بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده کشاورزی

اثر آنزیم‌بری و خشک‌کردن مقدماتی بر کیفیت خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده: اندازه‌گیری و مدلسازی

پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد علوم‌وصنایع‌غذایی

مریم اسدی

اساتید راهنما

دکترناصرهمدمی

دکترسیدامیرحسین گلی

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده کشاورزی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته علوم و صنایع غذایی خانم مریم اسدی

تحت عنوان

اثر آنزیم‌بری و خشک‌کردن مقدماتی بر کیفیت خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده: اندازه‌گیری و مدلسازی

در تاریخ ۹۰/۶/۲۸ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر ناصر همدمی
۲- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکترسید امیرحسین گلی
۳- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر جواد کرامت
٤- استاد مشاور پایان نامه	دکتر علی نصیرپور
٥- استاد داور	دکتر محمد شاهدی
٦- استاد داور	دکتر امین‌الله معصومی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر احمد ریاسی

تشکر و قدردانی

ستایشم مخصوص خداوند بی‌نهایتی است که همواره پیش از آن که بخوانمش اجابتم می‌کند و بیش از آرزوهایم گسترده می‌شود. حقیقتا چنین پروردگاری مرا بس به نعمت بندگی.

قدردان زحمات پدر و مادر و خواهر و برادران عزیزم هستم. مهربانانی که سخاوتمندانه تمام دنیایشان را ارزانی‌ام داشتند تا همراهی و هدایتگر راهشان، امیدم به ادامه راه و حمایت بی‌دریغشان استوارکننده قدم‌هایم باشد.

از همسر عزیزم که مهربانانه یاریگر و مشوق من در لحظات زندگی‌ام بوده تشکر می‌کنم.

از استادار جمند جناب آقای دکتر مهدی بسیار سپاسگزارم که کریمانه دانسته‌هایشان را در اختیارم قرار دادند. قطعا بی‌سمودن این مسیر امکان‌پذیر نبود مگر به همراهی این فرزانه.

از استاد محترم جناب آقای دکتر گلی که از نظرات و راهنمایی‌هایشان بهره برده‌ام کمال تشکر را دارم.

از جناب آقایان دکتر نصیرپور و دکتر کرامت که از راهنمایی‌هایشان استفاده کردم سپاسگزاری می‌کنم.

از جناب آقایان دکتر شاهدی و دکتر معصومی که زحمت مطالعه و داوری پایان‌نامه را تقبل نمودند سپاسگزارم.

از اساتید محترم گروه علوم و صنایع غذایی که افتخار شاگردی آن‌ها را داشتم صمیمانه سپاسگزارم.

از کارشناسان و همکاران آزمایشگاه‌های گروه صنایع غذایی خصوصا جناب آقای مهندس بهرامی کمال تشکر را دارم.

یاد و خاطره دوستان خوبم خانم‌ها سلطانی، سرافرازی، شاه‌خواجه، خوش‌اخلاق، نورانی، جعفری، تقیان و اشرفی برای همیشه در ذهن من خواهد ماند.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

و

همسر مهربانم

فهرست

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه و بررسی منابع ۲

۱-۱- سیب‌زمینی و تاریخچه آن ۲

۱-۲- ترکیب شیمیایی سیب‌زمینی ۳

۱-۲-۱- نشاسته و ویژگی های آن ۳

۱-۲-۲- قند سیب‌زمینی و ویژگی‌های آن ۴

۱-۲-۳- سایر ترکیبات موجود در سیب زمینی ۵

۱-۳- فراورده‌های سیب زمینی ۵

۱-۳-۱- خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده ۵

۱-۴- تاریخچه تولید خلال سیب‌زمینی سرخ شده ۶

۱-۴-۱- تولید خلال سیب‌زمینی سرخ شده در ایران ۶

۱-۵-خصوصیات کیفی خلال سیب زمینی سرخ شده ۷

۱-۵-۱- رنگ و طعم ۷

۱-۵-۲- بافت ۸

۱-۵-۳- کیفیت روغن و جذب روغن ۱۰

۱-۵-۴- آکریل آمید ۱۲

۱-۶- مراحل تولید خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده ۱۳

۱-۷- آنزیم‌بری و اثر آن بر کیفیت خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده ۱۵

۱-۸- خشک‌کردن و اثر آن برکیفیت خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده ۱۸

۱-۹- فرایند سرخ کردن ۱۹

۱-۹-۱- آکریل آمید و روش های کاهش تولید آن ۲۱

۱-۱۰- انتقال جرم ۲۲

۱-۱۱- تعیین ضریب دیفوزیون ۲۳

۱-۱۲- مدلسازی و کاربرد آن در فراوری خلال سیب‌زمینی سرخ شده ۲۵

۱-۱۳- حل‌آنالیتیک: ۲۸

۱-۱۴- حل عددی ۲۸

۱-۱۴-۱- روش تفاضل محدود : ۲۹

۱-۱۴-۲- روش اجزاء محدود ۳۱

فصل دوم: مواد وروش‌ها ۳۴

۲-۱-دستگاه‌ها و وسایل مورد استفاده ۳۴

2-1-1 دستگاه‌های استفاده شده ۳۴

۲-۱-۲- مواد مصرفی ۳۵

۲-۱-۳- مواد شیمیایی مهم مورد استفاده ۳۵

۲-۲- آنزیم‌بری خلال های سیب زمینی: ۳۵

۲-۳- خشک‌کردن مقدماتی و سرخ کردن خلال های سیب زمینی آنزیم بری شده ۳۶

۲-۴-ارزیابی ویژگیهای کیفی نمونه های خلال سیب زمینی ۳۶
۲-۴-۱- اندازه گیری رطوبت ۳۶
۲-۴-۲- اندازه گیری خاکستر ۳۶
۲-۴-۳- اندازه گیری پروتئین ۳۷
۲-۴-۴- اندازه گیری میزان روغن باقیمانده ۳۷
۲-۴-۵- اندازه گیری میزان قندهای احیاءکننده ۳۸
۲-۴-۶- اندازه گیری رنگ ۳۸
۲-۴-۷- اندازه گیری بافت ۳۹
۲-۵- طرح آماری مورد استفاده ۳۹
۲-۶- مدل‌سازی ۳۹
۲-۶-۱- توسعه مدل ۴۰
۲-۷- تأیید مدل ۴۲
فصل سوم: نتایج و بحث ۴۴
۳-۱-آنالیز شیمیایی سیب‌زمینی ۴۴
۳-۲-اثر دمای آنزیم بری بر سینتیک خروج قندهای احیاءکننده ۴۵
۳-۳-اثر دمای آنزیم بری بر سینتیک تغییرات بافت ۴۸
۳-۴-اثر دمای آنزیم‌بری بر سینتیک تغییرات رنگ ۵۱
۳-۵-اثر دمای خشک کردن بر سینتیک تغییرات بافت ۵۴
۳-۶-اثر دمای خشک کردن بر سینتیک تغییرات رنگ ۵۶
۳-۷-اثر دمای خشک کردن بر فاکتورهای رنگ خلال سیب زمینی سرخ شده ۵۷
۳-۸-اثر دمای خشک کردن بر بافت خلال سیب زمینی سرخ شده ۵۸
۳-۹-اثر دمای خشک کردن بر میزان روغن باقیمانده ۵۹
۳-۱۰- مدلسازی داده‌ها ۶۰
۳-۱۰-۱-خصوصیات کیفی ۶۰
۳-۱۰-۲-استفاده از مدل عددی توسعه داده شده برای توصیف انتقال جرم (رطوبت و قنداحیاءکننده) ۶۲
۳-۱۰-۳-نتایج مدل عددی بدست‌آمده ۶۳
فصل‌چهارم:نتیجه‌گیری‌کلی و پیشنهادها ۶۶
۴-۱- نتیجه گیری کلی ۶۶
۴-۲- پیشنهادها ۶۷
پیوست ۶۸
مراجع ۸۲

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱- روش کرانک نیکلسون در حل معادلات تفاضل محدود ۳۱
شکل ۲-۱- شکل هندسی فرنچ فرایزبه صورت مکعب نیمه محدود ۴۱
شکل ۳-۱- سینتیک خروج قندهای احیاءکننده طی آنزیم بری در دماهای مختلف ۴۵
شکل ۳-۲- سینتیک تغییرات ماده خشک طی آنزیم بری در دماهای مختلف ۴۸
شکل ۳-۳- سینتیک تغییرات سفتی بافت طی آنزیم بری در دماهای مختلف ۴۸
شکل ۳-۴- سینتیک تغییرات رنگ طی آنزیم بری ۵۳
شکل ۳-۵- سینتیک تغییرات رنگ طی خشک کردن ۵۷
شکل ۳-۶- تغییرات رنگ خلال سرخ شده به عنوان تابعی از میزان قنداحیاءکننده خلال قبل از سرخ‌شدن ۵۸
شکل ۳-۷- مقایسه داده های آزمایشی و پیش‌بینی شده مربوط به سفتی بافت حین آنزیم‌بری ۶۰
شکل ۳-۸- مقایسه داده های آزمایشی و پیش‌بینی شده مربوط به سفتی بافت حین آنزیم‌بری ۶۱
شکل ۳-۹- مقایسه داده های آزمایشی و پیش‌بینی شده مربوط به سفتی بافت حین خشک‌کردن ۶۱
شکل ۳-۱۰- مقایسه داده های آزمایشی و پیش‌بینی شده مربوط به سفتی بافت حین خشک‌کردن ۶۱
شکل ۳-۱۱- مقایسه داده های آزمایشی و پیش‌بینی شده مربوط به رنگ حین آنزیم‌بری ۶۲
شکل ۳-۱۲- مقایسه داده های آزمایشی و پیش‌بینی شده مربوط به رنگ حین خشک‌کردن ۶۲
شکل ۳-۱۳- تغییرات میزان قندهای احیاء کننده کل خلال سیب‌زمینی طی آنزیم‌بری ۶۴
شکل ۳-۱۴- مقادیرقنداحیاءکننده کل حاصل ازداده های پیش بینی شده و آزمایشی بدست آمده برای رطوبت طی آنزیم بری ۶۴
شکل ۳-۱۵- تغییرات میزان میانگین رطوبت خلال سیب‌زمینی طی آنزیم‌بری ۶۴
شکل ۳-۱۶- سفتی حاصل ازداده های پیش بینی شده و آزمایشی بدست آمده برای رطوبت طی آنزیم بری ۶۵
شکل ۳-۱۷- تغییرات میانگین رطوبت خلال سیب‌زمینی طی خشک‌کردن ۶۵
شکل ۳-۱۸- سفتی حاصل ازداده های پیش بینی شده و آزمایشی بدست آمده برای رطوبت طی آنزیم بری ۶۵

فهرست جدول‌ها

جدول ۳-۱- ترکیب شیمیایی سیب زمینی ۴۴
جدول ۳-۲- مقایسه میانگین سینتیک خروج قندهای احیاءکننده طی آنزیم بری ۴۶
جدول ۳-۳- اثر متقابل دما و زمان بر سینتیک خروج قندهای احیاءکننده طی آنزیم بری ۴۷
جدول ۳-۴- مقایسه میانگین داده های مربوط به ماده خشک و سفتی بافت طی آنزیم بری ۴۹
جدول ۳-۵- اثرمتقابل دما و زمان بر داده های مربوط به سفتی بافت طی آنزیم بری ۵۰
جدول ۳-۶- مقایسه میانگین داده‌های حاصل از اندازه گیری رنگ طی آنزیم بری ۵۲
جدول ۳-۷- مقایسه میانگین داده‌های حاصل از اندازه گیری بافت طی خشک کردن ۵۴
جدول ۳-۸- اثرمتقابل دما و زمان بر داده‌های حاصل از اندازه گیری بافت طی خشک کردن ۵۵
جدول ۳-۹- مقایسه میانگین داده‌های حاصل از اندازه گیری رنگ طی خشک کردن ۵۶
جدول ۳-۱۰- مقایسه میانگین داده‌های حاصل از اندازه گیری رنگ خلال سیب زمینی سرخ شده ۵۸
جدول ۳-۱۱- مقایسه میانگین داده‌های حاصل از اندازه گیری بافت خلال سیب زمینی سرخ شده ۵۹
جدول ۳-۱۲- مقایسه میانگین داده‌های مربوطبه اثردمای خشک‌کردن برمیزان جذب روغن خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده ۵۹
جدول ۳-۱۳- ورودی‌های مدل ۶۳

چکیده

سیب زمینی یکی از مهم ترین منابع غذایی انسان است. در حال حاضر، طیف وسیعی از فراورده‌های سیب‌زمینی همچون گرانول، آرد، نشاسته، محصولات کنسروی و فراورده‌های سرخ شده شامل چیپس و خلال سیب زمینی سرخ شده تولید می‌شود. خلال سیب زمینی سرخ شده[1]، به قطعاتی از سیب‌زمینی به طول تقریبی ۷-٦ سانتی‌متر و سطح مقطع ۱ سانتی‌متر مربع اطلاق می‌گردد که در روغن داغ، نیمه‌سرخ می‌شوند. از جمله اهداف تحقیقات توسعه‌ای اخیر در صنعت تولید خلال سیب‌زمینی نیم‌سرخ، کاهش میزان آکریل‌آمید و روغن باقیمانده در محصول نهایی می باشد. با کاهش میزان قندهای احیاءکننده و رطوبت سیب‌زمینی طی آنزیم‌بری و خشک کردن مقدماتی خلال سیب‌زمینی می‌توان کیفیت محصول نهایی را از نظر رنگ، بافت و میزان روغن باقیمانده و آکریل‌آمید تحت تاثیر قرار داد. در این تحقیق سعی شده است با مطالعه پدیده انتقال جرم (قندهای احیاءکننده و رطوبت) و سینتیک رنگ و بافت خلال سیب زمینی طی آنزیم‌بری و خشک کردن مقدماتی، مدلی ریاضی برای توصیف انتقال جرم و سینتیک تغییرات کیفی طی عملیات مذکور توسعه داده شود. در این راستا در مرحله اول مطالعه پس از پوست گیری سیب‌زمینی و تهیه ی خلال هایی با ابعاد ۰/۸ × ۰/۸× ۸ سانتی متر، آنزیم بری با آب داغ در دماهای متفاوت (٦۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سانتیگراد) انجام شده و خلال های آنزیم بری شده وارد مرحله خشک شدن مقدماتی با استفاده از خشک کن جریان هوای گرم با دماهای ۵۰، ٦۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتیگراد، برای رسیدن به رطوبت ۷۰ درصد بر اساس وزن مرطوب شده و در نهایت نیم‌سرخ کردن در دمای ۱۸۰ در جه سانتیگراد بر روی آنها انجام گردید. از خلال های سیب زمینی طی آنزیم بری وخشک کردن مقدماتی و در پایان سرخ کردن نمونه برداری شده و رنگ، بافت، میزان قندهای احیا کننده و میزان روغن باقیمانده نمونه ها تعیین شد. براساس نتایج بدست‌آمده دراین تحقیق، می‌توان برای حفظ رنگ و بافت مطلوب خلال و کاهش میزان روغن باقیمانده در خلال سیب زمینی سرخ شده، آنزیم بری را در دمای ٦۰ درجه سانتیگراد و خشک کردن مقدماتی را در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به رطوبت ۷۵٪ بر اساس وزن مرطوب انجام داد. در بخش دوم تحقیق مدلی ریاضی برای توصیف انتقال جرم به صورت دوبعدی با استفاده ازحل عددی قانون دوم فیک با روش تفاضل محدود طی آنزیم‌بری و خشک کردن بعنوان تابعی از عوامل درونی (دما درهر نقطه درداخل خلال) وعوامل بیرونی(دماو سرعت حرکت هوای خشک کن و دمای آب آنزیم بری) با استفاده از نرم افزار MATLAB توسعه داده شد. در مرحله پایانی، برای تایید مدل توسعه داده شده، تغییرات اندازه گیری شده در ویژگی‌های کیفی با مقادیر پیش بینی شده توسط مدل مقایسه گردید. همبستگی خوب مشاهده‌شده مابین پروفیل‌های پیش بینی شده با داده‌های اندازه گیری شده، نشان داد که مدل توسعه داده شده از اعتبار کافی برخوردار می‌باشد. با کاربرد مدل مذکور می‌توان تغییرات رنگ، بافت و میزان روغن جذب شده را درشرایط متفاوت آنزیم‌بری و خشک کردن برای تولید خلال سیب زمینی سرخ شده با کیفیت بالا و یکنواخت، پیش بینی وکنترل نمود.

واژه‌های کلیدی: آنزیم‌بری، خشک‌کردن مقدماتی، خلال سیب‌زمینی سرخ شده، مدلسازی

[1] French fries

فصل اول
مقدمه و بررسی منابع

۱-۱- سیب‌زمینی و تاریخچه آن

سیب‌زمینی گیاهی است تتراپلوئید از جنس *سولانوم*[1] و از خانواده *سولاناسه*[2]، شامل ۲۰۰۰ گونه می‌باشدکه تنها ۸ گونه آن کشت می‌شود. *سولانوم‌توبرزوم*[3]، تنها گونه‌ای است که در سراسر جهان و در شرایط آب وهوایی مختلف قابل‌کشت است و پس از گندم، ذرت و برنج، از مهم‌ترین محصولات کشاورزی به شمار می‌رود. نشاسته سیب‌زمینی خام غیرقابل‌هضم می‌باشد بنابراین فراوری حرارتی برای افزایش قابلیت هضم آن ضروریست. سیب‌زمینی می‌تواند پخته شود و مستقیما مصرف شود یا به شکل یک محصول تجاری فراوری شود. سیب‌زمینی یکی از مهم‌ترین منابع غذایی انسان است. مقدارپروتئین آن در حدود ۲٪ و با کیفیت مطلوب می‌باشد، به‌طوری‌که شامل بیشتر اسیدهای آمینه ضروری است و فقط از نظر متیونین وسیستئین محدودیت دارد. به دلیل قابلیت هضم آسان سیب‌زمینی و داشتن پروتئین با کیفیت مطلوب، پس از تخم‌مرغ، به‌عنوان دومین منبع غذایی ساده و پرمصرف جهان، شناخته می شود[۴،۱۰۰].

خاستگاه سیب‌زمینی را منطقه‌کوهستانی‌آنددرآمریکای‌جنوبی ذکرکرده‌اند.درقرن۱۶ میلادی، به وسیله کاشفان اسپانیایی به اروپا برده شد، سپس به مردم آمریکای شمالی معرفی‌گردید. اولین‌بار در عهد فتحعلی شاه قاجار، توسط سرجان ملکم، وارد ایران شد و درنواحی کرج، دماوند و فریدن اصفهان

---

[1]. *Solanum*
[2]. *Solanacea*
[3]. *Solanum tuberosum*

کشت شد وتا مدت‌ها به‌نام" آلوی ملکم"خوانده‌می‌شد. نام رایج فعلی گرفته شده از نام فرانسوی pommede terre (پومده تری) آن است که به طورلفظی به معنای سیب‌زمینی می‌باشد[۶].

۱-۲- ترکیب شیمیایی سیب‌زمینی

سیب‌زمینی منبع تغذیه‌ای خوبی ازکربوهیدرات‌ها،پروتئین‌ها،ویتامین‌هاومواد‌معدنی است.تقریبا ۷۵٪ وزن سیب‌زمینی تازه را آب تشکیل می‌دهد. ۸۰٪ آب، آب‌آزاد است که به عنوان حلالی برای ترکیبات هیدروفیل‌کوچک عمل می‌کند. این آب‌آزاد به همراه ذرات نامحلول آن آب سیب‌زمینی را تشکیل می‌دهد. ماده خشک سیب زمینی شامل نشاسته، قند، پروتئین، چربی و خاکستر می‌باشد[۱۷].

۱-۲-۱- نشاسته و ویژگی های آن

مهم‌ترین ماده اصلی موجود در سیب‌زمینی نشاسته است که معمولا بین ۹ الی ۲۵ درصد آن را تشکیل می‌دهد. نشاسته، ترکیب اصلی ماده‌خشک است(بین ۸۰-۶۰ درصد) و به طورکلی ماده‌خشک سیب‌زمینی نشان‌دهنده میزان نشاسته می‌باشد. نشاسته به عنوان اندوخته‌گیاهی بسیاری ازگیاهان محسوب می‌شود وگرانول‌های نشاسته در اصل بسته‌های فشرده ای از گلوکز محسوب می‌شوند.نشاسته سیب زمینی از دوترکیب پلی‌ساکاریدی به‌نام آمیلوز[۱]و آمیلوپکتین[۲] تشکیل شده‌است. آمیلوز پلیمر خطی گلوکز وآمیلوپکتین پلیمرشاخه‌ای گلوکز می‌باشد. نشاسته درطبیعت به‌شکل نیمه‌کریستالی وجود دارد با این توضیح‌که شکل‌کریستالی‌آن عمدتاً مربوط به آمیلوپکتین و حالت‌آمورفی[۳] آن نمایانگر آمیلوز می‌باشد.آمیلوز پلیمری خطی می‌باشد درحالی‌که آمیلوپکتین یک پلیمر شاخه ایست و از پلیمرهای طبیعی با وزن مولکولی بالا محسوب می‌شود[۱۲]. نسبت آمیلوز به آمیلوپکتین در نشاسته سیب زمینی۱به ۳ می باشد. اختلاف در این نسبت می‌تواند ویژگی‌های عملکردی نشاسته از قبیل دمای ژلاتینه شدن، پتانسیل تورم یا آماس و حداکثر ویسکوزیته را تحت تأثیر قرار دهد[۷۱].

نشاسته سیب‌زمینی درمقایسه با برنج،گندم وذرت به دلیل داشتن گرانول‌های بزرگ‌تر، زنجیره های طویل‌تر آمیلوز و آمیلوپکتین، درجه بالاتر استریفیکاسیون فسفری[۴] روی مولکول‌های آمیلوپکتین و پتانسیل بهترتورم منحصربه‌فرد می‌باشد. همچنین نشاسته سیب‌زمینی توانایی تبادل کاتیون‌های کلسیم و منیزیم که بر ویسکوزیته نشاسته ژلاتینه شده مؤثرند را دارد. علاوه براین، زمانی‌که در معرض حرارت و بلافاصله سردکردن قرار می‌گیرد قابلیت تشکیل یک ژل ویسکوز را دارد. نشاسته سیب‌زمینی در دمای بین ۶۵-۶۰ درجه سلسیوس بسته به اندازه گرانول‌ها و گونه سیب‌زمینی شروع به ژلاتینه شدن می‌کند. زمانی‌که گرانول‌های نشاسته در معرض این دما قرار می‌گیرند شروع به تورم‌کرده و آب از نواحی اطراف تا زمانی‌که میزان آب داخلی به ۳۰-۲۰ درصد برسد به داخل آن‌ها منتشر می‌شود. گرانول‌های

---

1. Amylose
2. Amylopectin
3. Amorphous
4. Phosphate esterification

متورم شده نشاسته یک فشار خارجی بر دیواره‌های سلولی لوکوپلاست[1] وارد می‌کنند. با افزایش دما به ۸۵-۸۰ درجه سلسیوس گرانول‌ها با افزایش فشار به دیواره سلول‌ها به تورم ادامه می‌دهند. درطی تورم، ژل نشاسته با ویسکوزیته بالا وگرانول‌هایی با ۳۰٪ آمیلوز در محلول ایجاد می‌شود. از آن‌جایی‌که مولکول‌های آمیلوز در فاز آمورف هستند نسبت به آمیلوپکتین پیوندهای ضعیف‌تری دارند و راحت‌تر ژلاتینه می‌شوند. زمانی‌که دما از نقطه پایانی ژلاتیناسیون فراتر رود (بیش‌از۸۵ درجه سلسیوس)تمامی مولکول‌های آمیلوز به‌صورت محلول‌اند و بخش‌های آمیلوپکتین درنهایت محلول می‌شوند. نشاسته ساختارگرانولی‌اش را از دست می‌دهد و یک خمیر هموژن و ویسکوزایجاد می‌شود. ترکیب گرانول های نشاسته درطی توسعه فیزیولوژیکی سیب زمینی تغییر می‌کند. میزان نشاسته و اندازه گرانول‌ها با افزایش رسیدگی افزایش می‌یابد در حالی‌که دمای ژلاتیناسیون نشاسته کاهش می‌یابد[۹۸،۲۹،۸۸].

۱-۲-۲- قند سیب‌زمینی و ویژگی‌های آن

قندسیب‌زمینی به‌طورعمده شامل دی‌ساکاریدغیراحیاءکننده ساکارز و مونوساکاریدهای احیاءکننده گلوکز وفروکتوز می‌باشد.مقدار قندهای احیاءکننده سیب‌زمینی در شدت رنگ محصولات سرخ شده سیب‌زمینی اهمیت زیادی دارد. گلوکز و فروکتوز در واکنش غیرآنزیمی میلارد[2] شرکت دارند که میزان بالای این قندها در طی حرارت بالای سرخ‌کردن باعث ایجاد رنگ تیره و نامطلوب در محصول می‌شود[۸۰،۲۰]. چهار فاکتور شرکت‌کننده در تجمع قندهای‌احیاءکننده در سیب‌زمینی بعد از برداشت شناخته شده است: نارسی سیب‌زمینی‌ها بعد از برداشت، جوانه‌زنی سریع سیب‌زمینی‌ها در طی انبارمانی، انبارمانی دردمای پایین قبل ازفراوری، پیر شدن. تجمع قندهای‌احیاءکننده درطی انبارمانی بعد از برداشت به دمای انبار و گونه سیب‌زمینی بستگی دارد. گونه‌های با وزن مخصوص پایین نسبت به گونه های با وزن مخصوص بالا در طی انبارمانی تجمع قند بیشتری دارند. همچنین در گونه‌هایی که رشد جوانه‌ها در آن‌ها سریع است تجمع قند بیشتری دیده شده است. دمای پایین انبار از جوانه‌زنی جلوگیری می‌کند اما منجر به تشدید شیرین‌شدگی‌ناشی‌ازسرما[3]می‌شود. در طی انبارمانی دردمای زیر ۱۰ درجه‌سلسیوس آنزیم‌های آمیلولیتیک اندوژنز[4]، نشاسته را به قندهای احیاء کننده تبدیل می‌کنند که سرعت این تبدیل با کاهش دما افزایش می‌یابد.

زمانی‌که قندهای احیاءکننده بیش‌ازحد اپتیمم تجمع می‌یابند، فرایند شیرین‌شدگی‌تشدید شده با سرما نامیده می‌شود. فروکتوز سریعتر از گلوکز تجمع می‌یابد درحالی‌که مقدارکمی قندغیراحیاء کننده ساکارزتجمع می‌یابد. شیرین‌شدگی‌ناشی‌ازسرما می‌تواند در شرایط دمایی ۲۰-۱۰ درجه سلسیوس به مدت۳-۲ هفته در واکنش درجهت عکس برطرف شود. انبارداری سیب زمینی‌های بدون جوانه به مدت طولانی در دماهای بالاتر(۶-۵ ماه در دمای ۲۰-۱۰ درجه سلسیوس) منجر به شیرین‌شدگی ناشی

---

1. Leucoplast
2. Maillard reaction
3. Cold-induced sweetening
4. Endogenous amylolytic enzymes

از پیرشدن[1] می‌شود. این پدیده با تخریب غشاء آمیلوپلاست[2] همراه می‌باشد. سرعت این نوع شیرین شدگی به واریته و شرایط محیطی بستگی دارد. این نوع شیرین شدگی برعکس شیرین شدگی سرمایی برگشت‌ناپذیر می‌باشد و تخریب بافت، خروج قندهای احیاءکننده را درطی آنزیم بری ممکن می‌سازد. کاهش سطح قنداحیاء در این مورد کیفیت رنگ محصول نهایی را بهبود می‌دهد اما در اثر تخریب بافت، کیفیت بافت ضعیف می باشد[۴۴، ۲۷، ۲۹].

۱-۲-۳- سایر ترکیبات موجود در سیب زمینی

سیب‌زمینی سرشاراز ویتامین C نیز می‌باشد. مخصوصا در پوست سیب‌زمینی به طور متوسط ۳۰ میلی‌گرم ویتامین Cوجوددارد. البته بایدتوجه‌کردکه مقدار ویتامین C موجود در سیب‌زمینی به عواملی نظیر نحوه‌ی نگهداری در انبار، نحوه‌ی طبخ و درجه‌حرارت محیط بستگی دارد. تقریبا ۵۰ درصد از ویتامین C سیب‌زمینی، در اثر نگه داری در انبار در دمای ۱۲ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. در اثر پوست‌کندن و طبخ سیب‌زمینی درفرایندهایی مانند: پختن، سرخ‌کردن وکباب‌کردن تقریبا ۴۰ الی ۴۵ درصد ویتامین C موجود در سیب‌زمینی‌کاهش می‌یابد. اگر سیب‌زمینی همراه با پوست خارجی پخته شود میزان کاهش ویتامین C حدود ۷ درصد خواهد بود. سیب‌زمینی حاوی دودرصد پروتئین است که اغلب آن از آمینواسیدهای ضروری تشکیل‌شده است. با مصرف روزانه ۲۵۰ گرم سیب‌زمینی می‌توان ۱۶ درصداز احتیاجات روزانه یک فرد به اسیدآمینه ضروری به‌خصوص لیزین را تأمین‌کرد. علاوه‌براین، آمینواسیدهای ضروری دیگر مانند والین، لوسین و ایزولوسین نیز در آن به اندازه کافی وجود دارد.

۱-۳- فراورده‌های سیب زمینی

در حال حاضر، طیف وسیعی از فراورده‌های سیب‌زمینی نظیرگرانول، آرد، نشاسته، محصولات کنسروی وفراورده‌های سرخ‌شده تولیدمی‌شود. به‌طورعمده،فراورده‌های سرخ‌شده شامل چیپس و خلال سیب زمینی‌سرخ شده(خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده) است. چیپس معمولا به برش‌های نازک سیب زمینی،که در روغن مایع یا جامد سرخ می‌شوند اطلاق می‌گردد. البته اخیرا چیپسی تولید شده است که از پودرگرانول شده سیب‌زمینی تولید می‌شودو به جای سرخ‌شدن در روغن، خشک می‌گردد[۲،۱۰].

۱-۳-۱- خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده

یکی ازمشهورترین محصولات سرخ‌شده سیب‌زمینی خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده یا خلال سیب زمینی سرخ‌شده می‌باشد. به‌طورمعمول خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده به قطعاتی از سیب‌زمینی به طول تقریبی۷-۶ سانتی‌متروسطح مقطع۱سانتی‌مترمربع اطلاق می‌گرددکه درروغن داغ، نیمه‌سرخ می‌شوند

[1]. Senescent sweetening
[2]. Amyloplast

[۳۸].در صنعت غذا، انواع مختلفی از خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده بر حسب شکل و اندازه تعریف شده است:

الف) خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده بلند[1]

خلال‌هایی که ضخامت آن‌ها ۱×۱، ۰/۶×۱ یا ۰/۵×۰/۵ سانتی‌متر و طول بیشتر از ۷ سانتی‌متر داشته باشند.

ب) خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده کوتاه[2]

خلال‌هایی که از نظر ضخامت مشابه گروه قبل‌اند ولی طول آن‌ها تقریباً ۵ سانتی‌متر می‌باشد[۹۰].

۱-۴- تاریخچه تولید خلال سیب‌زمینی سرخ شده

خلال سیب‌زمینی‌سرخ‌شده اولین‌بار در قرن ۱۷توسط مردم روستایی در بلژیک تولید گردید، بدین ترتیب که آن‌ها در جست‌وجوی جایگزین مناسبی برای خوراک معمولشان که ماهی سرخ شده بود و در طی زمستان بسیار نایاب گردیده بود اقدام به سرخ کردن خلال های سیب‌زمینی کردند و نام *" پومز فریتس "* [3]بر آن نهادند. در لهستان به *فروتکی*[4] معروف است و در روسیه *"گارنینگ کارتوفیل"*[5]خوانده می‌شود. تولید صنعتی آن به جنگ جهانی اول باز می گردد، زمانی که سربازان آمریکای شمالی دریافتند که بلژیکی‌های فرانسوی تبار، خلال سرخ‌شده سیب‌زمینی را به هنگام صبحانه مصرف می کنند. آن‌ها از این خوراک استقبال کرده ونام *" فرنچ‌فرایز "* را برآن نهادند و پس از جنگ ، این محصول در رستوران‌هاو خانه‌ها درآمریکا وکانادا تولیدشد. نخستین واحد تولید صنعتی، درسال ۱۹۴۷ توسط *باکستربروس*[6] و باظرفیت سالانه ۱۵۰۰ تن راه اندازی شد.۱۰ سال بعد، تولیدآن به یکصدهزارتن رسید و درطی دهه ۶۰، از مرز یک میلیون تن گذشت[۸۵].

۱-۴-۱- تولید خلال سیب‌زمینی سرخ شده در ایران

صنعت تولیدفراورده‌های سیب‌زمینی درایران، صنعتی نوپاست و تاکنون تنها چند واحد صنعتی اقدام به نصب و راه‌اندازی خط تولید خلال سیب‌زمینی نموده اند و این محصول به طور محدودی وارد بازار شده است. در این راستا، بررسی عوامل مؤثر برکیفیت محصول وکاهش هزینه‌های تولید، ضروری است. به ویژه روش‌هایی که به واسطه آن‌ها بتوان مصرف روغن در فرایند را کاهش داد تا علاوه بر جنبه اقتصادی، سلامت مصرف کننده نیز منظور شود.

---

1. Long French fries
2. Short French fries
3. Pommes Friets
4. Frytki
5. *Garning Kartofiel*
6. Baxterbros

۱-۵- خصوصیات کیفی خلال سیب زمینی سرخ شده

افزایش محبوبیت خلال سیب زمینی سرخ شده در دهه اخیر، صنعت تولید خلال سیب زمینی سرخ شده را براین داشته که روی انتخاب سیب‌زمینی‌ها تمرکز بیشتری داشته باشند و سیب‌زمینی‌های با اندازه مطلوب، وزن‌مخصوص بالاومیزان کم قندهای‌احیاءکننده را برای تولیدمحصولی با کیفیت خوب انتخاب‌کنند. شرایط آب‌وهوایی اثر زیادی برکیفیت فراوری سیب‌زمینی دارد. رنگ، بافت و راندمان تولید خلال سیب زمینی سرخ شده، جنبه‌های کیفی آن هستندکه به‌راحتی تحت‌تأثیر ترکیب‌شیمیایی سیب‌زمینی دراثرشرایط مختلف آب‌وهوایی قرارمی‌گیرند. رنگ و بافت در پذیرش مصرف‌کننده محصول نهایی اهمیت زیادی دارند که به‌طورعمده تحت‌تأثیر میزان قنداحیاءکننده و نشاسته سیب‌زمینی می‌باشند.کیفیت خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده عمدتاً به ظاهر،رنگ،طعم،بافت وجذب‌روغن برمی‌گردد. همچنین روغن مورداستفاده برای سرخ کردن و اخیرا مقدار آکریل‌امید یک موضوع کیفی مهم به‌شمار می‌رود[۴۲].

۱-۵-۱- رنگ و طعم

طعم و بوی خلال سیب زمینی سرخ شده پارامترکیفی مهمی‌است که در پذیرش مصرف‌کننده بسیار اهمیت دارد. طعم و بو باید ویژه سیب‌زمینی باشد و هیچ‌گونه طعم‌تلخ، تندشدگی حاصل از فساد روغن، سوختگی نباید داشته باشد. مزه خلال بایستی شبیه مزه سیب‌زمینی تازه پخته شده باشد و قسمت ترد بیرونی نباید هیچ‌گونه طعم روغنی یا شکرسوخته‌ای داشته باشد. چربی بیش‌ازحد در محصول باعث طعم روغنی‌آن می‌شود و درعین‌حال هزینه تولیدآن‌را افزایش می‌دهد، درحالی‌که چربی‌خیلی‌کم نیز خلال سیب زمینی سرخ شده را از طعم‌وبوی طبیعی وخاص محصول سرخ‌شده محروم می‌کند[۹۰].

رنگ غده‌های سیب‌زمینی، یک ویژگی مربوط به رقم آن است و می‌تواند سفید،کرمی یا زرد بادامنه‌ای ازسایه‌های‌رنگی متفاوت باشد.این ویژگی درارتباط‌باترکیبات فلاون و کاروتنوئیدهامی‌باشد [۱۰]. درفراورده،رنگ‌محصول غالباتحت‌تأثیرغلظت قندهای‌احیاءکننده است وکنترل‌واکنش‌های قهوه‌ای‌شدن تا حدود زیادی رنگ فراورده‌های سیب‌زمینی را بهبود می‌بخشد.قندهای احیاءکننده در اثر حرارت با پروتئین‌ها و آمینواسیدهای آزاد در واکنش میلارد وارد واکنش می‌شوند. واکنش‌میلارد یک واکنش پیچیده است که در طی آن رنگ و طعم ایجاد می‌شود. ملانوئیدین‌ها[1]، ترکیبات نیتروژنی قهوه‌ای با وزن مولکولی بالا، محصولات نهایی واکنش میلارداند که مسئول رنگ طلایی- قهوه‌ای معمول می‌باشند. میزان بیش‌ازاندازه آن‌ها منجر به ایجاد رنگ تیره و طعم تلخ محصول می‌شود. مقدارآمینواسیدهای سیب‌زمینی بیش‌از قندهای احیاءکننده می‌باشد بنابراین واکنش میلارد می‌تواند به وسیله مقدار قندهای‌احیاءکننده کنترل شود. همان‌طورکه قبلا نیز اشاره شد، در عمل این‌کار با تنظیم شرایط انبار و آنزیم‌بری انجام می‌شود[۱۰۱، ۵۴، ۷۳].

[1]. Melanoidin

ترکیبات مولدطعم درواکنش میلارد ازچندمسیر به‌عنوان مثال تجزیه استرکر[1] تشکیل می‌شوند. اگرچه درکنار واکنش‌میلارد فاکتورهای دیگری برطعم مؤثراند. یک‌سری از ترکیبات مولدطعم از تجزیه لیپیدی روغن سرخ‌کردنی به وجود می‌آیند. موادخام و فرایند می‌توانند اثر منفی بر طعم بگذارند. برای مثال غوطه وری طولانی مدت خلال‌ها در محلول پیروفسفات منجر به ترش‌شدن مزه می‌شود. قندهای‌احیاءکننده بایدکمتر از ۰/۵ درصد باشد. رنگ خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده باید روشن، طلایی، بدون داشتن سایه قهوه‌ای یا خال‌های سیاه باشد. بهترین رنگ خلال سرخ‌شده از سیب‌زمینی تازه حاصل می‌شود. اما اگر دمای انبار کمتر از ۶ درجه سلسیوس باشد، باید قبل از فراوری، آن را به مدت ۳-۲ هفته دردمای ۲۰-۱۵ درجه‌سلسیوس نگهداری کنند.تالبورت[2] وهمکاران، رنگ را مهم‌ترین شاخص کیفی فراورده‌های سرخ‌شده سیب‌زمینی می‌دانندکه نقش تعیین‌کننده در بازار پسندی محصول دارد. رنگ خلال ها معمولاً با استفاده از دستگاه هانترلب[3] و با سه متغیر L , a, b سنجیده می‌شود. L[4] شدت روشنایی یا ارزش‌رنگ است، فاکتورa تمایل به قرمزی یا سبزی[5] می‌باشدکه در دامنه ۱۰۰- تا ۱۰۰ تغییر می‌کند (اعداد هرچه به سمت ۱۰۰ پیش‌می‌روند تمایل به قرمزی بیشتر است) و فاکتور b تمایل به زردی یا آبی[6] را نشان می‌دهد که در دامنه صفر تا ۱۰۰ نوسان می‌کند(اعداد در جهت ۱۰۰، تمایل به زردی بیشتر و به سمت صفرتمایل به رنگ آبی را نشان می‌دهد[۹۱].

۱-۵-۲- بافت

بافت محصول سرخ‌شده، به عنوان یکی از خصوصیات‌کیفی برتر شناخته شده است که بر تصمیم مصرف‌کننده به خرید محصول تاثیرگذار است. خلال سیب زمینی سرخ شده با پوسته ترد و مغز آردی نسبت به انواع چسبنده و سفت، ازدیدگاه مصرف‌کننده مطلوب‌تراند. تفاوت بسیار واضحی بین بافت داخلی و خارجی وجود دارد: بافت داخلی باید نرم و آردی باشد در حالی که پوسته بایستی ترد باشد. پوسته در طی سرخ‌کردن تشکیل می‌شود و معمولا ضخامت آن درحدود ۱میلی‌متر می‌باشد. تقریبا ۸۰٪ حجم پوسته را فضای خالی تشکیل می‌دهد. بافت داخلی شامل سلول‌های پخته و به‌ندرت دهیدراته شبیه به بافت سیب‌زمینی پخته می‌باشد. در طی حرارت‌دهی، بافت سیب‌زمینی در اثر تجزیه پلی‌ساکاریدهای دیواره‌سلولی نرم می‌شود. ژلاتینه‌شدن نشاسته به سرعت در دمای حدود ۶۸ درجه سلسیوس رخ می‌دهد که البته برای بافت اهمیت کمتری دارد.

از آنجایی‌که دیواره‌سلولی نسبت به لایه میانی بین سلول‌ها ضخیم‌تر است جداسازی سلول‌ها قبل از متلاشی‌شدن سلول اتفاق می‌افتد. ساختار سلول در پوسته سالم باقی می‌ماند. سلول‌ها در اطراف نشاسته ژلاتینه و خشک شده، چروکیده و پیچ‌وتاب خورده می‌شوند. جداسازی سلول‌ها به‌دلیل افزایش

---

1. Strecker degradation
2. Talbourt
3. Hunterlab
4. Lightness
5. Greeness/Redness
6. Yellowness/blueness

فشار توسط تبخیر آب در طی سرخ‌کردن اتفاق می‌افتد. کم بودن میزان ماده‌خشک یا پخت بیش‌ازحد درطی آنزیم‌بری یا نیم‌سرخ‌کردن باعث ایجاد سوراخ‌هایی در داخل بافت می‌شود که نامطلوب هستند [۱۰۲، ۱۴، ۵۸]. زمانی‌که بافت سیب‌زمینی درمعرض حرارت قرار می‌گیردسه اتفاق رخ می‌دهد: نشاسته ژلاتینه می‌شود، دیواره‌های سلولی با افزایش نفوذپذیری ضعیف می‌شوند و چسبندگی بین سلولی درسلول‌های مجاور به دلیل نرم شدن بافت کاهش می‌یابد. ضعیف شدن دیواره سلولی و افزایش نفوذپذیری درنتیجه دپلیمریزه شدن[۱] پروتوپکتین[۲] به پکتین[۳] محلول می‌باشد.پکتین محلول در دیواره سلولی هیدراته‌شده حل می‌شودوغلظت پروتوپکتین کاهش می‌یابد. نشاسته ژلاتینه‌شده درمیان دیواره های سلولی ضعیف منجر به ۴٪ انبساط‌سلولی و در نتیجه افزایش فشار درونی می‌شود. چسبندگی داخل سلولی در سلول‌های مجاور در اثر تخریب پل‌های کلسیمی‌ومنیزیمی در غشاءمیانی کاهش می‌یابد. بافت سلولی کروی و تاحدودی ناپیوسته شده و سیب‌زمینی پخته با یک بافت آردی تولید می‌شود[۳۴، ۲۴، ۴۷].

درحضورکلسیم، دیواره سلول‌ها درطی فرایند حرارتی ضعیف نمی‌شود. غلظت بالای یون‌های کلسیم موجود در اطراف سلول‌ها، دیواره‌های سلولی را در برابر فشار خارجی نشاسته ژلاتینه‌شده تقویت می‌کند. بیشتر کلسیم موجود در بافت در گرانول‌های نشاسته حضور دارد. زمانی‌که سلول‌ها نشاسته بالایی دارند دسترسی یون‌های کلسیم کاهش می‌یابد. این موضوع، بافت آردی را بهبود داده و تا حدودی رابطه میان میزان نشاسته بالا و خاصیت‌آردی را توضیح می‌دهد[۱۵].سفتی بافت با کاهش حلالیت پروتوپکتین در دمای بین ۱۰۰-۸۸ درجه افزایش می‌یابد. در یک پیش‌پخت‌کردن درمحدوده دمایی ۷۰-۵۰درجه،کاتیون‌های دوظرفیتی،کلسیم ومنیزیم اثرسفت‌کنندگی دارند.سفتی‌ذکرشده به‌دلیل داستریفیه‌شدن[۴] پکتین دیواره‌سلولی توسط پکتین‌متیل‌استراز[۵] قابل‌توضیح است. بعد از داسترفیه‌شدن پکتین حاوی‌گروه کربوکسیل‌آزاد می‌شود که می‌تواند با یون‌های منیزیم و کلسیم واکنش دهد و ساختاری سفت‌تر ایجاد کند وسفتی بافت را تشدید کند. زمانی‌که فعالیت پکتین متیل استراز در دماهای بالای ۷۰ درجه محدود می شود، ایجاد بافت آردی افزایش می‌یابد[۲۴].

زمانی‌که عوامل شلاته‌کننده[۶] نظیر فیتیک‌اسید[۷] در بافت سیب‌زمینی حضور دارند، یون‌های کلسیم ومنیزیم برای تشکیل ساختارسفت غیرقابل دسترس می‌شوند و سفتی بافت در طی فرایند حرارتی کاهش می‌یابد. یون‌های تک ظرفیتی مانند سدیم و پتاسیم اثر عکس کلسیم و منیزیم دارند و ساختار سلولی را درطی فرایندحرارتی ضعیف می‌کنند. درحضور این یون‌ها، ترکیبات پکتیکی در اثر استخراج یون‌های کلسیم از پکتین به حلالیت مستعدتر می‌شوند. زمانی‌که سلول‌ها و گرانول‌های نشاسته

---

1. Depolymerisation
2. Protopectin
3. Pectin
4. De-esterification
5. Pectin methyl - esterase
6. Chelating agents
7. Phytic acid

طویل‌اند و مقدار مواد پکتیک کم است فرایند حرارتی باعث آردی شدن بافت می شود . وقتی چنین بافتی در معرض فرایند حرارتی قرار می‌گیرد داخل سلول‌ها با نشاسته ژلاتینه شده پرمی‌شود و سلول های پرشده با نشاسته آب را بهترحفظ می‌کنند و احساس دهانی خشک‌تری نسبت به بافت آردی ایجاد می‌کنند [۶۳، ۹۲].برخلاف بافت‌آردی، بافت واکسی هم دیده شده است، در این حالت، سلول‌ها شکل اولیه و خام خود را حفظ‌کرده و بعد از فرایندحرارتی متصل می‌مانند. سلول‌های خام سیب‌زمینی‌های واکسی اندازه کوچک و درصد بالایی گرانول‌های کوچک نشاسته دارند. در طی فرایند حرارتی، دیواره سلولی ضعیف نشده وچسبندگی داخل سلولی کاهش نمی‌یابد. سلول‌ها نیز با نشاسته ژلاتینه‌شده کمتری پرشده‌اند. سیب‌زمینی‌های با وزن‌مخصوص بین ۱/۰۵۵ و۱/۰۶۵ ویژگی‌های بافتی واکسی دارند. سیب‌زمینی‌های واکسی برای برخی محصولات تجاری که چسبندگی در آن‌ها مهم است برای مثال سالاد سیب‌زمینی، کنسرو یا سیب‌زمینی پخته قابل استفاده اند[۲۹].

خصوصیات فیزیکی سیب‌زمینی‌خام روی بافت خلال‌سرخ‌شده‌تأثیرگذاراست. بافت سیب زمینی به‌طورمستقیم به وزن‌مخصوص، ماده‌جامدکل، میزان نشاسته، اندازه سلول، مساحت سطح و میزان پکتین وابسته است. سیب‌زمینی‌های با ماده‌خشک بالا(به‌ویژه آن‌هایی‌که نشاسته بالایی دارند) معمولا خلال‌های ترد وآردی تولید می‌کنند[۱۸]. همچنین درصنعت تولیدخلال سیب‌زمینی سرخ‌شده، وزن‌مخصوص‌که نشان‌دهنده مقدارنشاسته سیب‌زمینی است اغلب به‌عنوان شناساگردسته‌بندی سیب زمینی‌ها از لحاظ‌کیفیت بافت قبل از فراوری استفاده می‌شود. وزن‌مخصوص بالاتراز ۱/۰۸ معرف بافت آردی درمحصول نهایی است وبرای تولیدخلال سیب‌زمینی سرخ شده مناسب می‌باشد[۳۳]. تحقیقات نشان می‌دهدکه وجود۲۱درصد نشاسته در مغز و ۳۲درصد در پارانشیم سیب‌زمینی برای تولیدبا پوسته ترد و مغز آردی ضروریست[۱۰۲]. همچنین خلال سیب زمینی سرخ‌شده که وزن‌مخصوص‌آن زیاد باشد بافت آن نیز مطبوع می‌شود. اگر وزن‌مخصوص خلال‌کم باشد، تورفته و بعد از سرخ شدن چروکیده می‌شود. طبق بررسی‌های انجام شده، ماده‌خشک سیب‌زمینی ویژه خلال نبایداز۲۲-۲۰ ٪ کمتر باشد و نشاسته آن باید۱۶-۱۴ ٪ باشد[۳۱]. ازتست نفوذسنجی[1] برای اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی خلال سرخ شده استفاده می‌شود و حداکثر نیرو به‌عنوان شاخص کیفیت بافت تعیین می‌شود.

۱-۵-۳- کیفیت روغن و جذب روغن

اثر نوع روغن از دیدگاه محققین بسیار متفاوت است. عده‌ای عنوان‌کرده اند که جذب روغن زمانی‌که مقدار اسیدچرب غیراشباع در روغن افزایش می‌یابد بیشتر است. از طرفی برخی نتایج نشان می‌دهد که با روغن غیراشباع نظیر روغن پنبه‌دانه به دلیل ویسکوزیته‌کمتر در طی سرد شدن و قابلیت جدا شدن در مقایسه با روغن پالم جذب‌روغن خلال سیب زمینی سرخ شده کمتر است. این تناقض این گونه قابل‌توجیه است‌که ویسکوزیته روغن در مکانیزم جذب روغن بسیار مؤثر است. به‌علاوه، روغن

[1]. Penetration test