان فسفر (بر اساس وزن خشک) نشاسته فسفریله شده می باشد.

۲-۶- اندازه گیری قدرت تورم و درصد حلالیت

مقدار معینی از نمونه نشاسته توزین و درون فالكون ریخته شد، سپس جهت تهیه سوسپانسیون ۱/۵ درصد وزنی-وزنی آب دیونیزه به آن اضافه گردید. نمونه‌ها توسط ورتکس یکنواخت شدند و در حمام آب با دماهای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه حرارت دهی گردیدند. طی این مدت، هر ۵ دقیقه یک‌بار نمونه‌ها توسط ورتکس یکنواخت شدند. لوله‌ها پس از خنک شدن، به مدت ۱۵ دقیقه در ۳۰۰۰g سانتریفیوژ گردیدند. مایع رویی (سوپرناتانت) با دقت به درون پلیت توزین شده از قبل، تخلیه و در آون با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند. وزن لایه ته‌نشین شده محاسبه، و سپس حلالیت و قدرت تورم بر اساس روابط زیر تعیین گردید [۲۰، ۲۱].

$$\text{حلالیت} = \frac{m_2 * 100}{m_1}$$

$$\text{قدرت تورم} = \frac{m_3}{m_1 - m_2}$$

m_1 : وزن نمونه اولیه نشاسته، m_2 : مایع رویی خشک شده و m_3 : لایه ته‌نشین شده

۲-۷- اندازه گیری آب اندازی ژل های نشاسته

برای تعیین میزان آب‌اندازی ژل نشاسته، سوسپانسیون ۵ درصدی نشاسته در آب دیونیزه حاوی ۲۰۰ ppm سدیم آزید، در لوله در پیچ‌دار تهیه شد و پس از یکنواخت شدن با ورتکس، به مدت ۳۰ دقیقه همراه با هم زدن در حمام آب جوش قرار داده شد. پس از طی زمان پخت، لوله با مخلوط آب و یخ سریعاً سرد شد و در یخچال نگهداری گردید. سپس لوله‌ها از یخچال خارج و به مدت ۱۵ دقیقه در شتاب ۲۵۰۰g سانتریفیوژ شد. لایه شناور حذف و اختلاف وزن اندازه‌گیری گردید. درصد آب‌اندازی از محاسبه درصد آب جدا شده نسبت به وزن اولیه ژل محاسبه گردید [۲۲].

۲-۸- اندازه گیری پایداری انجماد- ذوب

به منظور تعیین پایداری ژل های نشاسته در برابر انجماد و ذوب، سوسپانسیون ۵ درصدی نشاسته در آب دیونیزه حاوی ۲۰۰ ppm سدیم آزید در لوله در پیچ‌دار تهیه شد. این مخلوط به مدت ۱۵ دقیقه در دمای محیط با ورتکس یکنواخت شد و سپس در حمام آب جوش به مدت ۲۰ دقیقه همراه با هم‌زدن مکانیکی با سرعت ۱۶۰ دور در دقیقه، پخت انجام شد. خمیر تا دمای اتاق سرد و درون فریزر در دمای ۲۰- درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت منجمد گردید. خروج از انجماد در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت درون انکوباتور انجام شد. لوله‌های سانتریفیوژ در شتاب ۸۰۰۰g به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. آب‌اندازی ژل بر حسب درصد آب جدا شده نسبت به وزن اولیه ژل تعیین شد [۲۳].

۲-۹- شفافیت خمیرهای نشاسته

شفافیت خمیر بدست آمده از نشاسته‌های طبیعی و اصلاح شده بر اساس روش ردی و سیب (۱۹۹۹) تعیین شد [۲۴]. ابتدا ۰/۰۵ گرم از هر نشاسته در پنج میلی‌لیتر آب مقطر سوسپانسیون شد و در یک لوله آزمایش در پیچ‌دار ریخته شد و در حمام آب ۹۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه قرار

به منظور بررسی ویژگی های حرارتی ژلاتینه شدن نشاسته، ۵ میلی گرم نشاسته (بر مبنای وزن خشک)، درون ظرف آلومینیومی ۴۰ mL توزین و پس از افزودن ۲۰ mL آب دیونیزه در ظرف در بسته به مدت ۲۴ ساعت در دمای یخچال به تعادل رسید. پس از هم دما شدن ظرف با محیط، به وسیله دستگاه کالری سنجی روبشی افتراقی از دمای ۲۰ تا ۱۲۰ سانتی گراد با سرعت ۱۰°C/min حرارت دهی گردید. داده ها به وسیله نرم افزار برای تعیین دمای شروع (To)، دمای اوج (Tp)، دمای نهایی (Tc) و آنتالپی ژلاتیناسیون (ΔH) تحلیل شد [۲۶].

۱۲-۲- بررسی مورفولوژی گرانول های نشاسته (SEM)

سوسپانسیون ۱ درصد نشاسته در اتانول تهیه و پس از یکنواخت شدن با همزن گردابی، یک قطره به پایه آلومینیومی منتقل و پس از خشک شدن، به وسیله دستگاه پوشش دهی طلا-پالادیوم با شدت جریان ۹mA و خلا ۳- Pa ۱۰ پوشش دهی شد، سپس با میکروسکوپ الکترونی روبشی با ولتاژ شتاب دهنده ۲۰kV تصویربرداری انجام شد [۲۷].

۱۳-۲- تعیین رفتاری خمیری شدن نشاسته

رفتار خمیری شدن نشاسته با استفاده از دستگاه آنالیز سریع ویسکوزیته (RVA) تعیین شد. سوسپانسیون ۱۴ درصد نشاسته به وزن ۲۸ گرم، درون ظرف دستگاه تهیه و پس از هم زدن مقدماتی با همزن دستگاه، درون محفظه دستگاه قرار گرفت. سرعت هم زدن در ده ثانیه اول آزمون ۹۶۰ rpm و سپس ۱۶۰ rpm تنظیم گردید. تغییرات ویسکوزیته نمونه طی زمان آزمون بر اساس برنامه تغییرات دمایی نمونه در پنج مرحله اندازه گیری شد. ۱- نگهداری در ۵۰°C به مدت یک دقیقه؛ ۲- افزایش دما از ۵۰°C به ۹۵°C با سرعت ۱۲°C/min؛ ۳- نگهداری در دمای ۹۵°C به مدت ۲/۵ دقیقه؛ ۴- کاهش

گرفت به طوری که هر پنج دقیقه چند بار هم زده شد. بعد از سرد شدن، شفافیت نشاسته ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۶۵۰ نانومتر در برابر نمونه شاهد آب اندازه گیری شد.

۱۰-۲- طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوری (FTIR)

طیف مادون قرمز نمونه های نشاسته طبیعی و نمونه اصلاح شده بهینه با استفاده از دستگاه طیف سنج FTIR انجام شد. در ابتدا هر یک از نمونه ها با پودر بروماید پتاسیم به خوبی مخلوط شد و به صورت یک قرص پرس شده برای قرارگیری در دستگاه در آمد. طیف های مادون قرمز نمونه ها بر مبنای میزان عبور طیف و با وضوح ۱/۹۳ بر سانتیمتر در محدوده ی طول موجی 4000 cm^{-1} تا 400 cm^{-1} ثبت گردیدند [۲۵].

۱۱-۲- تعیین الگوی پراش اشعه ایکس (XRD)

نمونه های نشاسته طبیعی و نمونه اصلاح شده بهینه در یک دستگاه افتراق سنج اشعه ایکس در ولتاژ ۳۵ kV و آمپراژ ۳۰ mA مورد بررسی قرار گرفتند. افتراق های ثبت شده بین زاویه ۲ تا ۴۰ درجه، با گام ۰/۰۴ درجه بود. درصد کریستالیتی هر یک از نمونه های نشاسته با استفاده از زیر تعیین شد.

$$\text{Crystallinity}\% = \frac{A_c}{(A_c + A_a)}$$

که A_a و A_c به ترتیب مساحت ناحیه کریستالی و آمورف بدست آمده بر اساس افتراق سنجی اشعه ایکس نمونه ها بود [۲۵].

۱۱-۲- تعیین ویژگی های حرارتی (DSC)

از تخریب ژل طی آزمون جلوگیری شود که توسط پونز و فیزمن [۲۹] پیشنهاد شده است. بر اساس داده‌های تغییرات نیرو-زمان، شاخص سختی^۷ محاسبه خواهد شد.

۲-۱۵- آنالیز آماری

در این پژوهش به منظور بهینه‌سازی شرایط واکنش تولید نشاسته فسفریله با تری‌متافسفات سدیم نیمه خشک از روش رویه سطح در قالب طرح باکس بنکن استفاده گردید (جدول ۱). در مرحله اول سه متغیر مستقل شامل pH (۹/۵، ۱۰/۵ و ۱۱/۵)، دما (۱۱۰، ۱۳۰ و ۱۵۰ درجه سانتی گراد) و غلظت واکنشگر (۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد) در سه سطح، بهینه‌سازی شد. ملاک بهینه‌سازی در این مرحله خصوصیات آب‌اندازی، قدرت تورم، شفافیت خمیر، پایداری در برابر انجماد و ذوب نمونه‌ها قرار داده شد. در مرحله بعد آزمون‌های تکمیلی بر روی نمونه بهینه و نشاسته طبیعی انجام شد. در این مرحله به منظور بررسی آزمون معنی‌دار ی از طرح آزمایشی آن‌ها یک طرفه و آزمون مقایسه میانگین دانکن استفاده شد. پردازش داده‌ها و ترسیم نمودارها به کمک نرم افزار مینی تب و Origin 2022 صورت گرفت.

دما از ۹۵°C به ۵۰°C با سرعت ۱۲°C/min و ۵- نگهداری در دمای ۵۰°C به مدت دو دقیقه. شاخص‌های دمای خمیری- شدن^۳، ویسکوزیته حداکثر^۴، ویسکوزیته شکست^۵ و ویسکوزیته نهایی^۶ بر اساس نمودار تغییرات ویسکوزیته در برابر دما توسط نرم افزار تعیین شد [۲۸].

۲-۱۴- اندازه گیری سختی ژل نشاسته

به منظور بررسی سختی ژل نشاسته، ابتدا سوسپانسیون ۱۰ درصدی نشاسته در آب دیونیزه تهیه و به مدت ۱۵ دقیقه توسط همزن مکانیکی هم‌زده شد. نمونه به مدت ۱۵ دقیقه در حمام آب جوش با سرعت هم‌زن ۱۶۰ دور در دقیقه برای پخت قرار داده شد. خمیر داغ حاصل به قالب استوانه‌ای با قطر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر منتقل گردید و به مدت ۲۴ ساعت در یخچال به منظور تشکیل و توسعه ژل نگهداری شد. آزمون تحلیل پروفایل بافت نمونه ژل با استفاده از دستگاه بافت‌سنج با لودسل ۵۰ نیوتن در دمای محیط، تحت شرایط دو بار فشردن با سرعت ۲ mm/s، درصد تغییرات پنجاه درصد و نیروی بارگذاری اولیه ۱۰ گرم انجام شد. در این آزمون نمونه تحت تنش محوری پنجاه درصد قرار گرفته تا

Table 1. Box-Benken design matrix for optimization of parametrs affecting phosphorylated starch production.

Sample	pH	Temperature (C)	Concentration (%)
1	11.5	130	4.5
2	10.5	150	1.5
3	9.5	110	3
4	10.5	110	4.5
5	11.5	110	3
6	11.5	130	1.5
7	10.5	130	3
8	10.5	150	4.5
9	11.5	150	3
10	9.5	130	4.5
11	10.5	130	3
12	10.5	110	1.5

6. Final viscosity

7. Hardness

3. Pasting temperature

4. Peak viscosity

5. Trough viscosity

13	10.5	130	3
14	9.5	150	3
15	10.5	130	3
16	9.5	130	1.5
17	10.5	130	3

۳- نتایج و بحث:

۳-۱- ترکیب شیمیایی

که نشاسته گندم خریداری شده دارای خالص مناسب بوده و بخش عمده پروتئین باقی مانده در طول فرآیند جداسازی حذف شده است. در نتیجه می توان ادعا کرد که تفاوت در ویژگی های عملکردی نشاسته تحت تاثیر ناخالصی ها قرار نگرفته است [۳۰].

جدول ۲ ترکیب شیمیایی نشاسته طبیعی گندم را نشان می دهد. سطوح بسیار پایین پروتئین و چربی نشان می دهد

Table 2. Chemical composition of commercial wheat starch

Chemical composition	Content (%)
Moisture	11.00 ± 0.40
Protein*	0.77 ± 0.06
Fat*	0.09 ± 0.02
Ash*	0.30 ± 0.01

* The content of protein, fat and ash is calculated based on dry matter.

۳-۲- حلالیت

انحلال در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد نشاسته های فسفریله شد. از طرف دیگر افزایش غلظت سبب افزایش میزان انحلال در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد گردید. در خصوص اثر متقابل pH-غلظت واکنشگر نیز اثر آنتاگونیستی مشاهده گردید؛ به طوری که در سطح پایین غلظت واکنشگر، با افزایش مقدار pH میزان انحلال در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد نشاسته افزایش یافت درحالی که با افزایش غلظت واکنشگر، این اثر عکس گردید (شکل ۱). همچنین میزان انحلال در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد با میزان فسفریله شدن دارای همبستگی معنی دار معادل ۰/۷۲۰ بود ($p < 0.05$).

میزان انحلال در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد نشاسته های گندم فسفریله شده در دامنه ۱۵/۲۸ - ۴/۱۹ درصد قرار داشت. این در حالی بود که این شاخص در نشاسته اولیه مورد استفاده معادل ۲/۰۰ درصد به دست آمد. مدل خطی با اثرات متقابل برای توصیف اثر دما، pH و غلظت واکنشگر بر انحلال در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد نشاسته فسفریله تولید شده معنی دار گردید ($p < 0.05$).

آنالیز واریانس نشان داد که اثر دما بی معنی ولی اثر pH و غلظت واکنشگر معنی دار بود ($p < 0.05$). در بین اثرات متقابل نیز تنها اثر pH-غلظت معنی دار بود ($p < 0.05$). همانطور که شکل ۱ نمایان است، افزایش pH موجب کاهش میزان

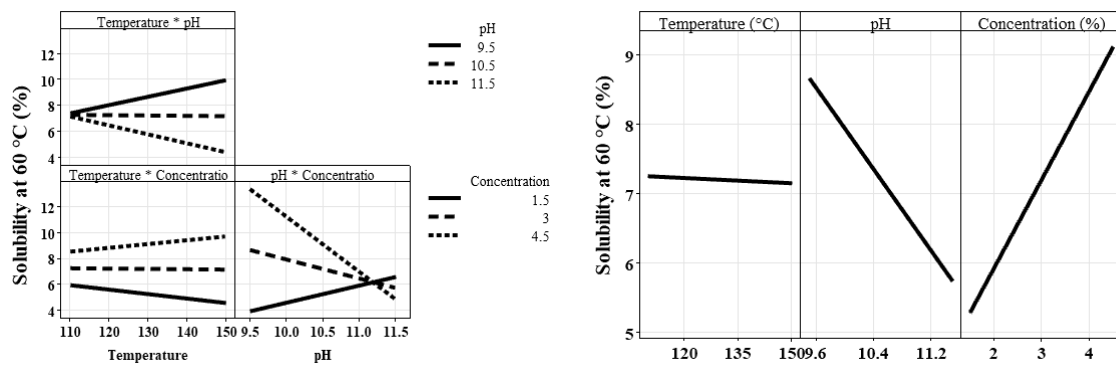


Fig 1. Simple and reciprocal effects of temperature, pH and reactant concentration on the solubility rate of phosphorylated wheat starch at 60°C.

انحلال نشاسته فسفریله در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد مدل خطی با اثرات متقابل معنی دار شد ($p < 0.05$).

از طرف دیگر حالاتیت نشاسته طبیعی در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد معادل ۳/۵۷ درصد برآورد گردید. این پارامتر در نشاسته های فسفریله شده، ۲۲/۷۵ – ۱/۳۹ درصد بود؛ همچنین به منظور توصیف اثر دما، pH و غلظت واکنشگر بر

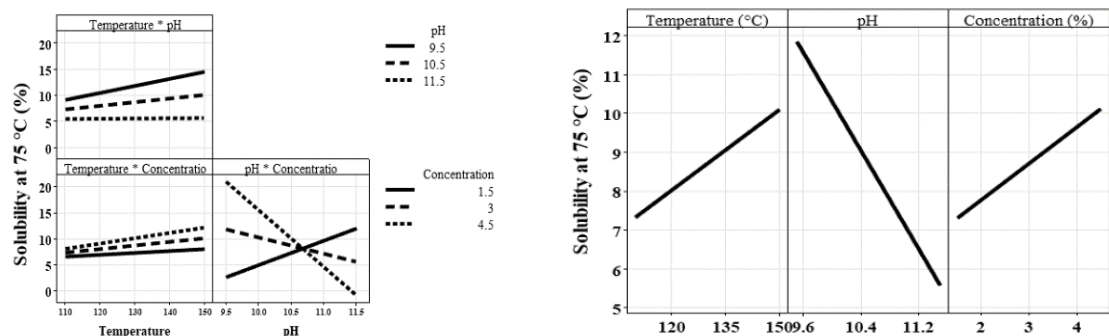


Fig 2. Simple and reciprocal effects of temperature, pH and reactant concentration on the solubility rate of phosphorylated wheat starch at 75°C.

معنی داری بین میزان انحلال در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد و میزان فسفریله شدن وجود نداشت.

$$\begin{aligned} \text{Solubility at } 75^{\circ}\text{C} (\%) = & -215.0 + 0.687 T + 21.00 \text{ pH} \\ & + 52.93 C - 0.0651 T * \text{pH} + 0.0221 T * C \\ & - 5.225 \text{ pH} * C \end{aligned}$$

از سوی دیگر دامنه تغییرات حالاتیت در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد نشاسته های فسفریله شده ۲۴/۶۰ – ۴/۱۳ درصد، بود؛ درحالی که این مقدار در نشاسته خام اولیه ۴/۹۸ درصد

طبق آنالیز واریانس داده ها، تنها اثر خطی pH و اثر متقابل pH – غلظت واکنشگر بر انحلال در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد نشاسته فسفریله شده معنی دار بود ($p < 0.05$). اثر خطی pH به طوری بود که افزایش pH موجب کاهش انحلال در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد نشاسته فسفریله گردید. با توجه به شکل ۲ و نیز ضریب منفی معادله، اثر متقابل pH – غلظت واکنشگر می توان نتیجه گرفت که این اثر از نوع آنتاگونیستی است. نتایج نشان داد که همبستگی

در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد نشان داد که افزایش مقدار pH موجب کاهش میزان انحلال در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد نشاسته‌های فسفریله شده گردید. ضریب منفی عبارت مقدار pH و غلظت واکنشگر در رابطه برازش شده نشان داد که این اثر متقابل از نوع آنتاگونیستی است (شکل ۳). ضریب همبستگی بین میزان فسفریله شدن نمونه‌ها و میزان انحلال در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد معنی‌دار ($p < 0.05$) و ۰/۵۰۳ بود.

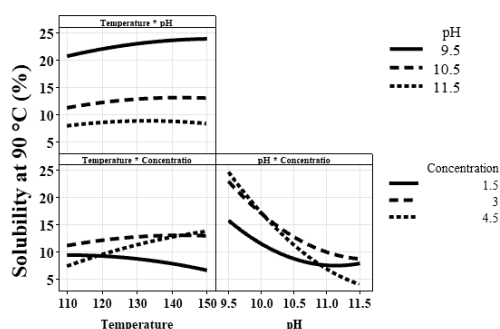
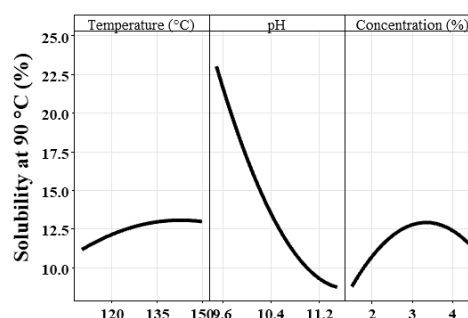


Fig 3. Simple and reciprocal effects of temperature, pH and reactant concentration on the solubility rate at 90°C of phosphorylated wheat starch.

همکاران (۲۰۲۱) اثر ماده ایجاد کننده اتصال عرضی (هگزامتافسفات سدیم) را بر خصوصیات نشاسته موز بررسی کردند این محققین دریافتند که ایجاد اتصال عرضی به دلیل افزایش فضای بین زنجیره‌های نشاسته‌ای ناشی از ممانعت فضایی این ترکیب اضافه شده به مولکول نشاسته سبب افزایش ظرفیت جذب آب و ظرفیت جذب روغن شد [۳۲]. در مقابل رادی و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که اتصال عرضی نشاسته سیب زمینی با PoCl_3 ، به دلیل تشکیل پیوند کووالانسی و ایجاد مقاومت در برابر تحرک ناحیه آمورف گرانول نشاسته، ظرفیت جذب آب را به طور قابل توجهی نسبت به نشاسته طبیعی کاهش داد [۳۱].

بود. همچنین برای توصیف اثر متغیرهای مورد بررسی بر مقدار انحلال در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد نمونه‌های فسفریله شده مدل‌های خطی با اثرات متقابل و درجه دو معنی‌دار گردید ($p < 0.05$).

آنالیز واریانس نشان داد که اثر خطی مقدار pH، مربع مقدار pH و غلظت واکنشگر و نیز اثر متقابل مقدار pH و غلظت واکنشگر بر میزان انحلال در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد معنی‌دار بود ($p < 0.05$). نتایج اثر مقدار pH بر میزان انحلال



به طور کلی بررسی همبستگی بین میزان انحلال نمونه‌های نشاسته فسفریله شده و میزان فسفریله شدن نشاسته نشان داد که انحلال پذیری نشاسته فسفریله شده همبستگی مستقیم با میزان فسفریلاسیون دارند و با افزایش فسفریلاسیون، میزان انحلال پذیری افزایش می‌یابد (شکل ۴). محققان همچنین اظهار داشتند که وجود گروه فسفر آبدوست، مسئول افزایش ظرفیت نگهداری نشاسته اتصال عرضی STMP/STPP می‌باشند و همچنین قرار گرفتن این گروه‌ها بر مولکول نشاسته به دافعه الکترواستاتیکی بین زنجیره‌های نشاسته کمک می‌کند و در نتیجه جذب و تورم بیشتر آب را تسهیل می‌کنند و افزایش درصد حلالیت را به دنبال دارند [۳۱]. اولاووی و

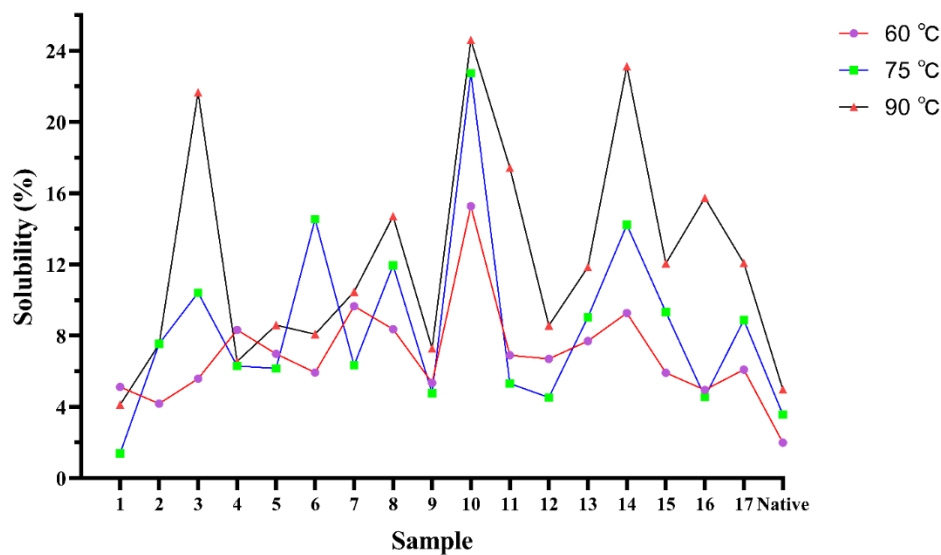


Fig 4. Solubility of native and crosslinked starch samples.

بود، درحالی که این مقدار برای نشاسته خام اولیه ۵/۵۴g/g برآورد شد. در خصوص اثر تغییرات دما، pH و غلظت واکنشگر بر میزان قدرت تورم در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد مدل خطی با اثرات متقابل معنی دار گردید ($p < 0.05$).

۳-۳- قدرت تورم

یافته‌ها نشان داد که قدرت تورم در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد برای نشاسته‌های فسفریله از ۱۲/۷۹ g/g تا ۴/۸۵

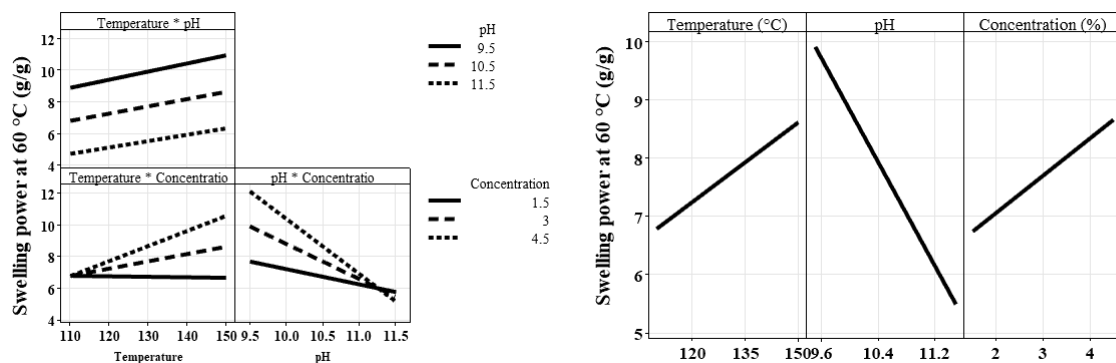


Fig 5. Simple and reciprocal effects of temperature, pH and reactant concentration on swelling power at 60°C temperature of phosphorylated wheat starch.

داشتند. اثر متقابل دما-غلظت واکنشگر از نوع سینرژیستی و اثر متقابل مقدار pH-غلظت واکنشگر از نوع آنتاگونیستی بود (شکل ۵). از طرف دیگر ضریب همبستگی بین قدرت تورم در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد و میزان فسفریلاسیون ۰/۷۲۰ به دست آمد.

نتایج حاصل از آنالیز واریانس نشان داد که، اثرات متقابل دما-غلظت واکنشگر و مقدار pH-غلظت واکنشگر معنی دار بود درحالی که اثر متقابل دما-مقدار pH نبود ($p < 0.05$). دما و غلظت واکنشگر اثر افزایشی و در مقابل، مقدار pH اثر کاهشی بر میزان قدرت تورم در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد

درجه سانتیگراد معنی دار گردید. همانطور که در شکل ۶ نمایان است با افزایش مقدار pH، قدرت تورم در دمای ۷۵ درجه سانتیگراد کاهش یافت ($p < 0.05$). ضریب همبستگی بین قدرت تورم در دمای ۷۵ درجه سانتیگراد و میزان فسفریلاسیون معادل ۰/۵۴۳ بود.

میزان قدرت تورم نشاسته طبیعی در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد ۷/۵۹ درصد بود؛ درحالی که این شاخص برای نشاسته های فسفریله شده در دامنه $14/14 - 6/04$ g/g قرار داشت. از سوی دیگر مدل خطی به منظور توصیف اثر دما، مقدار pH و غلظت واکنشگر بر قدرت تورم در دمای ۷۵

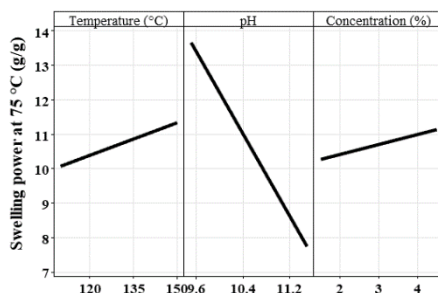


Fig 6. Simple effects of temperature, pH and reactant concentration on swelling power of phosphorylated wheat starch at 75°C.

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که اثر خطی و متقابل مقدار pH و غلظت واکنشگر بر قدرت تورم در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد معنی دار بود. این دو عامل عکس یکدیگر عمل کردند به طوری که افزایش مقدار pH و غلظت واکنشگر به ترتیب موجب کاهش و افزایش قدرت تورم در این دما شدند (شکل ۷). به این ترتیب اثر آنتاگونیستی مشاهده شده بین این مقدار pH و غلظت واکنشگر قابل انتظار است. از سوی دیگر قدرت تورم در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد با میزان فسفریله شدن نشاسته با ضریب ۰/۴۹۸ همبستگی نشان داد.

از طرف دیگر نتایج نشان داد که محدوده تغییرات قدرت تورم نشاسته های فسفریله در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد در دامنه $18/73 - 6/69$ g/g قرار داشت؛ درحالی که این میزان در نشاسته خام اولیه $9/81$ g/g بود. از طرف دیگر به منظور بررسی اثرات شرایط واکنش بر میزان قدرت تورم در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد مدل خطی با اثرات متقابل معنی دار گردید ($p < 0.05$).

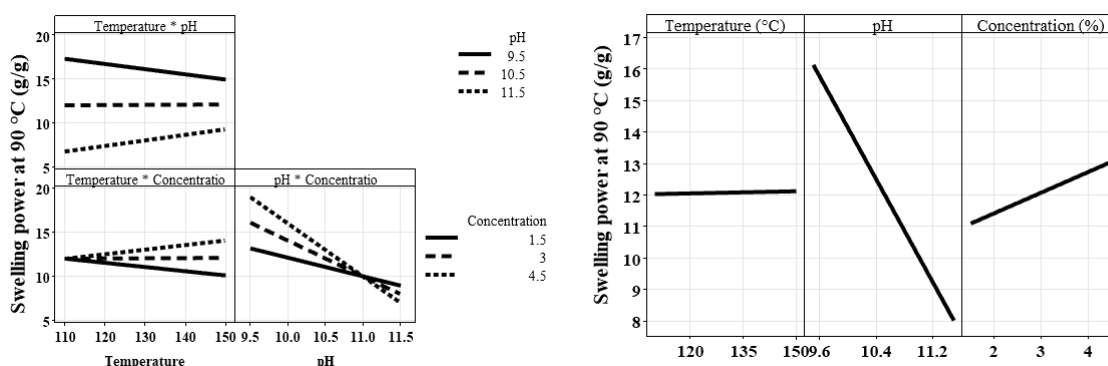


Fig 7. Simple and reciprocal effects of temperature, pH and reactant concentration on swelling power of phosphorylated wheat starch at 90°C.

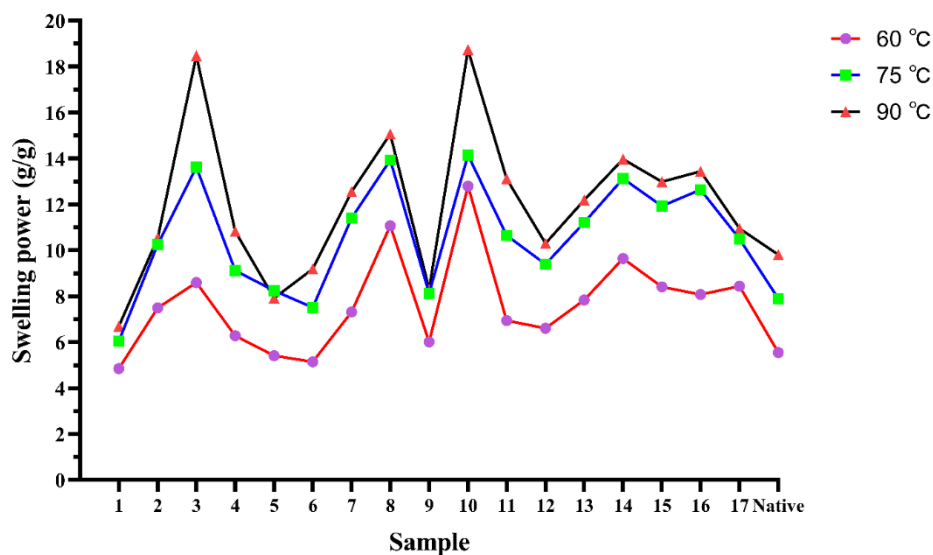


Fig 8. Swelling power of native and crosslinked starch samples.

تورم نسبت به نشاسته طبیعی شد [۳۴]. درحالی که سینگ و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که با افزایش درجه اتصال عرضی به دلیل تشکیل پل‌های بین مولکولی در زنجیره‌های نشاسته‌ای توسط معرف اتصال عرضی قدرت تورم نشاسته لوبیا پروانه ای^{۱۰} کاهش یافت [۳۵]. هیرش و همکاران (۲۰۰۲) با بررسی تاثیر نوع ترکیب ایجاد کننده اتصالات عرضی بر رفتار قدرت تورم نشاسته ذرت واکسی مشاهده کردند که هر دو ترکیب $POCl_3$ و STMP باعث کاهش میزان تورم گرانول‌های نشاسته گردیده‌اند و همبستگی معکوسی بین غلظت این ترکیبات با میزان تورم وجود داشته است اما میزان این همبستگی معکوس بین غلظت و میزان تورم در نشاسته‌های تیمار شده با $POCl_3$ بسیار قوی‌تر از STMP بوده است. محققان علت این امر را ناشی از تفاوت مکانیکی^{۱۱} در واکنش اتصال عرضی دانسته‌اند و بیان کرده‌اند که تاثیر اتصالات عرضی بر ساختار گرانول بوسیله $POCl_3$

در مجموع، نتایج تجزیه و تحلیل همبستگی بین قدرت تورم در دماهای مختلف و درجه فسفریلاسیون نشاسته تولید شده نشان دهنده همبستگی مثبت بود. مشخص شد که با افزایش درجه فسفریلاسیون، قدرت تورم نشاسته‌ها نیز افزایش می‌یابد (شکل ۸). بنابراین می‌توان اینگونه بیان کرد که رابطه مستقیمی بین مقدار فسفریلاسیون و قدرت تورم نشاسته‌ها وجود دارد. علاوه بر این، اعتقاد بر این است که معرفی گروه‌های فسفات به گرانول‌های نشاسته به افزایش قدرت تورم کمک می‌کند؛ چراکه دافعه میان مولکول‌های نشاسته مجاور که ناشی از گروه‌های فسفات با بار منفی می‌باشد، اتصالات درون زنجیره ای را کاهش داده و در نهایت منجر به افزایش قدرت تورم می‌گردد [۳۳].

بر اساس نظر ایویاجونوا و همکاران (۲۰۲۳)، ایجاد اتصال عرضی بر نشاسته استخراج شده از دو غده (ایکاسینا سنگالنسیس^۸ و سیرتوسپرما سنگال^۹) سبب افزایش قدرت

10. Moth bean Starch

11. Mechanistic difference

8. *Icacina senegalensis*

9. *Cyrtosperma senegalense*

که یک واکنشگر بسیار سریع است در مقایسه با STMP که واکنشگر آهسته تری است متفاوت می باشد. محققان همچنین بیان کرده اند که ظاهراً اتصالات عرضی حاصل از POCl_3 در مقایسه با STMP در جلوگیری از تورم نشاسته بسیار موثرتر عمل کرده اند. محققان مذکور در توضیح این پدیده ادعا کردند که غلظت بالایی از اتصالات عرضی حاصل از تیمار POCl_3 در سطح گرانول وجود دارد که منجر به ایجاد پوسته ای سخت در لایه های بیرونی گرانول می گردد اما STMP که یک واکنشگر کندتر می باشد به درون گرانول ها نفوذ کرده و از این رو اتصالات عرضی حاصل از این ماده تاثیر بسیار پراکنده تری دارند زیرا این اتصالات به طور یکنواخت در سراسر حجم گرانول توزیع می گردند [۳۶].

۳-۴- شفافیت

شفافیت خمیر نشاسته طبیعی گندم $3/79$ درصد تعیین گردید؛ درحالی که این مقدار برای نشاسته های فسفریله شده از $1/15$ تا $10/55$ متغیر بود. از طرف دیگر به منظور بررسی اثر متغیرهای واکنش (دما، مقدار pH و غلظت واکنشگر) بر میزان شفافیت خمیرهای نشاسته فسفریله شده مدل خطی با اثرات متقابل معنی دار گردید. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که تنها اثر خطی مقدار pH و اثر متقابل مقدار pH-غلظت واکنشگر معنی دار بود ($p < 0.05$). به طوری که مقدار pH اثر کاهشی بر شفافیت نمونه ها نشان داد. شدت اثر مقدار pH تحت تاثیر غلظت واکنشگر قرار داشت و با افزایش غلظت واکنشگر شیب نمودار و در نتیجه اثر مقدار pH افزایش یافت (شکل ۹). باتوجه به ضریب همبستگی به دست آمده بین میزان فسفریله شدن و شفافیت ژل نشاسته ($0/562$)، با افزایش میزان فسفریلاسیون میزان شفافیت ژل افزایش یافت.

افزایش شفافیت ژل با افزایش میزان فسفریلاسیون را می توان به گروه های فسفات باردار نسبت داد که به هیدراسیون مولکول های نشاسته و کاهش سرعت تبلور مجدد آنها کمک می کند. علاوه بر این، این گروه های فسفات می توانند پیوندهای بین مولکول های نشاسته و آب را تقویت کرده و منجر به افزایش قدرت تورم و شفافیت خمیر شود [۳۷]. از سوی دیگر کائور و همکاران (2006)، کاهش شفافیت ژل نشاسته اتصال عرضی یافته را تا حدی ناشی از کاهش قدرت تورم دانسته اند [۲۴، ۳۳]. در این مطالعه افزایش میزان شفافیت ژل با افزایش میزان فسفریلاسیون را می توان مرتبط با افزایش قدرت تورم گرانول ها دانست. ضرایب همبستگی میزان شفافیت ژل و قدرت تورم نشاسته در دماهای 90 ، 75 و 60 به ترتیب برابر با $0/882$ ، $0/821$ و $0/864$ است ($p < 0.05$) که موید افزایش شفافیت ژل به دلیل افزایش قدرت تورم می باشد (همانطور که در بالا اشاره شد در میزان قدرت تورم با افزایش فسفریلاسیون افزایش یافت).

محفوظ و همکاران (2020) گزارش کردند که نشاسته جو اتصال عرضی یافته با STMP/STPP نسبت به نشاسته طبیعی، به دلیل قدرت تورم بالاتر (گرانول های بسیار متورم اجازه عبور بهتر نور را می دهند) شفافیت ژل بیشتر و تمایل کمتر به رتروگراسیون نشان داد [۳۸]. به طور مشابه چنک و همکاران (2022) دریافتند که نشاسته دانه نیلوفر آبی اتصال عرضی یافته با غلظت های مختلف STMP، شفافیت ژل بیشتر و نرخ رتروگراسیون کمتری را نسبت به نشاسته طبیعی نشان داد [۳۹].

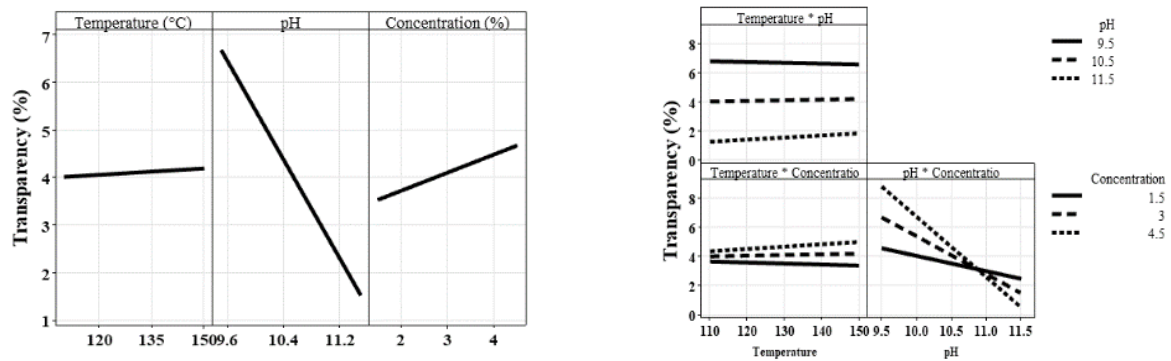


Fig 9. Simple and reciprocal effects of temperature, pH and reactant concentration on the transparency of phosphorylated wheat starch paste.

۳-۵- سینرسیس

سرپرابلوم و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که اتصال عرضی نشاسته کاساوا با غلظت کمتر STMP/STPP به طور قابل توجهی سرعت رتروگراداسیون و آب اندازی ژل نشاسته را کاهش داد. با این حال، غلظت بالاتر STMP/STPP تغییر قابل توجهی را نسبت به نشاسته طبیعی نشان نداد. اتصال عرضی با میزان کم، تحرک زنجیره‌های نشاسته را محدود می‌کند و می‌تواند رتروگراداسیون را به تاخیر بیندازد. با این حال، غلظت بالاتر ساختار بسته‌تری را به ارمغان می‌آورد که توانایی پیوند هیدروژنی بین زنجیره‌های نشاسته را افزایش می‌دهد و سرعت رتروگراداسیون را افزایش می‌دهد [۴۰].

همانطور که در شکل ۱۰ نمایان است، میزان آب اندازی نمونه نشاسته طبیعی گندم ۳۳/۶۴ درصد بود؛ اصلاح فسفریلاسیون با شرایط مختلف واکنش این مقدار را به محدوده ۷۱/۶۲ – ۲۹/۵۶ منتقل کرد. مدل درجه دوم نیز به منظور تفسیر تأثیر شرایط واکنش (اثر دما، مقدار pH و غلظت واکنشگر) بر میزان آب اندازی نمونه‌های نشاسته فسفریله معنی‌دار شد ($p < 0.05$). از طرف دیگر نتایج تجزیه واریانس نشان داد که، تنها اثر خطی و مربع مقدار pH بر آب اندازی معنی‌دار بود ($p < 0.05$). به طوری که با افزایش مقدار pH، میزان آب اندازی نمونه‌ها افزایش یافت (شکل ۱۱).

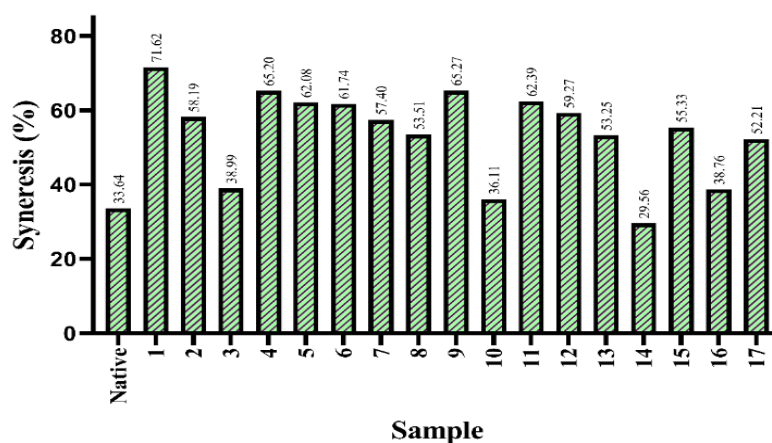
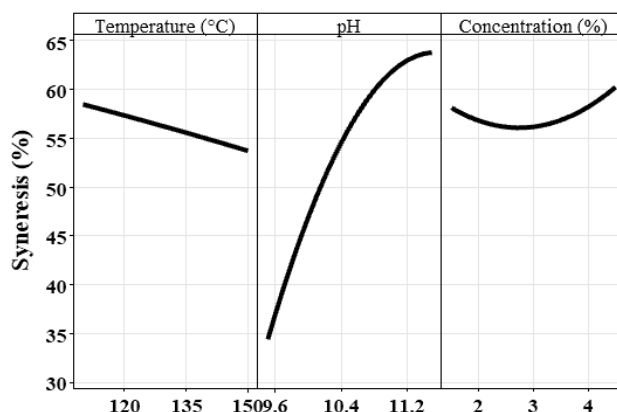


Fig 10. Syneresis of native and crosslinked starch samples.**Fig 11.** Effects of temperature, pH and reactant concentration on the syneresis of phosphorylated wheat starch.

افزایشی نشان داد. از طرف دیگر هیچ همبستگی بین میزان آب اندازی پس از انجماد-ذوب با میزان فسفریلاسیون وجود نداشت ($p < 0.05$).

شوفان و همکاران (۲۰۲۲) در یافتند که ورود گروه فسفات به مولکول نشاسته آجیل ببر^{۱۲} با تشکیل شبکه سه بعدی و ایجاد ممانعت فضایی موجب پایدارتر شدن سیستم شد [۴۲]. در مقابل، اوه و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که اتصال عرضی نشاسته شاه بلوط با STMP/STPP باعث کاهش پایداری انجماد و ذوب آن شد. سینرسیس بیشتر نشاسته اتصال عرضی یافته می‌تواند به دلیل تورم محدود نشاسته اتصال عرضی یافته باشد که منجر به آزاد شدن مقدار نسبتاً زیادی آب می‌شود [۴۳].

ناکالا و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که نشاسته فسفریله شده زردچوبه پایداری انجماد و ذوب بالاتری نسبت به نشاسته طبیعی نشان داد زیرا گروه‌های فسفات دارای بار مثبت و آبدوست هستند و در نتیجه پس از ژلاتینه شدن و سپس انجماد، ژل سه بعدی را تشکیل می‌دهند [۴۴].

۳-۶- پایداری انجماد-ذوب

پایداری محصولات غذایی حاوی نشاسته در طول فرآیند انجماد و ذوب یک ویژگی مهم است که بر خواص بافتی آنها تأثیر می‌گذارد. در هنگام انجماد، آب موجود در نشاسته به یخ تبدیل می‌شود و در حین ذوب، آب حاصل به راحتی از ماتریکس خارج می‌شود که به عنوان سینرسیس شناخته می‌شود. جداسازی فاز منجر به پیوند مجدد و تبلور مجدد زنجیره‌های نشاسته می‌شود. از این رو، انجماد-ذوب مکرر باعث جدایی فاز و سینرسیس و پسرفت می‌شود [۴۱]. نتایج نشان داد که اصلاح فسفریلاسیون میزان آب اندازی پس از انجماد-ذوب را از ۳۱/۲۶ درصد برای نشاسته طبیعی به محدوده ۶۵/۷۶ - ۱۰/۰۵ تغییر داد. علاوه بر این به منظور تفسیر شرایط واکنش (دما، مقدار pH و غلظت واکنشگر) بر میزان آب اندازی پس از طی شرایط انجماد و ذوب نمونه‌های نشاسته فسفریله مدل خطی معنی‌دار ($p < 0.05$) گردید. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که تنها اثر مقدار pH بر آب اندازی پس از انجماد-ذوب معنی‌دار بود ($p < 0.05$) و همانطور که در شکل ۱۲ نمایان است اثر خود را به صورت

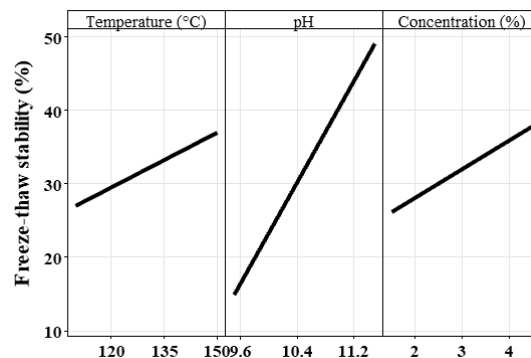


Fig 12. The effect of temperature, pH and reactant concentration on the Freeze-thaw stability of phosphorylated wheat starch.

۳-۷- محتوای فسفر

فسفریله شدن نشاسته گندم معنی دار گردید ($p < 0.05$). از سوی دیگر نتایج آنالیز واریانس نشان داد که اثر هر سه عامل مورد بررسی معنی دار بود ($p < 0.05$) به طوری که مطابق شکل ۱۳ با افزایش دما و غلظت واکنشگر، میزان فسفریله شدن افزایش و با افزایش pH این میزان کاهش یافت.

کیم و همکاران (۱۹۹۹) تاثیر دما را بر فسفریلاسیون نشاسته برنج به روش اکستروژن مورد بررسی قرار داده و بیان کردند که با افزایش دمای اکستروژن از ۱۲۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی گراد میزان فسفریلاسیون افزایش می یابد [۴۵]. محمد و همکاران (۲۰۰۰) تاثیر pH را بر فسفریلاسیون نشاسته ساگو با استفاده از STMP و STPP به صورت جداگانه و یا در ترکیب با یکدیگر مورد بررسی قرار دادند. این محققان بیان کردند که در زمان استفاده از STMP به تنهایی، افزایش pH از ۶ تا ۱۰ باعث افزایش میزان فسفریلاسیون شد اما استفاده از ترکیب STMP و STPP در همین دامنه pH، منجر به کاهش میزان فسفریلاسیون گردید [۴۶].

خواص نشاسته های اصلاح شده به طور قابل توجهی تحت تاثیر کمیت هر نوع جایگزینی شیمیایی اعمال شده قرار می گیرد و تنظیم درصد جایگزینی شیمیایی خاص بر روی یک نوع خاص از نشاسته می تواند منجر به ایجاد خواص مختلف شود [۸]. کارایی واکنش ایجاد اتصالات عرضی با درجه جایگزینی نشان داده می شود، که نشان دهنده مقدار مول های فسفات اتصال عرضی یافته موجود در گلوکز بدون آب (انیدرید گلوکز) است. درجه جایگزینی نشاسته اصلاح شده با کم کردن درصد فسفر درونی از نشاسته طبیعی محاسبه می شود، زیرا نشاسته طبیعی حاوی مقادیر مشخصی مونو استر فسفات است. در این مطالعه، محدوده تغییرات مقدار فسفریلاسیون ۱/۳۴-۰/۲۷ درصد برآورد شد و میزان فسفر ذاتی موجود در نشاسته گندم مورد استفاده نیز ۰/۰۴۷ درصد بود (شکل ۱۳). نتایج آنالیز داده ها نشان داد که مدل خطی برای بررسی اثرات دما، مقدار pH و غلظت واکنشگر بر میزان

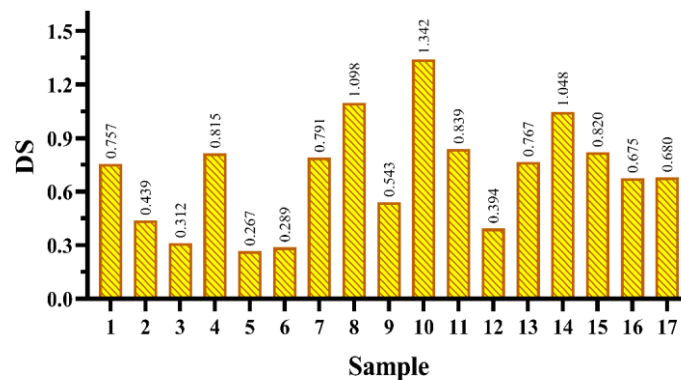


Fig 13. Degree of substitution of cross-linked starches

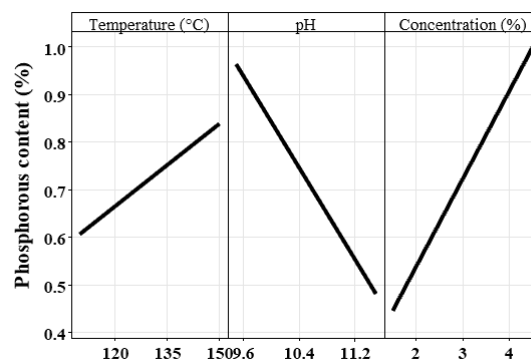


Fig 14. The effect of temperature, pH and reagent concentration on the degree of phosphorylation of wheat starch.

نتایج نشان داد که فسفریلاسیون نشاسته سبب کاهش مقدار محتوای آمیلوز نشاسته طبیعی از ۲۵/۷۸ درصد به ۲۲/۴۳ شد؛ چراکه وجود پیوندهای فسفودی استر در زنجیره‌های نشاسته سبب کاهش تشکیل کمپلکس‌های آمیلوز ید شد و در نتیجه محتوای آمیلوز را کاهش داد. علاوه بر این، کاهش محتوای آمیلوز را می‌توان به ایجاد پیوندهای متقابل بین زنجیره‌های آمیلوز و آمیلوپکتین نسبت داد که از تعامل ساختار با ید جلوگیری می‌کند [۴۷]. آکار و همکاران (۲۰۱۰) بیان کردند که میزان آمیلوز نشاسته گندم طبیعی گلوبیکا^{۱۳} ۲۰/۲۷ و نشاسته طبیعی سرپانجکا^{۱۴} ۲۲/۴۹

با توجه به نتایج آزمون‌های فیزیکوشیمیایی، ویژگی‌های نشاسته مورد استفاده در فرمولاسیون سس به عنوان ملاک بهینه سازی قرار داده شد؛ نشاسته فسفریله شده با قدرت تورم بالاتر، شفافیت بیشتر خمیر، سینرسیس کمتر ژل و پایداری انجماد - ذوب بالاتر انتخاب گردید؛ سپس به منظور بررسی خصوصیات ریخت شناسی، ساختاری، حرارتی، ژل دهندگی و خمیری شدن آزمون‌های تکمیلی بر روی نمونه بهینه و نشاسته طبیعی انجام شد.

۳-۸- محتوای آمیلوز و سختی ژل

می‌باشد و این میزان برای ژنوتیپ‌های مختلف نشاسته گندم متغیر است [۴۸].

چندک و همکاران (۲۰۲۲) دریافتند که محتوای آمیلوز نشاسته لتوس با افزایش غلظت STMP از ۱ به ۵ درصد به طور قابل توجهی کاهش یافت و در محدوده بین ۱۳/۴۵ و ۲۵/۱۶ درصد قرار گرفت؛ این محققین بیان کردند که کاهش مقادیر محتوای آمیلوز نشاسته‌های اتصال عرضی یافته به دلیل برهمکنش‌های درون مولکولی و بین مولکولی در مولکول‌های آمیلوز یا بین مولکول‌های آمیلوز و آمیلوپکتین است [۳۹]. همچنین مطالعه شارما و همکاران (۲۰۲۰) نیز نشان داد که ایجاد اتصال عرضی (STMP) سبب کاهش محتوای آمیلوز نشاسته باقلا شد [۴۹].

مفهوم سفتی به توانایی مواد غذایی در مقاومت در برابر نیروی فشاری اشاره دارد. با افزایش استحکام ژل، مقدار نیروی لازم برای شکستن ساختار آن نیز افزایش می‌یابد [۵۰]. نتایج نشان داد که اصلاح اتصال عرضی سبب افزایش سفتی ژل نشاسته فسفریله (۰/۸۴ نیوتن) در مقایسه با نشاسته

طبیعی (۰/۲۱ نیوتن) شد (جدول ۳). افزایش سفتی ژل نشاسته فسفریله نسبت به نشاسته طبیعی را می‌توان به این دلیل دانست که کاهش مقدار آمیلوز محلول منجر به ژل نرم‌تر می‌شود، درحالی‌که آمیلوز بیشتری از گرانول‌های نشاسته به فضای بین گرانولی نشت می‌کند و شبکه ژل قوی‌تری را تشکیل می‌دهد و در نهایت منجر به ژل سفت‌تر از نشاسته طبیعی می‌شود.

از سوی دیگر سفتی ژل عمدتاً ناشی از رتروگراداسیون ژل نشاسته است که با تبلور مجدد آمیلوپکتین همراه است و منجر به ژل‌های سخت‌تر می‌شود [۵۱]. بر اساس نظر موآ و جکسون (۱۹۹۷) نشاسته‌هایی که زنجیره‌های آمیلوپکتین طولانی‌تری دارند، ژل‌های سخت‌تری را تشکیل می‌دهند [۵۲]. سفتی ژل بالاتر نشاسته فسفریله در مقایسه با نشاسته طبیعی، افزایش تمایل این نشاسته به تشکیل ژل و همچنین مقادیر بالاتر ویسکوزیته نهایی و بازگشت ویسکوزیته را تایید می‌کند.

Table 3. Amylose content and gel hardness of native and phosphorylated wheat starch.

Sampel	Amylose (%)	Firmness of the gel (N)
Native starch	25.78 ± 1.31 ^a	0.21 ± 0.41 ^b
Phosphorylated Starch	22.43 ± 0.72 ^b	0.84 ± 0.34 ^a

معمول در بخش‌های آمورف گرانول‌های نشاسته بدون تأثیر بر الگوی کریستالی رخ می‌دهد [۵۳].

یافته‌ها نشان داد که نشاسته‌های اتصال عرضی یافته در مقایسه با نشاسته طبیعی، بلورینگی کمتری (RC) از خود نشان می‌دهند. این امر به کاهش پیوند هیدروژنی در ساختار کریستالی گرانول‌های نشاسته گندم نسبت داده شد (جدول ۴). مجذوبی و همکاران (۲۰۰۹) بیان کردند که عامل اتصال عرضی، که به عنوان یک پل عمل می‌کند، می‌تواند فاصله بین مولکول‌های نشاسته را بدون تغییر ساختار کریستالی نشاسته در داخل گرانول‌ها کاهش دهد. علاوه بر این، اتصال عرضی

۳-۹- پراش اشعه ایکس و درصد بلورینگی

الگوهای پراش نوع A با قله‌های ۱۵، ۱۷، ۱۸ و ۲۳ درجه برای نشاسته‌های طبیعی و اتصال عرضی یافته در شکل ۱۵ نشان داده شده است. الگوی پراش نشاسته‌های اتصال عرضی یافته مشابه نشاسته طبیعی بود. این نتایج نشان داد که ایجاد اتصالات عرضی، الگوی کریستالی نشاسته را تغییر نداد. بر اساس نظر چن و همکاران (۲۰۱۷) اتصال عرضی به طور

طول فرآیند پیوند متقابل ایجاد می‌شود، اندکی کاهش یافت [۳۹]. در مقابل مطالعه کامویه و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که نشاسته سورگوم اتصال عرضی یافته بلورینگی بالاتری نسبت به نشاسته طبیعی خود دارد. این محققین دلیل این افزایش را معرفی گروه عاملی پس از اصلاح شیمیایی دانستند که عمدتاً این اصلاح در ناحیه آمورف گرانول نشاسته رخ داده و سبب تخریب مولکول‌های نشاسته شد [۵۴].

ممکن است عمدتاً در مناطق آمورف گرانول‌های نشاسته اتفاق بیفتد چراکه این مناطق به آسانی برای معرف‌های اتصال عرضی در دسترس هستند [۲]. چندک و همکاران (۲۰۲۲) اثر غلظت‌های مختلف ماده ایجاد کننده اتصال عرضی را بر نشاسته لتوس بررسی کردند. این محققین دریافتند که مقادیر بلورینگی با افزایش سطح ماده ایجاد کننده اتصال عرضی، به دلیل اصلاح شیمیایی و تغییرات در ساختار کریستالی که در

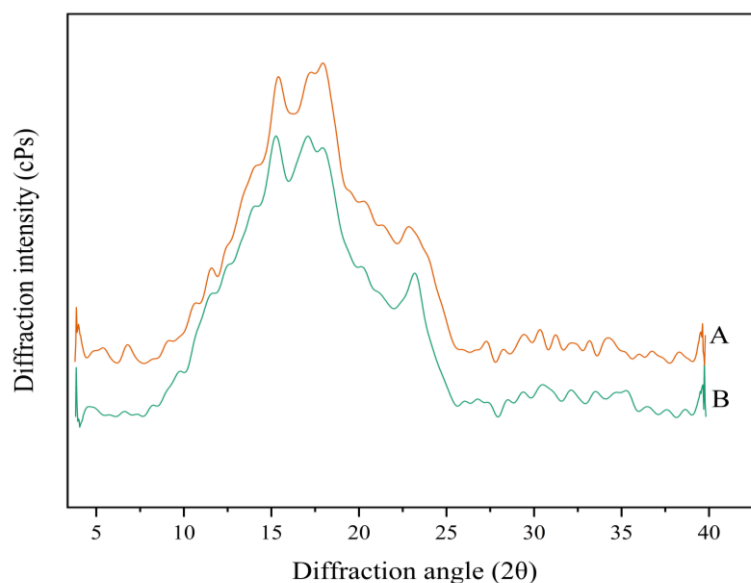


Fig 15. X-ray diffraction pattern of native (A) and phosphorylated wheat starch (B).

۱- طول موج 3427cm^{-1} ، ارتعاشات کششی گروه‌های هیدروکسیل درونی (O-H)؛ ۲- طول موج 2926cm^{-1} ، کشش نامتقارن پیوند کربن-هیدروژن (C-H)؛ ۳- طول موج 1640cm^{-1} ، ارتعاشات خمشی H-O-H در مناطق آمورف نشاسته (مربوط به آب جذب شده منطقه آمورف گرانول‌های نشاسته)؛ ۴- طول موج‌های 1363cm^{-1} و 1338cm^{-1} ، کشش C-H؛ ۵- 1242cm^{-1} ، کشش C-OH، CH₂OH؛ ۶- محدوده $1160-1100\text{cm}^{-1}$ کشش نامتقارن C-O-C؛ ۷- پیک‌های $1077-928\text{cm}^{-1}$ به کشش C-O، C-O-H در نشاسته اختصاص داده می‌شود [۵۵].

نتایج نشان داد که هیچ تفاوت مشخصی بین نوارهای ارتعاشی O-H، C-H و C-O در نشاسته‌های طبیعی و

۳-۱۰- FTIR

طیف FTIR نمونه‌ها برای بررسی تغییرات در ساختار مولکولی نشاسته اتصال عرضی یافته در مقایسه با نشاسته طبیعی ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است طیف جذبی نشاسته طبیعی و فسفریله مشابه بود که این امر بیانگر این موضوع است که اصلاح اتصال عرضی گروه‌های شیمیایی جدیدی در ساختار نشاسته‌ای ایجاد نمی‌کند، بلکه فقط جذب پیک‌های خاصی را تشدید می‌کند. به منظور بررسی تغییرات شدت پیک‌ها، پیک‌های اصلی زیر در طیف FTIR نمونه‌های نشاسته گندم مورد توجه قرار گرفتند:

فسفریله وجود ندارد. این عدم تفاوت به عدم تغییر در ساختار شیمیایی مولکول ها در مقایسه با نشاسته طبیعی نسبت داده شد [۵۶]. اگر چه فسفریلاسیون سبب کاهش شدت پیک های 3264cm^{-1} ، 1640cm^{-1} و 994cm^{-1} نسبت به نشاسته طبیعی شد که دلیل این امر را می توان اختلال در پیوندهای هیدروژنی و معرفی گروه فسفات در بین گروه های هیدروکسیل نمونه های نشاسته دانست. به طور مشابه شالویری و همکاران (۲۰۱۰) کاهش شدت پیک در نشاسته اتصال عرضی یافته نسبت به نشاسته طبیعی را گزارش کردند [۵۷]. در مقابل جیوتی و همکاران (۲۰۰۶) مشاهده کردند که نوار کششی O-H در منطقه $3600 - 3700\text{cm}^{-1}$ در مقایسه با نشاسته طبیعی، در طیف نشاسته های اتصال عرضی یافته، گسترش یافته و تیزتر می باشد [۵۸].

از سوی دیگر شدت پیک های 997cm^{-1} و 1298cm^{-1} در نشاسته فسفریله نسبت به نشاسته طبیعی افزایش یافت، دلیل افزایش شدت این پیک ها در نشاسته اتصال عرضی یافته به دلیل پیوندهای ایجاد پیوند P-O-C می باشد. همچنین افزایش جزئی شدت پیک های نشاسته فسفریله در ناحیه $1300 - 1150\text{cm}^{-1}$ نسبت به نمونه نشاسته طبیعی به افزایش کشش متقارن پیوند فسفر-اکسیژن (P=O) نسبت داده شد؛ بنابراین کاهش شدت پیک در 3264cm^{-1} (ارتعاشات کششی -OH) و افزایش شدت پیک در $1300 - 1150\text{cm}^{-1}$ (کشش متقارن پیوند فسفر-اکسیژن (P=O)) نشان می دهد که نشاسته با STMP واکنش نشان داده است [۵۹].

از طرف دیگر شدت جذب پیک ها در 994cm^{-1} و 1082cm^{-1} را می توان به تغییرات در ساختار کریستالی و بلورینگی پلیمرهای نشاسته نسبت داد، درحالی که شدت جذب پیک در 1018cm^{-1} با ساختار مناطق آمورف گرانول های نشاسته مرتبط است [۶۰]. بنابراین، نسبت های جذب 1082cm^{-1} تا

1018cm^{-1} و 994cm^{-1} تا 1018cm^{-1} به ترتیب برای توصیف درجه نظم مناطق کریستالی گرانول های نشاسته (درجه نظم؛ DO) و محتوای ماریپیچ دوگانه (DD) استفاده می شوند. با این حال، نسبت جذب 1018cm^{-1} تا 994cm^{-1} با تغییرات داخلی در مناطق آمورف گرانول های نشاسته مرتبط است [۶۱].

شدت جذب پیک ها در 994cm^{-1} و 1082cm^{-1} با تغییرات در بلورینگی و کریستالی بودن پلیمرهای نشاسته مرتبط است، درحالی که شدت جذب پیک در 1018cm^{-1} به ساختار آمورف نواحی گرانول های نشاسته مرتبط است. در نتیجه، نسبت های جذب 1082cm^{-1} تا 1018cm^{-1} و 994cm^{-1} تا 1018cm^{-1} به ترتیب برای مشخص کردن درجه ترتیب نواحی کریستالی گرانول های نشاسته (درجه ترتیب؛ DO^{15}) و محتوای ماریپیچ دوگانه (DD^{16}) مورد استفاده قرار می گیرند. با این حال، نسبت جذب 1018cm^{-1} تا 994cm^{-1} با تغییرات داخلی در مناطق آمورف گرانول های نشاسته مرتبط است [۶۲].

پژوهش حاضر نسبت شدت پیک های نشاسته فسفریله شده را با نشاسته طبیعی مقایسه کرد و نشان داد که فسفریلاسیون با کاهش پیوندهای هیدروژنی در ساختار کریستالی گرانول های نشاسته گندم منجر به کاهش نسبت DO و DD با کاهش شدت پیک های نشاسته فسفریلاسیون به نسبت به نشاسته شد. از سوی دیگر، فسفریلاسیون با کاهش نظم در ساختار کریستالی گرانول های نشاسته گندم منجر به افزایش نسبت 1018cm^{-1} تا 994cm^{-1} شد که توسط پراش اشعه ایکس و تجزیه و تحلیل درصد بلورینگی تأیید شد. درحالی که مطالعه ی شی و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که مناطق آمورف گرانول های نشاسته با ایجاد اتصال عرضی کاهش می یابد. این محققین دلیل کاهش این مناطق را به هم تراز و ارتباط آمیلوز-آمیلاز و یا آمیلوز-آمیلوپکتین در مناطق آمورف نشاسته نسبت دادند؛ چراکه اصلاح ایجاد

اتصال عرضی ساختار مولکول‌های نشاسته را با فشرده تر کردن آنها در مقایسه با مولکول‌های نشاسته طبیعی تغییر داد [۲].

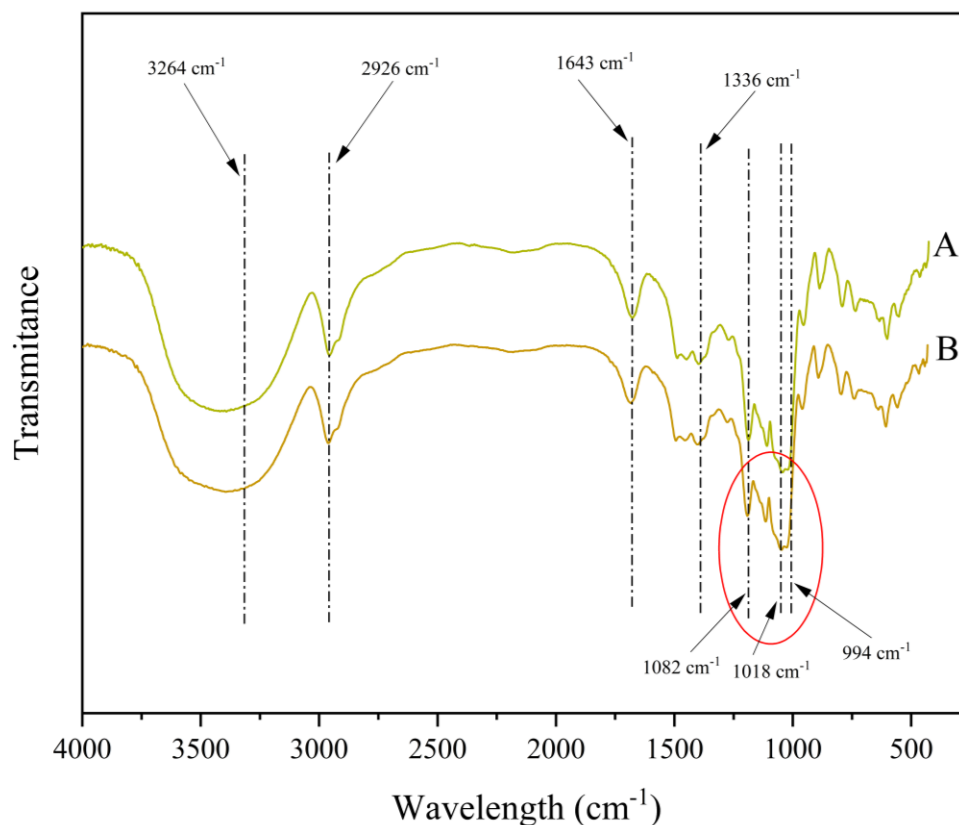


Fig 16. FT-IR spectra of native (A) and phosphorylated wheat starch (B).

Table 4. XRD and FTIR parameters of native and phosphorylated wheat starch.

Sampel	1082/1018 (DO)	994/1018 (DD)	1018/994 (Amorphous)	RC%
Native starch	1.38 ± 0.04^a	1.29 ± 0.02^a	0.83 ± 0.07^b	44.52 ± 0.57^a
Phosphorylated Starch	1.34 ± 0.09^b	1.20 ± 0.06^b	0.87 ± 0.08^a	41.22 ± 0.35^b

تفاضلی (DSC) مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۵). نتایج

نشان داد که اصلاح فسفریلاسیون نشاسته سبب افزایش

معنی‌دار T_o و T_p نسبت به نشاسته طبیعی شد که این امر را

می‌توان به معرفی گروه فسفات به مولکول‌های نشاسته و

تقویت برهمکنش بین مولکولی نسبت داد که این اصلاح

۳-۱۱- DSC

ویژگی‌های حرارتی دمای شروع (T_o)، اوج (T_p)، و نهایی

(T_e) ژلاتیناسیون و آنتالپی ژلاتیناسیون (ΔH) نشاسته طبیعی

و نشاسته اتصال عرضی یافته توسط کالری‌سنجی روبشی

سبب مهار ژلاتیناسیون نشاسته شد [۶۳]. در طی این عملیات اصلاحی، تقویت ساختار آمورف گرانول‌های نشاسته از طریق پیوند کووالانسی منجر به تشکیل یک ساختار داخلی بسیار آمورف و پیچیده شد. این امر کاهش دمای نهایی (T_c) و آنتالپی ژلاتینه شدن (ΔH) را به دنبال داشت. نتایج نسبت شدت پیک در تست طیف‌سنجی فوری و درصد بلورینگی این رابطه را تایید کرد و همبستگی مثبتی با نتایج آزمایش نشان داد [۵۳].

شارما و همکاران (۲۰۲۱) ویژگی‌های حرارتی نشاسته ارزن بارنارد^{۱۷} اتصال عرضی یافته با (STMP) در سطوح مختلف (۱، ۳ و ۵ درصد) را مورد مطالعه قرار دادند. این محققین دریافتند که ایجاد اتصال عرضی مقادیر T_o و T_p را افزایش داد، درحالی‌که مقادیر T_c و ΔH را کاهش داد. این محققین افزایش مقادیر T_o و T_p را به تقویت ارتباط مولکولی گرانول‌های نشاسته پس از اتصال عرضی نسبت دادند درحالی‌که این محققین دلیل کاهش T_c و ΔH را تشکیل ساختار داخلی بسیار آمورف و پیچیده دانستند [۶۴].

در مقابل، اولایمی و همکاران (۲۰۲۱)، دریافتند که با افزایش غلظت اسید سیتریک در نشاسته سیپروس^{۱۸}، مقادیر T_p ، T_o ،

T_c و ΔH افزایش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که اتصال عرضی توسط اسید سیتریک منجر به مقادیر بالاتری برای این پارامترها شده است. علاوه بر این، محققان خاطرنشان کردند که نشاسته‌های دارای پیوند متقابل دمای ژلاتینه شدن بالاتری را نشان می‌دهند که نشان‌دهنده توانایی پیوند بهتر در مقایسه با نشاسته طبیعی است [۶۵].

دونگ و واسانتان (۲۰۲۰) اثر اصلاح اتصال عرضی با $POCl_3$ و STMP در اشکال آبی و نیمه خشک را بر نشاسته ذرت، نخود و باقلا مورد مطالعه قرار دادند. این محققین گزارش کردند که نشاسته‌های اتصال عرضی یافته تغییرات بالقوه‌ای در ویژگی‌های ژلاتینه شدن خود نشان دادند. اتصال عرضی با $POCl_3$ پیک گرماگیر را برای هر سه نمونه نشاسته به دمای بالاتر منتقل کرد. به همین ترتیب، تیمار STMP در یک فرم نیمه خشک به طور قابل توجهی مقدار T_o را کاهش داد درحالی‌که مقدار T_p و T_c همه نشاسته‌ها را در مقایسه با نشاسته طبیعی خود افزایش داد. در نتیجه این مطالعه نشان داد که عوامل اتصال عرضی و روش‌های اتصال عرضی بر پیوندهای مولکول‌های نشاسته تأثیر متفاوتی دارند [۶۶].

Table 5. Thermal properties of native and phosphorylated wheat starch.

Sampel	T_o	T_p	T_c	ΔH
Native starch	52.90±0.13 ^b	58.12±11 ^b	64.37±0.06 ^a	8.48±0.11 ^a
Phosphorylated Starch	53.40±0.16 ^a	58.20±0.24 ^a	62.58±0.11 ^b	5.47±0.10 ^b

تغییرات اساسی می‌شود. دمای خمیری شدن (PT) حداقل دمای مورد نیاز برای پختن نشاسته است. ویسکوزیته حداکثر (PV) نشان دهنده بالاترین ویسکوزیته نشاسته در نقطه تعادل بین تورم و نشت پلیمر به دلیل افزایش دما است، درحالی‌که شکست ویسکوزیته (BD) پایداری گرانول‌های نشاسته را در برابر افزایش دما و نیروهای برشی نشان می‌دهد. در هنگام

۳-۱۲- خمیری شدن

پارامترهای خمیری شدن نشاسته طبیعی و اتصال عرضی یافته در جدول شماره ۶ نشان داده شده است. در طول حرارت دهی و ژلاتینه شدن، آرایش مولکولی نشاسته

18. Cyperus

17. Barnyard millet

شدن مولکول‌های نشاسته [۵۸] سبب کاهش شکست ویسکوزیته نشاسته کیتول نسبت به نشاسته طبیعی شد [۳۹]. از سوی دیگر ایجاد اتصال عرضی از طریق افزایش جذب آب گرانول‌های نشاسته منجر به بزرگ شدن گرانول‌های نشاسته نسبت به نشاسته طبیعی شد و در نتیجه این نشاسته اصلاح شده در طول خنک شدن ویسکوزیته نهایی بیشتری را ایجاد کرد [۷۰]. ویسکوزیته بازگشت (SB) نشان دهنده توانایی خمیر نشاسته برای تشکیل ژل یا رتروگراداسیون است [۷۱]. اصلاح اتصال عرضی سبب افزایش جزئی مقدار بازگشت ویسکوزیته نسبت به نشاسته طبیعی شد. بر اساس نظر سوده‌ش و همکاران (۲۰۲۰)، اصلاح فسفریلاسیون به دلیل افزایش بازآرایی مجدد زنجیره‌های نشاسته نشأت پیدا کرده به بیرون گرانول‌های نشاسته از طریق ایجاد آسیب‌های سطحی که در طول اصلاح پدید می‌آیند، سبب افزایش بازگشت ویسکوزیته می‌شود [۷۲].

نتایج مطالعه جیا و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که ماده ایجاد کننده اتصال عرضی STMP سبب کاهش دمای خمیری شدن (PT)، ویسکوزیته حداکثر (PV)، ویسکوزیته شکست (TV)، شکست ویسکوزیته (BV)، ویسکوزیته نهایی (FV)، و بازگشت ویسکوزیته نشاسته ذرت شد [۷۳]. به طور مشابه ماده ایجاد کننده اتصال عرضی هگزامتافسفات سدیم ویژگی‌های خمیری شدن نشاسته موز را کاهش داد [۳۲]. درحالی که در مطالعه سوده‌ش و همکاران (۲۰۲۱) ماده ایجاد کننده اتصال عرضی اکسی کلرید فسفر پارامترهای PV، TV، SB و FV نشاسته کیتول را افزایش داد [۷۲].

اصلاح اتصال عرضی نشاسته بسته به منبع نشاسته، فاکتور اتصال عرضی، غلظت آن و شرایط واکنش متفاوت است. غلظت کمتر معرف و درجه کمتر اتصال متقابل می‌تواند منجر به افزایش تورم و ویسکوزیته حداکثر در طول گرم کردن نشاسته با آب شود، درحالی که درجه بالاتر اتصال متقابل

سرد شدن، تجمع مولکول‌های آمیلوز که منجر به افزایش ویسکوزیته می‌شود، با ویسکوزیته نهایی (FV) نشان داده می‌شود، درحالی که بازگشت ویسکوزیته (SB) توانایی ژل شدن یا رتروگراداسیون نشاسته را نشان می‌دهد [۶۷].

نتایج نشان داد که دمای خمیری شدن نشاسته اتصال عرضی یافته در مقایسه با نشاسته طبیعی افزایش یافت؛ دلیل این افزایش را می‌توان جلوگیری از خروج آمیلوز از مولکول‌های نشاسته نسبت داد که منجر به تقویت مولکولی و تورم محدود در طول فرآیند ژلاتینه‌سازی می‌شود [۶۶]. به طور مشابه شارما همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که اصلاح اتصال عرضی سبب افزایش دمای خمیری شدن نشاسته هسته لیچی نسبت به نشاسته طبیعی شد [۶۸]. جیوتی و همکاران (۲۰۰۶) بیان کردند که اصلاح اتصال عرضی از طریق ایجاد پیوند میان زنجیره‌های مولکولی نشاسته، سبب افزایش انرژی مورد نیاز به منظور تورم گرانول‌های نشاسته می‌گردد [۵۸].

از سوی دیگر نتایج نشان داد که ویسکوزیته حداکثر و ویسکوزیته شکست نشاسته‌های اتصال عرضی یافته در مقایسه با نشاسته طبیعی افزایش یافت که این امر به دلیل افزایش برهمکنش درون و بین مولکولی گرانول‌های نشاسته دانست چراکه افزایش این برهمکنش‌ها سبب کاهش تخریب گرانول‌های نشاسته در طول حرارت دهی می‌شود و افزایش ویسکوزیته را به دنبال دارد [۶۹].

اصلاح اتصال عرضی از طریق تشکیل پیوند کووالانسی و اتصال متقابل بین آمیلوز و آمیلوپکتین سبب تقویت گرانول‌های نشاسته متورم شد و در نتیجه شکست ویسکوزیته و شکستگی خمیر نشاسته را تحت برش مکانیکی و حرارتی کاهش داد که این کاهش شکستگی با افزایش مقاومت گرانول‌های نشاسته در برابر برش مکانیکی و حرارتی متناسب می‌باشد [۳۳]. چندک و همکاران (۲۰۲۲) نیز گزارش کردند که اصلاح اتصال عرضی به دلیل سفت

استحکام گرانول را افزایش می دهد و منجر به ویسکوزیته حداکثر کمتر می شود [۷۴].

Table 6. Pasting property of native and phosphorylated wheat starch.

Sampel	PT (°C)	Viscosity (cP)				
		PV	TV	BD	FV	SB
Native starch	65.90±0.64 ^b	1774.00±19.50 ^b	1541±18.38 ^b	233.00±18.50 ^a	1869.00±11.46 ^b	464.00±17.10 ^b
Phosphorylated Starch	66.71±0.97 ^a	1902.00±17.41 ^a	1674±11.40 ^a	228.00±10.66 ^b	2487.00±12.45 ^a	813.00±22.50 ^a

۳-۱۳- بررسی مورفولوژی گرانول های نشاسته

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشاسته طبیعی و اتصال عرضی یافته در شدت بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر در شکل ۱۷ نشان داده شده است. گرانول های نشاسته گندم دارای اشکال گرد، بیضی، دیسک مانند با اندازه و شکل از کوچک تا بزرگ می باشند.

نتایج نشان داد که اصلاح اتصال عرضی سبب ایجاد حفره ها و ترک هایی روی سطح گرانول های نشاسته شد. بر اساس نظر ون هانگ و موریتا (۲۰۰۵) گرانول های نشاسته تحت تأثیر فرسایش بیرونی ناشی از فرآیندهای اصلاح شیمیایی

قرار می گیرند [۷۵]. سیروها و ساندو (۲۰۱۸) و کو و همکاران (۲۰۱۰) تغییرات جزئی را در سطح گرانول نشاسته ارزن مروارید و نشاسته ذرت اتصال عرضی یافته در مقایسه با نشاسته طبیعی آنها مشاهده کردند. این محققین بیان کردند که اصلاح اتصال عرضی بر مورفولوژی گرانول نشاسته با توجه به اندازه گرانول تأثیر می گذارد. به طوری که گرانول های بزرگتر در مقایسه با گرانول های با اندازه کوچکتر تغییرات جزئی بیشتری را متحمل شده اند [۷۶، ۷۷].

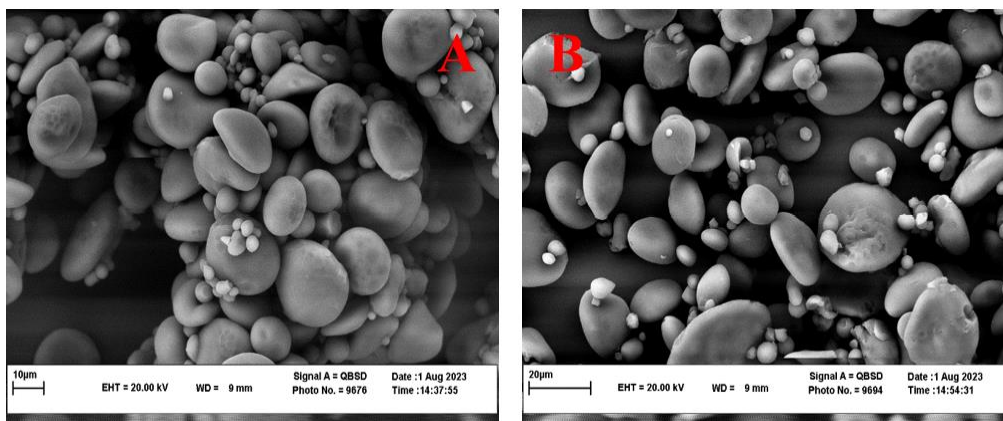


Fig 17. Scanning electron micrography of native (A) and phosphorylated wheat starch (b).

۴- نتیجه گیری

دهنده) توانست به طور موثری بر خواص نشاسته گندم تأثیر بگذارد. در این بین با توجه به ویژگی های مورد نیاز نشاسته مورد استفاده در فرمولاسیون انواع سس ها، نشاسته ای با

نتایج نشان داد که ۱۷ نوع تیمار انجام شده در این بررسی با توجه به شرایط واکنش متفاوت (pH، دما و غلظت واکنش

مقایسه رفتار حرارتی نشان داد که فسفریلاسیون از طریق معرفی گروه فسفات به مولکولهای نشاسته و تقویت برهمکنش بین مولکولی سبب افزایش دماهای ژلاتیناسیون اولیه T_0 و اوج T_p نسبت به نمونه نشاسته طبیعی گردید؛ درحالی که همین تیمار کاهش دمای نهایی (T_e) و آنتالپی ژلاتینه شدن (ΔH) را به دنبال داشت. در نتیجه می توان اینگونه بیان کرد که فسفریلاسیون نشاسته سبب ایجاد مقاومت نشاسته در برابر دماهای بالا و نیروهای برشی شد و نشاسته ای را ایجاد کرد که بتواند در شرایط پاستوریزاسیون و تنش بالا در حین هموژنیزاسیون مقاومت کند و این نوع نشاسته اصلاح شده را برای استفاده در فرمولاسیون سس ها مناسب سازد.

قدرت تورم بالاتر، حلالیت بالاتر، شفافیت خمیر بیشتر، سینرسیس کمتر و پایداری انجماد- ذوب بیشتر، به عنوان نمونه بهینه انتخاب شد و تمامی آزمون های تکمیلی انجام شد و با نمونه نشاسته طبیعی مورد مقایسه قرار گرفت.

یافته ها نشان داد که فسفریلاسیون نشاسته گندم منجر به کاهش بلورینگی نشاسته طبیعی از ۴۴/۵۲ درصد به ۴۱/۲۲ درصد شد. این کاهش، ارتباط مثبتی با محتوای ماریچ دوگانه و درجه نظم در نتایج آزمون FTIR نشان داد. از طرف دیگر این تیمار اصلاحی دمای خمیری شدن، ویسکوزیته حداکثر، ویسکوزیته شکست، ویسکوزیته نهایی و بازگشت ویسکوزیته را نسبت به نشاسته طبیعی افزایش داد درحالی که کاهش شکست ویسکوزیته را به دنبال داشت. نتایج

ه-منابع

- [1] Babić, J., et al., *Effects of pectin and carrageenan on thermophysical and rheological properties of tapioca starch*. Czech Journal of Food Sciences, 2006. **24**(6): p. 275.
- [2] Majzoubi, M., et al., *Physico-chemical properties of phosphoryl chloride cross-linked wheat starch*. 2009.
- [3] Tester, R.F., J. Karkalas, and X. Qi, *Starch—composition, fine structure and architecture*. Journal of cereal science, 2004. **39**(2): p. 151-165.
- [4] Guo, Z., et al., *Structural and physicochemical properties of lotus seed starch treated with ultra-high pressure*. Food chemistry, 2015. **186**: p. 223-230.
- [5] Man, J., et al., *Comparison of physicochemical properties of starches from seed and rhizome of lotus*. Carbohydrate Polymers, 2012. **88**(2): p. 676-683.
- [6] Guo, et al., *Effect of ultra high pressure processing on the particle characteristics of lotus-seed starch*. Chinese Journal of Structural Chemistry, 2013(4): p. 525-532.
- [7] Copeland, L., et al., *Form and functionality of starch*. Food hydrocolloids, 2009. **23**(6): p. 1527-1534.
- [8] Singh, J., L. Kaur, and O. McCarthy, *Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications—A review*. Food hydrocolloids, 2007. **21**(1): p. 1-22.
- [9] Kaur, B., et al., *Progress in starch modification in the last decade*. Food hydrocolloids, 2012. **26**(2): p. 398-404.
- [10] Jayakody, L. and R. Hoover, *The effect of lintnerization on cereal starch granules*. Food Research International, 2002. **35**(7): p. 665-680.
- [11] Heo, H., Y.-K. Lee, and Y.H. Chang, *Rheological, pasting, and structural properties of potato starch by cross-linking*. International journal of food properties, 2017. **20**(sup2): p. 2138-2150.
- [12] Wang, X., et al., *Research advances in chemical modifications of starch for hydrophobicity and its applications: A review*. Carbohydrate polymers, 2020. **240**: p. 116292.

- [13] Chung, H.-J., K.-S. Woo, and S.-T. Lim, *Glass transition and enthalpy relaxation of cross-linked corn starches*. Carbohydrate polymers, 2004. **55**(1): p. 9-15.
- [14] Gui-Jie, M., et al., *Crosslinking of corn starch with sodium trimetaphosphate in solid state by microwave irradiation*. Journal of applied polymer science, 2006. **102**(6): p. 5854-5860.
- [15] Chen, Y.-F., L. Kaur, and J. Singh, *Chemical modification of starch*, in *Starch in food*. 2018, Elsevier. p. 283-321.
- [16] Horwitz, W. and G.W. Latimer, *Official methods of analysis of AOAC International*. Vol. 1. 2000: AOAC international Gaithersburg.
- [17] Lim, S. and P. Seib, *Preparation and pasting properties of wheat and corn starch phosphates*. Cereal chemistry, 1993. **70**: p. 137-137.
- [18] McGrance, S.J., H.J. Cornell, and C.J. Rix, *A simple and rapid colorimetric method for the determination of amylose in starch products*. Starch-Stärke, 1998. **50**(4): p. 158-163.
- [19] Jackson, M.L., *Soil chemical analysis: advanced course: a manual of methods useful for instruction and research in soil chemistry, physical chemistry of soils, soil fertility, and soil genesis*. 2005: UW-Madison Libraries parallel press.
- [20] Leach, H.W., *Structure of starch granule I. Swelling and solubility patterns of various starches*. J. Cereal Chem., 1959. **36**: p. 534-544.
- [21] Mandala, I. and E. Bayas, *Xanthan effect on swelling, solubility and viscosity of wheat starch dispersions*. Food Hydrocolloids, 2004. **18**(2): p. 191-201.
- [22] Ehtiati, A., et al., *Pasting, rheological, and retrogradation properties of starches from dual-purpose sorghum lines*. Starch-Stärke, 2017. **69**(7-8): p. 1600262.
- [23] Dutta, H., et al., *Effect of acid concentration and treatment time on acid-alcohol modified jackfruit seed starch properties*. Food chemistry, 2011. **128**(2): p. 284-291.
- [24] Reddy, I. and P.A. Seib, *Paste properties of modified starches from partial waxy wheats*. Cereal Chemistry, 1999. **76**(3): p. 341-349.
- [25] Pozo, C., et al., *Study of the structural order of native starch granules using combined FTIR and XRD analysis*. Journal of Polymer Research, 2018. **25**: p. 1-8.
- [26] Pascoal, A.M., et al., *Extraction and chemical characterization of starch from S. lycocarpum fruits*. Carbohydrate polymers, 2013. **98**:(۲) p. 1304-1310.
- [27] Singh, H., N.S. Sodhi, and N. Singh, *Characterisation of starches separated from sorghum cultivars grown in India*. Food chemistry, 2010. **119**(1): p. 95-100.
- [28] Committee, A.A.o.C.C.A.M., *Approved methods of the American association of cereal chemists*. Vol. 1. 2000: American Association of Cereal Chemists.
- [29] Pons, M. and S. Fiszman, *Instrumental texture profile analysis with particular reference to gelled systems*. Journal of texture studies, 1996. **27**(6): p. 597-624.
- [30] Sasaki, T., et al., *Comparison of physical properties of wheat starch gels with different amylose content*. Cereal chemistry, 2002. **79**(6): p. 861-866.
- [31] Radi, M., et al., *The effect of freezing-assisted cross-linking on structural and rheological properties of potato starch*. International Journal of Biological Macromolecules, 2022. **222**: p. 2775-2784.
- [32] Olawoye, B., et al., *Understanding how different modification processes affect the physiochemical, functional, thermal, morphological structures and digestibility of cardaba banana starch*. International journal of biological macromolecules, 2022. **201**: p. 158-172.
- [33] 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**(12): p. 1945-1954.
- [34] Iweajunwa, S., O. Achugasim, and R. Ogali, *Effects of acetylation, carboxymethylation and crosslinking on some physicochemical properties of*

- starch from tubers of Icacina senegalensis and Cyrtosperma senegalense*. Scientia Africana, 2023. **22**(1): p. 75-84.
- [35] Singh, A. and L. Nath, *Evaluation of binder property of Moth bean starch in compressed solid dosage form*. International Journal of PharmTech Research, 2009. **1**(2): p. 365-368.
- [36] Hirsch, J.B. and J.L. Kokini, *Understanding the mechanism of cross-linking agents (POCl₃, STMP, and EPI) through swelling behavior and pasting properties of cross-linked waxy maize starches*. Cereal chemistry, 2002. **79**(1): p. 102-107.
- [37] Liu, C., et al., *Influence of phosphorylation and acetylation on structural, physicochemical and functional properties of chestnut starch*. Polymers, 2022. **14**(1): p. 172.
- [38] Mehfooz, T., et al., *Characterization of hydroxypropylated-distarch phosphate barley starch and its impact on rheological and sensory properties of soup*. International journal of biological macromolecules, 2020. **144**: p. 410-418.
- [39] Chandak, A., et al., *Effects of cross-linking on physicochemical and film properties of lotus (Nelumbo nucifera G.) Seed Starch*. Foods, 2022. **11**: p. 3069.
- [40] Sriprabhom, J., et al., *Effect of single and dual modifications with cross-linking and octenylsuccinylation on physicochemical, in-vitro digestibility, and emulsifying properties of cassava starch*. Food Research International, 2023. **16**: p. 112304.
- [41] Luo, Y., et al., *Improvement in Freeze-Thaw Stability of Rice Starch by Soybean Protein Hydrolysates-Xanthan Gum Blends and its Mechanism*. Starch-Stärke, 2022. **74**(1-2): p. 2100193.
- [42] Xiaofan, L., Y. Chen, and W. Zhou, *Effect of cross-linking with sodium trimetaphosphate on structural and physicochemical properties of tigernut starch*. Food Science and Technology, 2022. **42**: p. e76422.
- [43] Oh, S.-M., et al., *Physicochemical and retrogradation properties of modified chestnut starches*. Food science and biotechnology, 2019. **28**: p. 1723-1731.
- [44] Nakkala, K., et al., *Chemical modifications of turmeric starch by oxidation, phosphorylation, and succinylation*. Starch-Stärke, 2022. **74**(9-10): p. 2200053.
- [45] Kim, C.T., et al., *Effects of phosphorylating salts and temperature on the preparation of rice starch phosphates by extrusion*. Starch-Stärke, 1999. **51**(8-9): p. 280-286.
- [46] Muhammad, K., et al., *Effect of pH on phosphorylation of sago starch*. Carbohydrate Polymers, 2000. **42**(1): p. 85-90.
- [47] Hazarika, B.J. and N. Sit, *Effect of dual modification with hydroxypropylation and cross-linking on physicochemical properties of taro starch*. Carbohydrate polymers, 2016. **140**: p. 269-278.
- [48] Ačkar, Đ., et al., *Isolation of starch from two wheat varieties and their modification with epichlorohydrin*. Carbohydrate polymers, 2010. **81**(1): p. 76-82.
- [49] Sharma, V., et al., *Effect of cross-linking on physico-chemical, thermal, pasting, in vitro digestibility and film forming properties of Faba bean (Vicia faba L.) starch*. International journal of biological macromolecules, 2020. **159**: p. 243-249.
- [50] Majzoobi, M., et al., *Physicochemical properties of cross-linked wheat starch affected by L-ascorbic acid*. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014. **16**: p. 355-364.
- [51] Miles, M.J., et al., *The roles of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch*. Carbohydrate research, 1985. **135**(2): p. 271-281.
- [52] Mua, J. and D. Jackson, *Relationships between functional attributes and molecular structures of amylose and amylopectin fractions from corn starch*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997. **45**(10): p. 3848-3854.
- [53] Chen, B., et al., *Physicochemical properties and micro-structural characteristics in starch from kudzu root as affected by cross-linking*. Food chemistry, 2017. **219**: p. 93-101.

- [54] Karmvir, G., et al., *Physico-chemical, textural and crystallinity properties of oxidized, cross-linked and dual-modified white sorghum starch*. International Food Research Journal, 2018 : (۵) ۲۵ .p. 2104-2111.
- [55] Peng, H., et al., *Soluble starch-based biodegradable and microporous microspheres as potential adsorbent for stabilization and controlled release of coix seed oil*. European Food Research and Technology, 2011. **232**: p. 693-702.
- [56] Gao, F., et al., *Preparation and characterization of starch crosslinked with sodium trimetaphosphate and hydrolyzed by enzymes*. Carbohydrate polymers, 2014. **103**: p. 310-318.
- [57] Shalviri, A., et al., *Novel modified starch-xanthan gum hydrogels for controlled drug delivery: Synthesis and characterization*. Carbohydrate Polymers, 2010. **79**(4): p. 898-907.
- [58] Jyothi, A.N., S.N. Moorthy, and K.N. Rajasekharan, *Effect of cross-linking with epichlorohydrin on the properties of cassava (Manihot esculenta Crantz (starch. Starch-Stärke*, 2006. **58**(6): p. 292-299.
- [59] Sang, Y., O. Prakash, and P.A. Seib, *Characterization of phosphorylated cross-linked resistant starch by 31P nuclear magnetic resonance (31P NMR) spectroscopy*. Carbohydrate Polymers, 2007. **67**(2): p. 20۱۱۲-۱
- [60] Soler, A., et al., *Double helical order and functional properties of acid-hydrolyzed maize starches with different amylose content*. Carbohydrate research, 2020. **490**: p. 107956.
- [61] Zhou, D., et al., *Structural characteristics and physicochemical properties of field pea starch modified by physical, enzymatic, and acid treatments*. Food Hydrocolloids, 2019. **93**: p. 386-394.
- [62] Ahmad, M., et al., *Production and characterization of starch nanoparticles by mild alkali hydrolysis and ultra-sonication process*. Scientific Reports, 2020. **10**(1): p. 3533.
- [63] Carmona-Garcia, R., et al., *Effect of the cross-linked reagent type on some morphological, physicochemical and functional characteristics of banana starch (Musa paradisiaca)*. Carbohydrate Polymers, 20 : (۱) ۷۶ .۰۹p. 117-122.
- [64] Sharma, V., et al., *Barnyard millet starch cross-linked at varying levels by sodium trimetaphosphate (STMP): film forming, physico-chemical, pasting and thermal properties*. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 202 : ۲ .۱p. 100161.
- [65] Olayemi, B., et al., *Green preparation of citric acid crosslinked starch for improvement of physicochemical properties of Cyperus starch*. Turkish journal of pharmaceutical sciences, 2021. **18**(1): p. 34.
- [66] Dong, H. and T. Vasanthan, *Amylase resistance of corn, faba bean, and field pea starches as influenced by three different phosphorylation (cross-linking) techniques*. Food Hydrocolloids, 2020. **101**: p. 105506.
- [67] Punia, S., et al., *Pearl millet grain as an emerging source of starch :A review on its structure, physicochemical properties, functionalization, and industrial applications*. Carbohydrate polymers, 2021. **260**: p. 117776.
- [68] Sharma, V., et al., *Physicochemical and Rheological Properties of Cross-Linked Litchi Kernel Starch and Its Application in Development of Bio-Films*. Starch-Stärke, 2021. **73**(7-8): p. 2100049.
- [69] Aaliya, B., et al., *Impact of microwave irradiation on chemically modified talipot starches: A characterization study on heterogeneous dual modifications*. International Journal of Biological Macromolecules, 2022. **209**: p. 1943-1955.
- [70] Wongsagonsup, R., et al., *Effect of cross-linking on physicochemical properties of tapioca starch and its application in soup product*. Carbohydrate polymers, 2014. **101**: p. 656-665.
- [71] Luo, F.-x., et al., *Preparation and characterisation of crosslinked waxy potato starch*. Food Chemistry, 2009. **115**(2): p. 563-568.
- [72] Sudheesh, C., et al., *Effect of dual modification with annealing, heat moisture treatment and cross-linking on the physico-chemical, rheological and in vitro digestibility of underutilised kithul (Caryota urens) starch*. Journal of Food

Measurement and Characterization, 2020. **14**: p. 1557-1567.

[73] Jia, S., et al., *Physicochemical Properties and In Vitro Digestibility of Dual-Modified Starch by Cross-Linking and Annealing*. Starch-Stärke, 2022. **74**(1-2): p. 2100102.

[74] Dong, H. and T. Vasanthan, *Effect of phosphorylation techniques on structural, thermal, and pasting properties of pulse starches in comparison with corn starch*. Food Hydrocolloids, 2020. **109**: p. 106078.

[75] Van Hung, P. and N. Morita, *Physicochemical properties of hydroxypropylated and cross-linked starches from A-type and B-type wheat starch granules*. Carbohydrate polymers, 2005. **59**(2): p. 239-246.

[76] Siroha, A.K. and K.S. Sandhu, *Physicochemical, rheological, morphological, and in vitro digestibility properties of cross-linked starch from pearl millet cultivars*. International Journal of Food Properties, 2018. **21**(1): p. 1371-1385.

[77] 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**(6-7): p. 619-625.



Scientific Research

Optimizing reaction conditions for the production of phosphorylated wheat starch by sodium trimetaphosphate (STMP) in order to be used in the formulation of sauces

Mohammadkazem Heydarian¹, Majid Hashemi^{2*}, Shahram Beiraghi-Toosi², gholamali Goli-Movahhed³, Elnaz Milani⁴

1- Department of Food Science, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Assistant Professor, Food processing research department, Food science and technology research institute, Academic Center for Education Culture and Research (ACECR), Mashhad, Iran.

2- Assistant Professor, Food processing research department, Food science and technology research institute, Academic Center for Education Culture and Research (ACECR), Mashhad, Iran.

3- Food processing research department, Food science and technology research institute, Academic Center for Education Culture and Research (ACECR), Mashhad, Iran.

4- Associate Professor, Food processing research department, Food science and technology research institute, Academic Center for Education Culture and Research (ACECR), Mashhad, Iran.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 2024/4/10

Accepted: 2024/7/29

Keywords:

wheat starch,
phosphorylation,
pasting,
sauce

DOI: 10.22034/FSCT.22.159.92.

*Corresponding Author E-
majid_hashemi1@yahoo.com

Wheat starch is the most common type of starch in many countries and can be modified to produce a variety of starches. The widespread use of starch offers many opportunities in various industries due to its affordability, high safety and biodegradability. However, characteristics such as insolubility in cold water, heat intolerance, low resistance to applied stresses, and low freeze-thaw stability limit the use of natural starch for various industrial uses. One of the most efficient techniques for starch modification is chemical modification, but it raises concerns about environmental pollution and high chemical costs. For this reason, in this study, in order to reduce the consumption of chemicals, the reaction conditions for the production of phosphorylated starch with sodium trimetaphosphate (STMP) using three independent variables: pH (9.5, 10.5 and 11.5), temperature (110, 130 and 150 degrees Celsius) and reactant concentration (1.5, 3 and 4.5%) were optimized. According to the results of the physicochemical tests, the optimization criteria of starch used in all kinds of sauces with higher swelling and solubility index, higher dough transparency, less gel syneresis and higher freeze-thaw stability were selected. Then, in order to check the structural, thermal and pasting properties, additional tests were performed on selected and natural starch samples; The results showed that the starch produced under optimal conditions is suitable for use in the formulation of all kinds of sauces due to improved textural properties, higher viscosity and increased heat tolerance.