

## بررسی امکان پیش‌بینی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی شکرهای خام نیشکری با استفاده از فاکتورهای ظاهری کریستال‌ها

محمدعرفان بهرامی<sup>۱</sup>، مسعود هنرور<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران  
\* نویسنده مسئول (m-honarvar@hotmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۰۲

### واژه‌های کلیدی

پردازش تصویر رقمی

خصوصیات فیزیکوشیمیایی

دکستران

شکر خام

### چکیده

همواره تعیین ویژگی‌های کیفی و کمی محصولات کشاورزی در آزمایشگاه‌های کنترل کیفیت کارخانه‌ها با مشکلات متعددی مواجه بوده است. هدف از این تحقیق، بررسی خصوصیات مرفولوژیک کریستال‌های شکرخام به وسیله سیستم پردازش تصویر دیجیتال و در ادامه پیش‌بینی برخی خصوصیات کیفی نمونه‌ها با استفاده از خصوصیات ظاهری به دست آمده از کریستال‌ها بود. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مورد بررسی در این پژوهش شامل درصد خاکستر، ساکارز، اینورت، شدت رنگ محلول، غلظت نشاسته، غلظت دکستران، میزان pH و ضریب شکست بوده و خصوصیات ظاهری تعیین شده توسط سیستم پردازش تصویر شامل میانگین و میانه مساحت کریستال‌ها، میانگین و میانه محیط کریستال‌ها، میانگین و میانه مربعیت و شمارش تعداد کریستال‌های شکرخام در ۰/۵ گرم نمونه بود. بررسی‌های انجام شده نشان داد که همبستگی بالایی بین برخی خصوصیات کیفی شکرخام همچون میزان خاکستر، ساکارز، نشاسته، دکستران و ضریب شکست با خصوصیات ظاهری کریستال‌ها وجود دارد که در نهایت با کمک معادلات به دست آمده می‌توان خصوصیات کیفی کریستال‌ها را با در دست داشتن فاکتورهای ظاهری با ضرایب اطمینان بالا پیش‌بینی کرد.

### مقدمه

شکرهای خام حاوی ساکارز بالا و درصد ناخالصی پایین بسیار مورد توجه می‌باشند (Asadi, 2006, Chen and Chou, 1993). ویژگی‌های کیفی شکرخام تحت تأثیر عوامل شیمیایی، آنزیمی و میکروبی اثرگذار بر گیاه نیشکر و یا در خلال فرایند تولید این محصول می‌تواند متغیر باشد (Chou, 2000). میزان ساکارز، خاکستر، قندهای احیاکننده (اینورت)، رطوبت، مواد آلی غیرقندی و ترکیبات رنگی مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر در کیفیت شکرخام محسوب می‌شوند (Mersad et al., 2003).

شکرخام نیشکری<sup>۱</sup> یکی از فراورده‌های مهم و پرمصرف در صنعت قند و شکر بشمار می‌رود. شکرخام در واقع کریستال ساکارزی است که با لایه نازکی از شربت که درجه خلوص پایینی دارد، محصور شده است (Asadi, 2006). تحقیقات نشان داده است که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی شکرخام مورد مصرف، بیشترین تأثیر را در نوع و کیفیت شکر سفید تولیدی دارد، همچنین این خصوصیات، نقش مهمی در قیمت نهایی شکرخام خریداری شده ایفا می‌کنند که در این رابطه،

<sup>1</sup> Raw Cane Sugar

تعیین خصوصیات ریخت‌شناسی<sup>۵</sup> کریستال‌های شکر با استفاده از پردازش تصویر توسط Faria و همکاران (۲۰۰۳) مورد بررسی قرار گرفت. آنها دریافتند که به کمک پردازش تصویر می‌توان اطلاعات بالارزشی از اندازه و خصوصیات مرفولوژی کریستال‌های شکر به‌دست آورد، به‌طوری‌که با استفاده از دیگر تکنیک‌ها امکان دستیابی به آنها وجود ندارد. در این تحقیق همچنین اثر اضافه کردن ناخالصی‌هایی همچون دکستران، رافینوز، گلوکز و سدیم‌کربنات بر روند تشکیل و رشد کریستال‌های شکر بررسی شد.

تعیین ویژگی‌های ظاهری فرآورده‌ای مانند شکرخام با بهره‌گیری از روش‌های نوظهوری همچون پردازش تصویر و امکان ایجاد ارتباط با فاکتورهای کیفی این محصول می‌تواند گامی مهم در جهت تحقق استفاده از تکنیک‌های جدید و سریع به‌منظور پیش‌بینی ویژگی‌های شیمیایی محصولات مختلف کشاورزی باشد و شاید بتوان انجام آزمون‌های کیفی زمان‌بر را با به‌کارگیری این روش‌ها حذف و یا به حداقل رساند. با توجه به اینکه بررسی‌های انجام‌شده نشان داده است که پژوهشی در زمینه تعیین خصوصیات کیفی شکرخام نیشکری با استفاده از سیستم‌های پردازش تصویر چه در ایران و چه در خارج از کشور انجام نشده است، در این تحقیق سعی شده است تا به کمک بررسی ویژگی‌های ظاهری توسط روش پردازش تصویر بتوان فاکتورهای کیفی مختلف شکرخام را پیش‌بینی کرد. برای رسیدن به این هدف، روابط رگرسیونی فاکتورهای ظاهری به‌عنوان متغیرهای مستقل با پارامترهای فیزیکوشیمیایی شکرخام مورد بررسی قرار گرفته و بهترین مدل برای پیش‌بینی خصوصیات کیفی با استفاده از ویژگی‌های ظاهری پیشنهاد گردید.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق تعداد ۱۱ نمونه شکرخام مختلف به شرح جدول (۱) جمع‌آوری گردید. تمامی نمونه‌های خارجی مربوط به سال کاری ۲۰۱۲-۲۰۱۳ و تمامی نمونه‌های داخلی مربوط به سال کاری ۹۱-۹۲ بودند. نمونه‌ها پس از دریافت در بسته‌بندی‌های پلی‌اتیلن

پردازش تصویر<sup>۱</sup> و سیستم‌های بینایی کامپیوتری<sup>۲</sup> جزء روش‌های غیرمخرب، کارآمد و با ثبات به‌منظور تعیین خصوصیات مختلف مواد غذایی و محصولات کشاورزی در سالهای اخیر بسیار رواج پیدا کرده‌اند (Wu and Sun, 2013). صنعت غذا جزء ۱۰ صنعت مهمی است که از تکنیک‌های پردازش تصویر بهره می‌برد. این تکنیک‌ها قادرند تا خصوصیات پیچیده‌ای همچون اندازه، شکل، رنگ و حتی بافت مواد غذایی را به‌صورت کمی نمایش دهند (Du and Sun, 2004). به‌صورت خلاصه می‌توان این روش را براساس عکس‌برداری دیجیتال از محصول و سپس آنالیزهای مختلف تصاویر گرفته‌شده تعریف کرد.

کاربرد سیستم‌های پردازش تصویر دیجیتال به‌منظور تعیین ویژگی‌های کمی و کیفی کریستال‌های شکر در سالهای اخیر مورد ارزیابی قرار گرفته است. طی پژوهشی که Argaw و همکاران (۲۰۰۶) روی کریستال‌های شکر در مرحله کریستالیزاسیون<sup>۳</sup> به کمک سیستم‌های پردازش تصویر انجام داد به این نتیجه رسید که چگونگی توزیع اندازه ذرات شکر در مرحله کریستالیزاسیون، شرط لازم برای دستیابی به شکری با کیفیت و ظاهری قابل قبول است و روش‌های پردازش تصویر ابزاری مناسب به‌منظور کنترل شرایط در این مرحله می‌باشد (Argaw et al., 2006).

Bahrami و Honarvar (۲۰۱۵) از سیستم پردازش تصویر دیجیتال، متشکل از اسکنر، کامپیوتر و نرم‌افزار متلب<sup>۴</sup>، به‌منظور تعیین خصوصیات مرفولوژی کریستال‌های شکرخام نیشکری استفاده کردند. آنها در این تحقیق فاکتورهای مختلف مربوط به ظاهر کریستال‌ها از جمله مساحت، محیط، مربعیت و شمارش کلی کریستال‌ها در ۰/۵ گرم نمونه را به‌دست آوردند. نتایج نشان داد که تکنیک ساده پردازش تصویر دیجیتال نسبت به روش‌های معمول از جمله استفاده از الک‌های مختلف و مشاهده‌های بصری نه تنها دقت بلکه صحت بالاتری نیز داشت.

<sup>1</sup> Image Analysis

<sup>2</sup> Computer Vision

<sup>3</sup> Crystallization

<sup>4</sup> MATLAB

<sup>5</sup> Morphology

داخلی بودند. تمامی مواد و محلول‌های شیمیایی مورد مصرف در این پژوهش مربوط به شرکت مرک<sup>۱</sup> آلمان بود. به‌منظور سنجش خصوصیات کیفی نمونه‌ها از استاندارد ایران و همچنین استاندارد ایکومسا<sup>۲</sup> استفاده شد (Wojtczak, 2003).

سامانه پردازش تصویر مورد استفاده در این پژوهش شامل یک اسکنر (Epson مدل Ea-G11-16 ساخت کشور ژاپن)، یک دستگاه رایانه و نرم‌افزار متلب نسخه ۷ به‌منظور آنالیز عکس‌های گرفته‌شده توسط اسکنر بود. به‌منظور دریافت اطلاعات جدید از خصوصیات کریستال‌ها، ویژگی‌های ظاهری مختلفی توسط نرم‌افزار نوشته و تعریف گردید که شامل میانگین و میانه مساحت کریستال‌ها، میانگین و میانه محیط کریستال‌ها، میانگین و میانه مربعیت کریستال‌ها و شمارش تعداد کریستال‌ها در ۰/۵ گرم نمونه بود. فاکتور مربعیت کریستال‌ها به معنای میزان نزدیکی شکل کریستال‌ها به یک مربع یا چهارگوش ایده‌آل در بازه صفر (نزدیکی به حالت گرد) و ۱۰۰ (نزدیکی به حالت مربع) تعریف گردید. در شکل (۱) نحوه چگونگی آنالیز تصاویر گرفته‌شده توسط نرم‌افزار متلب نمایش داده شده است.

غیرقابل نفوذ به نور و هوا تا روز آزمایش نگهداری شدند.

#### جدول ۱ - نمونه‌های مختلف شکرخام

ردیف	نام نمونه	مبدأ تحویل
۱	نمونه هندی A	شرکت بازرسی کالای تجاری ایران (IGI)
۲	نمونه هندی B	شرکت تولیدی قند کرج
۳	نمونه برزیلی A	کارخانه قند هگمتان همدان
۴	نمونه برزیلی E	کارخانه قند هگمتان همدان
۵	نمونه برزیلی H	کارخانه قند هگمتان همدان
۶	نمونه برزیلی K	کارخانه قند هگمتان همدان
۷	نمونه امیرکبیر	شرکت کشت و صنعت امیرکبیر
۸	نمونه کارون	شرکت کشت و صنعت کارون
۹	نمونه دهخدا	شرکت کشت و صنعت دهخدا
۱۰	نمونه	شرکت کشت و صنعت میرزا کوچک‌خان
۱۱	نمونه فارابی	شرکت کشت و صنعت فارابی

به‌منظور سهولت در انجام آزمون‌های آماری و مقایسه بهتر میانگین داده‌ها، نمونه‌ها به دو دسته وارداتی و داخلی تقسیم شدند، به‌این‌ترتیب که از نمونه شماره ۱ تا نمونه شماره ۶ مربوط به دسته خارجی و از نمونه شماره ۷ تا نمونه شماره ۱۱ دسته



شکل ۱ - نحوه آنالیز تصاویر توسط متلب

<sup>1</sup> Merck

<sup>2</sup> ICUMSA

### ارزیابی آماری

تمامی آزمون‌های فیزیکی‌شیمیایی در قالب طرح بلوک کاملاً تصادفی با ۳ تکرار انجام گرفت. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش دانکن در سطح ۱ درصد و ۵ درصد انجام گرفت. جهت انجام تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها از SPSS<sub>v19</sub> و جهت رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel بهره گرفته شد. به‌منظور تعیین و بررسی روابط میان ویژگی‌های ظاهری و کیفی مختلف و در نتیجه پیش‌بینی خصوصیات کیفی از رگرسیون‌های خطی و غیرخطی بهره گرفته شد.

### نتایج و بحث

#### نتایج آزمون‌های کیفی

نتایج تعیین خصوصیات فیزیکی‌شیمیایی نمونه‌های شکرخام در جدول (۲) نشان داده شده است.

#### نتایج آزمون‌های پردازش تصویر

یافته‌های حاصل از بررسی خصوصیات مرفولوژی کریستال‌های شکرخام در جدول (۳) نمایش داده شده است.

جدول ۲ - نتایج آزمون‌های فیزیکی‌شیمیایی نمونه‌های شکرخام

شماره نمونه	خاکستر (درصد)	ساکارز (درصد)	اینورت (درصد)	رنگ محلول (IU)	pH	رطوبت (درصد)	نشاسته (ppm)	دکستران (ppm)	ضریب شکست
۱	۰/۱۶۸	۹۸/۸۲	۰/۱۸	۷۸۰/۷۵	۶/۶۷	۰/۱۵۲	۱۲۲	۵۷۰/۵	۱/۳۴۷۷
۲	۰/۱۱۸	۹۹/۱۸	۰/۱۳	۹۳۰/۷۸	۶/۷۵	۰/۰۷۲	۱۴۲/۵	۲۰۲/۳۴	۱/۳۵۶۸
۳	۰/۰۹۱	۹۹/۲۲	۰/۱۷	۴۷۶/۷۴	۶/۷۵	۰/۰۶۹	۹۴/۵	۱۴۳/۳۴	۱/۳۴۹۹
۴	۰/۰۹۴	۹۹/۱۱	۰/۱۸	۵۲۹/۰۱	۶/۵۲	۰/۰۵۴	۸۷	۱۶۹/۲۴	۱/۳۴۷۲
۵	۰/۱۴۹	۹۹/۰۲	۰/۱۶	۹۴۵/۰۳	۶/۴۹	۰/۰۶۸	۱۲۷/۵	۲۹۲/۲۴	۱/۳۵۰۲
۶	۰/۰۹۵	۹۸/۹۳	۰/۱۲	۵۱۸/۲۱	۶/۸	۰/۰۷۱	۹۳	۲۴۰/۴۵	۱/۳۵۷۰
۷	۰/۴۷۷	۹۸/۵	۰/۲۲	۱۱۰۲/۸۴	۶/۴۷	۰/۱۱۷	۳۳	۶۰۶/۷۳	۱/۳۴۲۷
۸	۰/۳۹۲	۹۸/۷۱	۰/۲	۱۳۹۱/۳	۶/۵۶	۰/۱۲۹	۷۰	۵۳۶/۶۶	۱/۳۴۳۲
۹	۰/۵۹۱	۹۸/۳	۰/۲۶	۴۹۰۴/۰۶	۶/۱۶	۰/۱۲۶	۱۲۹	۵۵۲/۰۱	۱/۳۴۰۲
۱۰	۰/۳۵۹	۹۸/۸	۰/۱۹	۸۰۱/۹۷	۶/۷۲	۰/۰۳۸	۵۷	۳۵۹/۱۷	۱/۳۴۵۰
۱۱	۰/۶۰۱	۹۸/۵۷	۰/۳۰	۳۴۱۵/۱۲	۶/۱۴	۰/۰۸۵	۱۰۳/۵	۳۲۳/۸۱	۱/۳۳۹۰

جدول ۳ - نتایج آزمون‌های پردازش تصویر نمونه‌های شکرخام

شماره نمونه	میانگین مساحت (پیکسل)	میانگین محیط (پیکسل)	میانگین مربعیت	میانگین مربعیت	میانگین مربعیت	تعداد کریستال (در ۰/۵ گرم)
۱	۲۸۵/۱۹	۲۴۷/۳۳	۶۴/۴۱	۶۲/۰۸	۰/۸۸۲۵	۶۶۰
۲	۱۲۸/۰۹	۱۰۲	۴۲/۶۶	۳۹/۷۰	۰/۸۶۷۶	۱۹۸۹
۳	۱۲۶/۵۸	۱۰۰/۳۷	۴۲/۱۴	۳۹/۲۵	۰/۸۷۹۵	۱۸۵۱
۴	۱۲۷/۳۵	۹۷/۳۳	۴۲/۱۰	۳۸/۷۶	۰/۸۷۶۱	۱۸۱۲
۵	۱۱۰/۸۶	۸۳/۳۳	۳۹/۴۲	۳۵/۷۶	۰/۸۷۹۹	۲۱۴۱
۶	۱۴۷/۱۳	۱۱۶/۳۳	۴۲/۲۰	۴۲/۳۳	۰/۸۷۷۶	۱۶۴۵
۷	۲۵۲/۱۶	۲۱۸/۳۳	۶۲/۹۳	۵۹/۴۵	۰/۸۲۵۸	۸۴۲
۸	۱۹۳/۱۴	۱۸۰/۱۶	۵۴/۸۶	۵۳/۸۲	۰/۸۳۴۱	۱۰۱۸
۹	۱۸۹/۲۰	۱۵۴/۱۶	۵۱/۴۲	۴۸/۵۹	۰/۸۸۶۵	۸۹۴
۱۰	۲۹۳/۹۴	۲۷۵/۵	۶۷/۱۶	۶۵/۹۴	۰/۸۵۳۳	۷۰۵
۱۱	۱۷۴/۶۷	۱۴۸	۵۰/۰۹	۴۷/۷۱	۰/۸۷۲۲	۱۳۴۸

نتایج آزمون پردازش تصویر برای ۲ دسته شکر خام وارداتی و داخلی نشان از تفاوت معنی‌دار میان آنها داشت. درخصوص میانگین مساحت کریستال‌ها بر مبنای پیکسل، برای دسته وارداتی ۱۵۴/۲ پیکسل و برای انواع داخلی ۲۲۰/۶۲ پیکسل محاسبه شد که بیانگر بیشتر بودن میانگین سطح و مساحت کریستال‌ها در انواع داخلی بوده که درشت‌تر بودن کریستال این نمونه‌ها در عکس‌های تهیه‌شده نیز به وضوح قابل مشاهده است. میانگین محیط کریستال‌ها، برای انواع وارداتی ۴۵/۹۹ پیکسل و برای انواع داخلی ۵۷/۲۹ پیکسل به دست آمد. نتایج حاکی از بالاتر بودن میانگین محیط انواع شکرهای خام داخلی نسبت به دسته وارداتی بود. میانگین مربعیت کریستال‌ها در نمونه‌های خارجی (۰/۸۷۷۲) نسبت به انواع داخلی (۰/۸۵۱۸) بالاتر بود. بنابراین منظم‌تر بودن و نزدیکی بیشتر کریستال‌ها به حالت مربع ایده‌آل در نمونه‌های خارجی به مراتب بالاتر از نمونه‌های داخلی بود. بیشترین میانگین مربعیت مربوط به نمونه ۱ (هندی A) و کمترین میانگین مربعیت متعلق به نمونه ۷ (امیرکبیر) بود.

تعداد کریستال‌های شکر خام در یک اندازه‌گیری ۰/۵ گرمی توسط سیستم پردازش تصویر و نرم‌افزار متلب محاسبه شد. این عدد می‌تواند یکی از عوامل تعیین اندازه دانه‌ها باشد، به طوری که حضور تعداد بیشتر کریستال در یک وزن مشخص مؤید ریزتر بودن اندازه کریستال‌ها در آن محوله مشخص است. در این خصوص بیشترین تعداد کریستال در نمونه ۵ (برزیلی H) و کمترین تعداد در نمونه ۱ (هندی A) مشاهده شد.

تعداد کریستال‌های شکر خام در یک اندازه‌گیری ۰/۵ گرمی توسط سیستم پردازش تصویر و نرم‌افزار متلب محاسبه شد. این عدد می‌تواند یکی از عوامل تعیین اندازه دانه‌ها باشد، به طوری که حضور تعداد بیشتر کریستال در یک وزن مشخص مؤید ریزتر بودن اندازه کریستال‌ها در آن محوله مشخص است. در این خصوص بیشترین تعداد کریستال در نمونه ۵ (برزیلی H) و کمترین تعداد در نمونه ۱ (هندی A) مشاهده شد.

تعداد کریستال‌های شکر خام در یک اندازه‌گیری ۰/۵ گرمی توسط سیستم پردازش تصویر و نرم‌افزار متلب محاسبه شد. این عدد می‌تواند یکی از عوامل تعیین اندازه دانه‌ها باشد، به طوری که حضور تعداد بیشتر کریستال در یک وزن مشخص مؤید ریزتر بودن اندازه کریستال‌ها در آن محوله مشخص است. در این خصوص بیشترین تعداد کریستال در نمونه ۵ (برزیلی H) و کمترین تعداد در نمونه ۱ (هندی A) مشاهده شد.

تعداد کریستال‌های شکر خام در یک اندازه‌گیری ۰/۵ گرمی توسط سیستم پردازش تصویر و نرم‌افزار متلب محاسبه شد. این عدد می‌تواند یکی از عوامل تعیین اندازه دانه‌ها باشد، به طوری که حضور تعداد بیشتر کریستال در یک وزن مشخص مؤید ریزتر بودن اندازه کریستال‌ها در آن محوله مشخص است. در این خصوص بیشترین تعداد کریستال در نمونه ۵ (برزیلی H) و کمترین تعداد در نمونه ۱ (هندی A) مشاهده شد.

نتایج آزمون پردازش تصویر برای ۲ دسته شکر خام وارداتی و داخلی نشان از تفاوت معنی‌دار میان آنها داشت. درخصوص میانگین مساحت کریستال‌ها بر مبنای پیکسل، برای دسته وارداتی ۱۵۴/۲ پیکسل و برای انواع داخلی ۲۲۰/۶۲ پیکسل محاسبه شد که بیانگر بیشتر بودن میانگین سطح و مساحت کریستال‌ها در انواع داخلی بوده که درشت‌تر بودن کریستال این نمونه‌ها در عکس‌های تهیه‌شده نیز به وضوح قابل مشاهده است. میانگین محیط کریستال‌ها، برای انواع وارداتی ۴۵/۹۹ پیکسل و برای انواع داخلی ۵۷/۲۹ پیکسل به دست آمد. نتایج حاکی از بالاتر بودن میانگین محیط انواع شکرهای خام داخلی نسبت به دسته وارداتی بود. میانگین مربعیت کریستال‌ها در نمونه‌های خارجی (۰/۸۷۷۲) نسبت به انواع داخلی (۰/۸۵۱۸) بالاتر بود. بنابراین منظم‌تر بودن و نزدیکی بیشتر کریستال‌ها به حالت مربع ایده‌آل در نمونه‌های خارجی به مراتب بالاتر از نمونه‌های داخلی بود. بیشترین میانگین مربعیت مربوط به نمونه ۱ (هندی A) و کمترین میانگین مربعیت متعلق به نمونه ۷ (امیرکبیر) بود.

تعداد کریستال‌های شکر خام در یک اندازه‌گیری ۰/۵ گرمی توسط سیستم پردازش تصویر و نرم‌افزار متلب محاسبه شد. این عدد می‌تواند یکی از عوامل تعیین اندازه دانه‌ها باشد، به طوری که حضور تعداد بیشتر کریستال در یک وزن مشخص مؤید ریزتر بودن اندازه کریستال‌ها در آن محوله مشخص است. در این خصوص بیشترین تعداد کریستال در نمونه ۵ (برزیلی H) و کمترین تعداد در نمونه ۱ (هندی A) مشاهده شد.

### بررسی ارتباط بین خصوصیات ظاهری و فیزیکوشیمیایی

روش‌های پردازش تصویر به منظور تعیین خصوصیات ظاهری کریستال‌های شکر چه در حین انجام فرایند، چه در خارج از آن، سالهاست که مورد استفاده قرار می‌گیرند، به طوری که بنا به گزارش‌های اولین اندازه‌گیری‌های ظاهری کریستال شکر توسط پردازش تصویر در سال ۱۹۷۶ به صورت غیرمتصل<sup>۱</sup> انجام گرفت

<sup>۲</sup> Affination

<sup>۳</sup> Poison

<sup>۱</sup> Off Line

هستند، به طوری که ثابت شده است که در حضور مقادیر اندکی از این ترکیبات، سرعت تشکیل و رشد کریستال‌ها به میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت. کاهش در نرخ رشد کریستال‌ها منجر به افزایش هرچه بیشتر سطح آنها خواهد شد (Faria et al., 2003; Argaw, 2010).

تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از بررسی همبستگی میان میانگین مساحت کریستال‌ها با درصد ساکارز نمونه‌ها نشان داد که در الگوهای لگاریتمی، معکوس، درجه دوم و درجه سوم رابطه معنی‌داری وجود دارد که ضرایب به دست آمده به ترتیب  $r = -0.609$  و  $r = -0.668$  در سطح ۵ درصد و  $r = -0.864$  و  $r = -0.872$  در سطح ۱ درصد بود. رابطه ارتباط بین میانگین مساحت و درصد ساکارز نمونه‌ها در دو مدل درجه دوم و سوم به صورت زیر است (رابطه ۳ و ۴):

رابطه (۳)

$$\text{درصد ساکارز (الگوی درجه سوم)} \\ = 100/955 - 0/017 (A_{me}) + 0/0000001 (A_{me})^2$$

رابطه (۴)

$$\text{درصد ساکارز (الگوی درجه دوم)} \\ = 101/658 - 0/029 (A_{me}) + 0/000064 (A_{me})^2$$

آنچه از بررسی نتایج رگرسیونی میانگین مساحت کریستال‌ها و مقدار ساکارز آنها مشخص شده این است که با افزایش درصد ساکارز نمونه‌ها، میانگین مساحت کلی کریستال‌ها با نسبت معکوس کاهش می‌یابد. این مسئله کاملاً مشخص است که در صورت حضور درصد بالاتر ساکارز میزان ناخالصی‌های موجود در نمونه کاهش یافته، در نتیجه تأثیر منفی آنها در کاهش نرخ رشد کریستال‌ها نیز کمتر خواهد شد. علاوه بر این ثابت شده است که در محلول‌های خالص قندی (ساکارز)، پایین‌ترین میزان تشکیل کریستال‌های به هم چسبیده و ناهمگون، که خود عاملی در افزایش میانگین کلی مساحت کریستال‌ها می‌باشد، وجود دارد (Shaikh et al., 2011; Faria et al., 2003).

می‌شوند، تأثیر هم‌زمان هم بر خصوصیات شربت و هم بر مرفولوژی کریستال نهایی دارند. مهم‌ترین ترکیبات غیرقندی مؤثر در این رابطه شامل الیگوساکاریدها، پلی‌ساکاریدها، گلوکز و فروکتوز می‌باشد (Vander Poel et al., 2015).

درباره بررسی میزان همبستگی بین فاکتورهای فیزیکوشیمیایی و پارامترهای ظاهری به دست آمده از پردازش تصویر، ثابت شد که ارتباط معنی‌داری میان برخی خصوصیات کیفی و پارامترهای ظاهری وجود دارد (جدول ۴) به طوری که می‌توان با در دست داشتن این خصوصیات ظاهری و با انجام آزمون‌های پردازش تصویر، خصوصیات کیفی نمونه‌های مختلف شکر خام را پیش‌بینی کرد. در مورد مؤلفه میانگین مساحت، وجود همبستگی معنی‌دار با خصوصیات همچون درصد خاکستر، ساکارز و غلظت دکستران در الگوهای مختلف رگرسیونی به اثبات رسید. در مورد رابطه بین درصد خاکستر و میانگین مساحت کریستال‌ها در دو الگوی درجه دوم و سوم رابطه معنی‌دار با ضرایب همبستگی به ترتیب  $r = 0/807$  و  $r = 0/802$  یافت شد که رابطه آن به صورت زیر است (رابطه ۱ و ۲):

رابطه (۱)

$$\text{درصد خاکستر (الگوی درجه سوم)} \\ = -1/114 + 0/011 (A_{me}) - 0/000000078 (A_{me})^2$$

رابطه (۲)

$$\text{درصد خاکستر (الگوی درجه دوم)} \\ = -1/609 + 0/019 (A_{me}) - 0/0000446 (A_{me})^2$$

باتوجه به این ۲ رابطه و جایگزینی میانگین مساحت کریستال‌ها به جای  $A_{me}$  در این رابطه‌ها، با ضریب اطمینان ۹۵ درصد می‌توان درصد خاکستر نمونه‌ها را پیش‌بینی کرد. تأثیر خاکستر و نمک‌های موجود در شربت بر ظاهر و مرفولوژی کریستال‌های نهایی به اثبات رسیده است (Faria et al., 2003). اجزای کربناته موجود در خاکستر، مخصوصاً سدیم کربنات یکی از مهم‌ترین ترکیبات جلوگیری‌کننده از فرایند کریستالیزاسیون ساکارز

جدول ۴- بررسی همبستگی بین خصوصیات کیفی و خصوصیات ظاهری

RI	دکستران	نشاسته	رطوبت	pH	رنگ محلول	اینورت	ساکارز	خاکستر	خصوصیات کیفی خصوصیات ظاهری
<b>میانگین مساحت</b>									
۱=۰/۴۹۷	۱=۰/۷۶۰**	۱=۰/۴۷۹	۱=۰/۴۵۶	۱=۰/۰۵۷	۱=۰/۱۲۹	۱=۰/۳۶۴	۱=۰/۶۰۹*	۱=۰/۵۰۳	الگوی لگاریتمی
۱=۰/۵۳۷	۱=۰/۷۷۸**	۱=۰/۴۸۳	۱=۰/۴۹۷	۱=۰/۱۱۴	۱=۰/۲۰۴	۱=۰/۴۲۱	۱=۰/۶۶۸*	۱=۰/۵۶۷	الگوی معکوس
۱=۰/۶۶۹	۱=۰/۸۴۱**	۱=۰/۴۹۰	۱=۰/۶۵۵	۱=۰/۵۷۸	۱=۰/۶۵۸	۱=۰/۶۵۷	۱=۰/۸۶۴**	۱=۰/۸۰۲*	الگوی درجه دوم
۱=۰/۶۷۷	۱=۰/۸۵۵**	۱=۰/۴۹۴	۱=۰/۶۷۴	۱=۰/۶۰۴	۱=۰/۶۵۳	۱=۰/۶۶۱	۱=۰/۸۷۲**	۱=۰/۸۰۷*	الگوی درجه سوم
۱=۰/۴۴۳	۱=۰/۷۲۵*	۱=۰/۵۰۲	۱=۰/۲۴۵	۱=۰/۰۱۱	۱=۰/۱۳۷	۱=۰/۳۵۲	۱=۰/۵۳۲	۱=۰/۵۳۶	الگوی نمایی
<b>میانۀ مساحت</b>									
۱=۰/۵۰۹	۱=۰/۷۵۳**	۱=۰/۵۰۴	۱=۰/۴۴۶	۱=۰/۰۴۷	۱=۰/۱۲۳	۱=۰/۳۶۹	۱=۰/۶۰۱	۱=۰/۵۱۹	الگوی لگاریتمی
۱=۰/۵۴۵	۱=۰/۷۷۱**	۱=۰/۴۹۶	۱=۰/۵۰۰	۱=۰/۱۱۰	۱=۰/۲۱۰	۱=۰/۴۳۲	۱=۰/۶۶۴*	۱=۰/۵۸۵	الگوی معکوس
۱=۰/۶۴۴	۱=۰/۸۵۷**	۱=۰/۵۰۵	۱=۰/۷۵۷*	۱=۰/۵۵۴	۱=۰/۶۰۷	۱=۰/۶۲۶	۱=۰/۸۲۳*	۱=۰/۷۵۰*	الگوی درجه دوم
۱=۰/۶۴۵	۱=۰/۹۳۶**	۱=۰/۵۰۸	۱=۰/۸۸**	۱=۰/۵۵۴	۱=۰/۶۷۳	۱=۰/۶۳۸	۱=۰/۸۲۴*	۱=۰/۷۶۸	الگوی درجه سوم
۱=۰/۴۴۹	۱=۰/۷۱۲*	۱=۰/۵۲۶	۱=۰/۲۰۵	۱=۰/۰۳۴	۱=۰/۱۳۱	۱=۰/۳۴۸	۱=۰/۵۱۲	۱=۰/۵۵۰	الگوی نمایی
<b>میانگین محیط</b>									
۱=۰/۵۰۶	۱=۰/۷۶۸**	۱=۰/۵۲۷	۱=۰/۴۵۱	۱=۰/۰۴۷	۱=۰/۱۰۳	۱=۰/۳۵۹	۱=۰/۶۰۳*	۱=۰/۵۱۲	الگوی لگاریتمی
۱=۰/۵۲۸	۱=۰/۷۸۱**	۱=۰/۵۲۲	۱=۰/۴۷۸	۱=۰/۰۷۹	۱=۰/۱۴۶	۱=۰/۳۹۱	۱=۰/۶۳۶*	۱=۰/۵۴۶	الگوی معکوس
۱=۰/۶۴۳	۱=۰/۸۳۱**	۱=۰/۵۳۰	۱=۰/۶۸۵	۱=۰/۵۴۶	۱=۰/۶۷۰	۱=۰/۶۳۶	۱=۰/۸۲۲*	۱=۰/۷۶۰*	الگوی درجه دوم
۱=۰/۶۴۸	۱=۰/۸۴۰**	۱=۰/۵۳۰	۱=۰/۷۰۳	۱=۰/۵۶۳	۱=۰/۶۷۰	۱=۰/۶۳۸	۱=۰/۸۲۶**	۱=۰/۷۶۲*	الگوی درجه سوم
۱=۰/۴۷۹	۱=۰/۷۵۲**	۱=۰/۵۶۸	۱=۰/۲۷۰	۱=۰/۰۱۰	۱=۰/۱۶۵	۱=۰/۳۸۱	۱=۰/۵۶۵	۱=۰/۵۸۷	الگوی نمایی
<b>میانۀ محیط</b>									
۱=۰/۵۰۸	۱=۰/۷۵۸**	۱=۰/۵۲۴	۱=۰/۴۴۸	۱=۰/۰۴۰	۱=۰/۱۰۹	۱=۰/۳۶۲	۱=۰/۵۹۸	۱=۰/۵۱۷	الگوی لگاریتمی
۱=۰/۵۲۹	۱=۰/۷۷۱**	۱=۰/۵۱۹	۱=۰/۴۷۹	۱=۰/۰۷۵	۱=۰/۱۵۶	۱=۰/۳۹۶	۱=۰/۶۳۳*	۱=۰/۵۵۳	الگوی معکوس
۱=۰/۶۲۳	۱=۰/۸۲۳*	۱=۰/۵۲۷	۱=۰/۷۰۵	۱=۰/۵۲۹	۱=۰/۶۳۶	۱=۰/۶۱۸	۱=۰/۸۰۴*	۱=۰/۷۴۰*	الگوی درجه دوم
۱=۰/۶۲۹	۱=۰/۸۳۴**	۱=۰/۵۲۷	۱=۰/۷۲۸*	۱=۰/۵۴۶	۱=۰/۶۳۶	۱=۰/۶۱۹	۱=۰/۸۰۸*	۱=۰/۷۴۰*	الگوی درجه سوم
۱=۰/۴۸۱	۱=۰/۷۴۴**	۱=۰/۵۵۵	۱=۰/۲۵۸	۱=۰/۰۰	۱=۰/۱۶۹	۱=۰/۳۸۰	۱=۰/۵۵۶	۱=۰/۵۹۱	الگوی نمایی
<b>میانگین مربعیت</b>									
۱=۰/۳۸۲	۱=۰/۵۴۳	۱=۰/۷۶۱**	۱=۰/۲۲۳	۱=۰/۰۴۵	۱=۰/۰۳۹	۱=۰/۲۱۰	۱=۰/۴۲۱	۱=۰/۴۷۱	الگوی لگاریتمی
۱=۰/۳۸۲	۱=۰/۵۴۶	۱=۰/۷۶۲**	۱=۰/۲۳۷	۱=۰/۰۴۵	۱=۰/۰۴۱	۱=۰/۲۰۹	۱=۰/۴۲۱	۱=۰/۴۶۶	الگوی معکوس
۱=۰/۳۸۳	۱=۰/۵۴۱	۱=۰/۷۶۰**	۱=۰/۲۳۰	۱=۰/۰۴۵	۱=۰/۰۳۷	۱=۰/۲۱۱	۱=۰/۴۲۱	۱=۰/۴۷۰	الگوی درجه دوم
۱=۰/۳۸۳	۱=۰/۶۲۱	۱=۰/۷۶۹*	۱=۰/۵۶۱	۱=۰/۰۴۵	۱=۰/۲۴۳	۱=۰/۲۲۸	۱=۰/۴۲۱	۱=۰/۵۰۷	الگوی درجه سوم
۱=۰/۳۸۳	۱=۰/۵۲۳	۱=۰/۸۲۴**	۱=۰/۲۰۰	۱=۰/۰۳۸	۱=۰/۱۴۳	۱=۰/۲۶۰	۱=۰/۴۲۰	۱=۰/۵۵۳	الگوی نمایی
<b>میانۀ مربعیت</b>									
۱=۰/۴۳۷	۱=۰/۶۱۳*	۱=۰/۷۶۶**	۱=۰/۳۳۲	۱=۰/۰۸۴	۱=۰/۰۰۲	۱=۰/۲۶۴	۱=۰/۴۸۰	۱=۰/۵۰۵	الگوی لگاریتمی
۱=۰/۴۳۵	۱=۰/۶۱۳*	۱=۰/۷۶۶**	۱=۰/۳۳۴	۱=۰/۰۸۳	۱=۰/۰۰۴	۱=۰/۲۶۲	۱=۰/۴۷۹	۱=۰/۵۰۲	الگوی معکوس
۱=۰/۴۴۰	۱=۰/۶۱۲*	۱=۰/۷۶۶**	۱=۰/۳۳۰	۱=۰/۰۸۵	۱=۰/۰۰۳	۱=۰/۲۶۸	۱=۰/۴۸۳	۱=۰/۵۱۰	الگوی درجه دوم
۱=۰/۴۸۴	۱=۰/۶۱۵	۱=۰/۷۶۶**	۱=۰/۴۲۷	۱=۰/۱۱۳	۱=۰/۳۳۱	۱=۰/۳۷۴	۱=۰/۵۲۰	۱=۰/۶۱۷	الگوی درجه سوم
۱=۰/۴۳۸	۱=۰/۵۷۸	۱=۰/۸۲۳**	۱=۰/۲۹۷	۱=۰/۰۷۸	۱=۰/۱۷۷	۱=۰/۳۱۶	۱=۰/۴۸۱	۱=۰/۵۸۸	الگوی نمایی
<b>تعداد کریستال‌ها</b>									
۱=۰/۵۷۰	۱=۰/۸۳۱**	۱=۰/۴۰۳	۱=۰/۵۵۶	۱=۰/۱۵۲	۱=۰/۲۵۱	۱=۰/۴۲۰	۱=۰/۶۸۴*	۱=۰/۵۵۱	الگوی لگاریتمی
۱=۰/۵۰۰	۱=۰/۷۹۹**	۱=۰/۳۵۶	۱=۰/۵۲۵	۱=۰/۰۷۹	۱=۰/۱۷۶	۱=۰/۳۴۲	۱=۰/۶۰۶*	۱=۰/۴۶۳	الگوی معکوس
۱=۰/۶۶۸	۱=۰/۸۴۴**	۱=۰/۵۰۸	۱=۰/۵۲۷	۱=۰/۳۷۶	۱=۰/۴۵۴	۱=۰/۶۱۶	۱=۰/۷۸۳*	۱=۰/۷۰۵	الگوی درجه دوم
۱=۰/۷۹۱	۱=۰/۹۳۷**	۱=۰/۵۰۸	۱=۰/۶۳۱	۱=۰/۶۹۶	۱=۰/۶۷۱	۱=۰/۷۳۳	۱=۰/۹۲۴**	۱=۰/۸۹۸**	الگوی درجه سوم
۱=۰/۶۱۹*	۱=۰/۸۲۸**	۱=۰/۴۶۳	۱=۰/۴۳۵	۱=۰/۲۱۰	۱=۰/۳۶۸	۱=۰/۵۳۱	۱=۰/۷۳۸**	۱=۰/۶۹۲*	الگوی نمایی

\* به معنی همبستگی در سطح معنی‌دار  $P \leq 0.05$

\*\* به معنی همبستگی در سطح معنی‌دار  $P \leq 0.01$

آنچه که از این رابطه می‌توان استنباط کرد این موضوع است که افزایش غلظت دکستران در نمونه‌های شکرخام، منجر به افزایش مساحت کریستال‌ها به دلیل کشیده‌تر شدن کریستال در جهت محور C می‌شود که این نتیجه کاملاً هم‌راستا با نظر دیگر نویسندگان است (Argaw, 2010; Faria et al., 2003). علاوه بر این Faria و همکاران (۲۰۰۳) گزارش کردند که افزایش دکستران در شربت‌های نیشکر منجر به افزایش تشکیل کریستال‌های به هم چسبیده دوتایی و چندتایی می‌شود که این مسئله نیز به نوبه خود منجر به افزایش مساحت کلی کریستال خواهد شد.

بررسی روابط رگرسیونی میان میانگین مساحت با میزان اینورت، شدت رنگ محلول، pH، نشاسته، رطوبت و ضریب شکست نمونه‌ها نشان داد که هیچ‌گونه رابطه خطی و یا غیرخطی میان این پارامترها با میانگین مساحت کریستال‌ها وجود ندارد.

پارامتر ظاهری دیگر، میانۀ مساحت کریستال‌ها می‌باشد. میانۀ در آمار به معنی داده‌وسط است یعنی داده‌ای که نیمی از جامعه از آن کمتر و نیمی دیگر از آن بیشتر است. منحصر به فرد بودن میانۀ آن را به پارامتر آماری خاصی تبدیل کرده است. بررسی رابطه میانۀ مساحت با خصوصیات کیفی نشان از وجود همبستگی این مؤلفه با خصوصیات همچون درصد خاکستر، ساکارز، رطوبت و غلظت دکستران داشت. رابطه آن در زیر نشان داده شده است (رابطه‌های ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳):

رابطه (۸)

= میزان خاکستر (الگوی درجه دوم)

$$-0.931 + 0.15 (A_{md}) - 0.00037 (A_{md})^2$$

رابطه (۹)

= درصد ساکارز (الگوی درجه سوم)

$$(A_{md})^3 - 0.00000675 (A_{md})^2 + 0.000935 (A_{md}) - 1.01021 - 0.028$$

رابطه (۱۰)

= درصد ساکارز (الگوی درجه دوم)

$$1.00721 - 0.023 (A_{md}) + 0.0000575 (A_{md})^2$$

دکستران مهم‌ترین پلی‌ساکارید محلول در شربت‌های نیشکری است که بیشترین تأثیر را در ظاهر کریستال‌های شکر نهایی دارد (Sutherland & Paton, 1969). نتایج متعددی مبنی بر تأثیر دکستران در افزایش کشیدگی<sup>۱</sup> و تغییر شکل<sup>۲</sup> کریستال‌های نهایی توسط محققان مختلف گزارش شده است (Chou, 2000; Clarke, 1993; Argaw et al., 2006; Ravnö & Purchase, 2005; Shaikh et al., 2011). نتایج نشان داد که همبستگی معنی‌داری میان میانگین مساحت کریستال‌ها و غلظت دکستران موجود در آنها وجود دارد. رابطه برخی از آنها به صورت زیر است (رابطه‌های ۵، ۶ و ۷):

رابطه (۵)

= غلظت دکستران (ppm) (الگوی درجه سوم)

$$-648396 + 7487 (A_{me}) - 0.0000428 (A_{me})^3$$

رابطه (۶)

= غلظت دکستران (ppm) (الگوی درجه دوم)

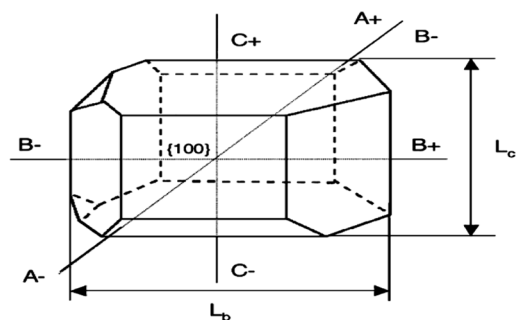
$$-833514 + 11755 (A_{me}) - 0.024 (A_{me})^2$$

رابطه (۷)

= غلظت دکستران (ppm) (الگوی خطی)

$$1/894 (A_{me}) + 14/150$$

محققان گزارش نموده‌اند که افزایش ناخالصی‌های پلی‌ساکاریدی همچون دکستران موجب کشیدگی کریستال نهایی در محور C و افزایش ترکیباتی مانند رافینوز موجب کشیدگی حول محور B خواهد شد (Faria et al., 2003; Ferreira et al., 2011). شکل (۲) نمایی از مختصات یک کریستال ساکارز را به صورت سه‌بعدی نشان می‌دهد.



شکل ۲ - مختصات یک کریستال ساکارز

<sup>1</sup> Elongation

<sup>2</sup> Deformation



رابطه (۱۱)

$$\begin{aligned} &= \text{درصد رطوبت (الگوی درجهٔ سوم)} \\ & (A_{md})^3 + 0.000482 (A_{md})^2 - 0.0000103 (A_{md})^2 \\ & - 0.327 - 0.006 \end{aligned}$$

رابطه (۱۸)

$$\begin{aligned} &= \text{غلظت دکستران (ppm) (الگوی خطی)} \\ & -302/988 + 13/032 (P_{me}) \end{aligned}$$

رابطه (۱۲)

$$\begin{aligned} &= \text{درصد رطوبت (الگوی درجهٔ دوم)} \\ & -0.134 + 0.003 (A_{md}) - 0.0000723 (A_{md})^2 \end{aligned}$$

رابطه (۱۹)

$$\begin{aligned} &= \text{غلظت دکستران (ppm) (الگوی درجهٔ سوم)} \\ & -2098/210 + 65/757 (P_{me}) - 0.006 (P_{me})^3 \end{aligned}$$

رابطه (۱۳)

$$\begin{aligned} &= \text{غلظت دکستران (ppm) (الگوی درجهٔ سوم)} \\ & 1193/235 - 24/863 (A_{md}) + 0.191 (A_{md})^2 \end{aligned}$$

که در این رابطه  $P_{me}$  نشان‌دهنده میانگین محیط کریستال‌های شکر خام است. با استفاده از رابطه‌های بالا می‌توان مقادیر خاکستر نمونه‌های شکر خام را با ضریب اطمینان ۹۵ درصد و مقادیر ساکارز و دکستران را با ضریب اطمینان ۹۹ درصد با در دست داشتن میانگین محیط کریستال‌ها محاسبه کرد. پس می‌توان نتیجه گرفت که افزایش میزان خاکستر علاوه بر مساحت، بر محیط کریستال‌ها نیز تأثیر مستقیم دارد. علاوه بر این، در این پژوهش مشخص گردید که با افزایش میزان ساکارز نمونه‌ها، سطح و محیط کریستال‌های نهایی به دلیل کاهش مقدار ناخالصی‌ها، کاهش می‌یابد و افزایش میزان دکستران در نمونه‌ها به‌طور چشمگیری بر افزایش محیط کریستال‌ها اثر دارد.

در این رابطه‌ها،  $A_{md}$  مربوط به میانهٔ مساحت کریستال‌ها بوده و با توجه به این رابطه‌ها و در اختیار داشتن میزان میانهٔ کریستال‌ها می‌توان با ضریب اطمینان ۹۵ درصد و ۹۹ درصد برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی شکرهای خام را پیش‌بینی کرد.

سنجش محیط با تعیین گوشه‌ها و زوایای کریستال در عکس‌های گرفته‌شده انجام گرفت. محیط می‌تواند همبستگی مستقیمی با مساحت کریستال داشته باشد اما دارای خصوصیات یکسان نیستند. بررسی روابط همبستگی و رگرسیونی مؤلفهٔ میانگین محیط با خصوصیات کیفی شکر خام نشان از وجود روابط معنی‌دار در مدل‌های مختلف داشت که فرمول این رابطه‌ها بدین شکل‌اند (رابطه‌های ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸):

رابطه (۱۴)

$$\begin{aligned} &= \text{درصد خاکستر (الگوی درجه سوم)} \\ & -3/510 + 0.107 (P_{me}) - 0.0000111 (P_{me})^3 \end{aligned}$$

رابطه (۲۰)

$$\begin{aligned} &= \text{درصد خاکستر (الگوی درجه سوم)} \\ & -2/563 + 0.084 (P_{md}) - 0.00000953 (P_{md})^3 \end{aligned}$$

رابطه (۱۵)

$$\begin{aligned} &= \text{درصد خاکستر (الگوی درجه دوم)} \\ & -5/076 + 0.199 (P_{me}) - 0.002 (P_{me})^2 \end{aligned}$$

رابطه (۲۱)

$$\begin{aligned} &= \text{درصد ساکارز (الگوی درجهٔ دوم)} \\ & 104/871 - 0.233 (P_{md}) + 0.002 (P_{md})^2 \end{aligned}$$

رابطه (۱۶)

$$(P_{me}) = 0.933 - 102/489 + \text{درصد ساکارز (الگوی لگاریتمی)}$$

رابطه (۲۲)

$$(P_{md}) = 42/335 + 97/923 = \text{درصد ساکارز (الگوی معکوس)}$$

رابطه (۱۷)

$$\begin{aligned} &= \text{درصد ساکارز (الگوی درجهٔ دوم)} \\ & 106/740 - 0.291 (P_{me}) + 0.003 (P_{me})^2 \end{aligned}$$

رابطه (۲۳)

$$= \text{درصد رطوبت (الگوی درجه سوم)} \\ (P_{md})^3 - 0/00000178 (P_{md}) - 0/428 + 0/015$$

رابطه (۲۴)

$$(P_{md})^{12/213} + 228/944 - \text{غلظت دکستران (الگوی خطی)}$$

رابطه (۲۵)

$$= \text{غلظت دکستران (الگوی درجه سوم)} \\ (P_{md})^3 - 0/006 (P_{md}) - 1634/935 + 56/083$$

رابطه (۲۶)

$$(P_{md})^{0/27} + 54/547 = \text{غلظت دکستران (الگوی نمایی)}$$

مربعیت کریستال‌های شکرخام، میزان و درصد نزدیکی آنها به حالت مربع ایده‌آل را نشان می‌دهد که عکس فاکتور مدوربودن یا کرویت<sup>۱</sup> کریستال‌های شکر است که توسط Pons و Da Motta (۲۰۰۵) تعریف شده است. آنها نشان دادند که حالت کرویت بیشتر کریستال‌های شکر در نتیجه حضور کریستال‌های شکسته و تغییر شکل داده و به هم چسبیده<sup>۲</sup> بود. هم‌شکل بودن و همگون بودن کریستال‌های شکر می‌تواند تأثیر بسزایی در نحوه سانتریفیوژ کردن آنها داشته و همچنین باعث تسریع عملیات خشک کردن شکر شود. با بررسی میزان ارتباط مؤلفه میانگین مربعیت با خصوصیات کیفی شکرهای خام، شاید مهم‌ترین مسئله‌ای که مشاهده می‌شود، رابطه این مؤلفه با میزان نشاسته نمونه‌ها در تمامی الگوهای مورد آزمون باشد. به طوری که رابطه میان این دو متغیر در سطح ۱ درصد برای الگوهای خطی، لگاریتمی، معکوس، درجه دوم و نمایی و در سطح ۵ درصد برای الگوی درجه سوم کاملاً معنی‌دار می‌باشند. فرمول آن به صورت رابطه‌های (۲۷)، (۲۸) و (۲۹) می‌باشد:

رابطه (۲۷)

$$= \text{غلظت نشاسته (الگوی نمایی)} \\ (Sq_{me})^{18/261} + 0/000122$$

رابطه (۲۸)

$$= \text{غلظت نشاسته (الگوی خطی)} \\ (Sq_{me})^{1309/637} + 1309/436 - 1037/436$$

رابطه (۲۹)

$$= \text{غلظت نشاسته (الگوی درجه سوم)} \\ (Sq_{me})^3 - 6174/496 (Sq_{me}) - 8710/130 + 14786/065$$

فاکتور میانگین مربعیت با دیگر مؤلفه‌های کیفی شکرهای خام، رابطه معنی‌داری نداشت. به طوری که از رابطه‌ها و نتایج به دست آمده می‌توان استدلال کرد، افزایش میزان نشاسته در نمونه‌های شکرخام، به صورت معنی‌داری بر ظاهر کریستال‌ها خصوصاً ویژگی چهارگوش بودن آنها تأثیر مستقیم دارد به طوری که این نتایج برای فاکتور کرویت در نمونه‌های شکر نیشکری توسط Pons و Da Motta (۲۰۰۵) گزارش شده بود. آنها نشان دادند که افزایش پلی‌ساکاریدهایی همچون نشاسته در شربت نیشکر، موجب کاهش ویژگی گرد بودن کریستال نهایی می‌شود.

بررسی رابطه میان مربعیت و خصوصیات کیفی نشان داد که بین این مؤلفه و غلظت نشاسته و دکستران رابطه معنی‌دار وجود دارد. فرمول آن به صورت رابطه‌های (۳۰)، (۳۱)، (۳۲) و (۳۳) می‌باشد:

رابطه (۳۰)

$$= \text{غلظت نشاسته (الگوی نمایی)} \\ (Sq_{md})^{19/887} + 0/000131$$

رابطه (۳۱)

$$= \text{غلظت نشاسته (الگوی خطی)} \\ (Sq_{md})^{1294/128} + 1042/160 - 1042/160$$

رابطه (۳۲)

$$= \text{غلظت دکستران (الگوی خطی)} \\ (Sq_{md})^{5359/014} - 5077/592$$

رابطه (۳۳)

$$= \text{غلظت دکستران (الگوی معکوس)} \\ (Sq_{md})^{4034/970} + 4225/668 - 4225/668$$

فاکتور ظاهری دیگر تعداد کریستال‌ها می‌باشد که از شمارش کریستال‌های موجود در ۰/۵ گرم نمونه توسط نرم‌افزار به دست آمده است. این فاکتور با خصوصیات کیفی همچون خاکستر، ساکارز، دکستران

<sup>1</sup> Circularity

<sup>2</sup> Agglomerate

تعیین میزان و نوع ناخالصی‌های موجود در نمونه‌ها باشد. علاوه بر این، ریز و درشت‌بودن بیش از حد کریستال‌های شکر نیز منجر به ایجاد مشکلات متعدد تکنولوژیکی در حین فرایند می‌شود. کشیدگی کریستال‌ها را می‌توان به حضور دکستران به عنوان یکی از مهم‌ترین ناخالصی‌های موجود در شکر خام نسبت داد که علاوه بر تأثیر در ظاهر کریستال‌ها، فاکتور مساحت و محیط کریستال اندازه‌گیری شده را نیز افزایش می‌دهد. ترکیبات تحت عنوان خاکستر مشخص شد که علاوه بر مساحت، بر محیط کریستال‌ها نیز تأثیر مستقیم دارند. برخلاف دکستران که خاصیت کرویت و گردش را در کریستال‌ها افزایش می‌دهد، نتایج این پژوهش نشان داد که نشاسته تمایل به چهارگوش کردن و تشکیل کریستال با ظاهر مربع را داشته و اهمیت اندازه‌گیری فاکتور مربعیت به تأثیر آن بر نحوه سانتریفیوژ کردن و افزایش سرعت مرحله خشک کردن شکر برمی‌گردد. آخرین فاکتور یعنی شمارش تعداد کریستال‌های شکر خام نیز پیش‌بینی میزان ساکارز به عنوان عامل مهم در تعیین میزان فراورده نهایی را، میسر می‌سازد. با استفاده از فرمول‌ها و رابطه‌های به دست آمده در این پژوهش می‌توان برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی مختلف را تا حدودی به کمک روش‌های پردازش تصویر محاسبه کرد. این نتیجه‌گیری می‌تواند گامی مهم و مؤثر در بررسی کنترل کیفی محصولات غذایی و کشاورزی دیگر به کمک تکنیک‌های نوینی چون پردازش تصویر دیجیتال باشد و امید است در آینده استفاده از این تکنیک جایگزینی برای روش‌های معمول و وقت‌گیر آزمایشگاهی باشد.

و ضریب شکست رابطه معنی‌داری دارد (رابطه‌های ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷ و ۳۸).

رابطه (۳۴)

= درصد خاکستر (الگوی درجه سوم)

$$(Cn)^2 + 0.00000013(Cn) - 0.000000615(Cn)$$

$$-37.25 + 0.008$$

رابطه (۳۵)

$$(Cn) = 98/3 + 0.000000398$$

(الگوی نمایشی) درصد ساکارز

رابطه (۳۶)

= غلظت دکستران (ppm) (الگوی درجه سوم)

$$(Cn)^2 + 0.000000854(Cn) - 0.003(Cn) + 4/161$$

$$-99.972$$

رابطه (۳۷)

$$(Cn) = 1/338 + 0.000000672$$

(الگوی خطی) ضریب شکست

رابطه (۳۸)

= ضریب شکست (الگوی نمایشی)

$$(Cn) = 0.000000498 + 0.000000498$$

در این رابطه‌ها، Cn نشان‌دهنده شمارش تعداد کریستال‌ها بوده و با استفاده از رابطه‌های فوق می‌توان میزان خاکستر، ساکارز، دکستران و ضریب شکست نمونه‌های مختلف را با ضرایب اطمینان ۹۹ درصد پیش‌بینی کرد.

### نتیجه‌گیری

ارتباط فاکتورهایی چون محیط، مساحت، میزان مربعیت و شمارش کریستال‌های شکر خام با خصوصیات کیفی ذکر شده، نشان داد که اندازه و ظاهر کریستال‌های شکر خام می‌تواند مشخصه مهمی در

### منابع

- 1- Argaw, G.A. 2010. Sugar Crystal Size Characterization Using Digital Image Processing.
- 2- Argaw, G., Alport, M., & Malinga, S. 2006. Automatic Measurement Of Crystal Size Distribution Using Image Processing. Processing South African Sugar Technology Association, 80:399-411.
- 3- Asadi, M. 2006. Beet-sugar handbook, John Wiley & Sons. P. 99-202.

- 4- Bahrami, M. & Honarvar, M. 2015. Measurement Of Morphological Characteristics Of Raw Cane Sugar Crystals Using Digital Image Analysis. *Journal Of Food Biosciences And Technology*, 5(2):11-18.
- 5- Chen, J.C., & Chou, C.-C. 1993. *Cane Sugar Handbook: A Manual For Cane Sugar Manufacturers And Their Chemists*, John Wiley And Sons, Inc. P. 13-41.
- 6- Chou, C.C. 2000. *Handbook Of Sugar Refining: A Manual For The Design And Operation Of Sugar Refining Facilities*, John Wiley & Sons. P. 70-198.
- 7- Clarke, M. 1993. Sugars And Nonsugars In Sugarcane. *Sugar Cane Handbook*. Wiley, New York, P. 21-39.
- 8- Da Motta, M., & Pons, M.N. 2005. Study Of Morphology Of Sugar Crystals By Image Analysis.
- 9- Dalziel, S., Tan, S.Y, White, E.T., & Broadfoot, R. 1999. An Image Analysis System For Sugar Crystal Sizing. 1999 Australian Society Of Sugar Cane Technologists. Watson Ferguson & Co, 366-372.
- 10-Du, C.-J., & Sun, D.-W. 2004. Recent Developments In The Applications Of Image Processing Techniques For Food Quality Evaluation. *Trends In Food Science & Technology*, 15(5):230-249.
- 11-Faria, N., Pons, M., De Azevedo, S.F., Rocha, F., & Vivier, H. 2003. Quantification Of The Morphology Of Sucrose Crystals By Image Analysis. *Powder Technology*, 133(1):54-67.
- 12-Ferreira, A., Faria, N., Rocha, F., & Teixeira, J. 2011. Using An Online Image Analysis Technique To Characterize Sucrose Crystal Morphology During A Crystallization Run. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(1):6990-7002.
- 13-Martins, P.M., Rocha, F.A., & Rein, P. 2005. Modeling Sucrose Evaporative Crystallization. Part 1. Vacuum Pan Monitoring By Mass Balance And Image Analysis Methods. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(23):8858-8864.
- 14-Mersad, A., Lewandowski, R., Heyd, B., & Decloux, M. 2003. Colorants In The Sugar Industry: Laboratory Preparation And Spectrometric Analysis. *International Sugar Journal*, 105(1254):269-281.
- 15-Mironescu, I., & Mironescu, C. 2006. Image Analysis For Crystallization Process Control. *J. Agroalim. Process. Technol*, 12(1-2):7-12.
- 16-Polanco, L.S. 2009. Assessment Of Target Purity Difference For A Louisiana Sugar Mill. Faculty Of The Louisiana State University And Engineering College In Partial Fulfillment Of The Requirements For The Degree Of Master Of Science In Chemical Engineering In The Department Of Chemical Engineering By Luz Stella Polanco Bs, Universidad Del Valle, Cali-Colombia, 1989.
- 17-Ravnö, A., & Purchase, B. 2005. Dealing With Dextran In The South African Sugar Industry. *Proc S Afr Sug Technol Ass*, 79:28-47.
- 18-Sangwal, K. 2007. *Additives And Crystallization Processes: From Fundamentals To Applications*, John Wiley & Sons. P. 52-100.
- 19-Shaikh, J.G., Bhatti, M.B., Rashid, K., & Khalid, M. 2011. To Introduce The Raw Sugar Refinery, Its Operational Concept And Quality Perspectives In Pakistan. *Life Science International Journal*, 1:2053-2062.
- 20-Sutherland, D., & Paton, N. 1969. Dextran And Crystal Elongation: Further Experiments. *International Sugar Journal*, 18(2):49-61.

- 21-Van Der Poel, P., Schiweck, H., & Schwartz, T. 2015. Sugar Technology Beet And Cane Sugar Manufacture. Sugar Industry-Zuckerindustrie, 140(1):22-25.
- 22-Wojtczak, M. 2003. ICUMSA-International Commission For Uniform Methods Of Sugar Analysis. Gazeta Cukrownicza, 111(6):191-192.
- 23-Wu, D., & Sun, D.-W. 2013. Colour Measurements By Computer Vision For Food Quality Control—A Review. Trends In Food Science & Technology, 29(1):5-20.

## Investigating the Possibility of Estimation of Raw Cane Sugars Physicochemical Properties Using Crystal Morphological Features

Mohammad Erfan Bahrami<sup>1</sup>, Masoud Honarvar<sup>2\*</sup>

- 1- Ph.D Student of Food Science and Technology, Islamic Azad University, Science and Research Branch of Tehran, Iran
  - 2- Associate Professor of Food Science and Technology, Islamic Azad University, Science and Research Branch of Tehran, Iran
- \* Corresponding author (m-honarvar@hotmail.com)

### Abstract

Assessment of quality characteristics of agricultural and food products has been associated with many problems. The main purpose of this study was the evaluation of morphological characteristics of raw cane sugar crystals and then estimation of the raw cane sugars quality using digital image processing techniques. The quality properties of raw cane sugars such as ash content, sucrose content, invert sugar, color solution, pH, concentration of starch and dextran, moisture content and refractive index and also different morphological characteristics such as area means and medians of crystals, perimeter means and medians of crystals, quadrangle ness means and medians of crystals and count number of crystals were identified using digital image processing. The results demonstrated that there was a good correlation between morphological and some physicochemical properties of raw cane sugar such as ash, sucrose content, concentration of starch and dextran as well as refractive index using the obtained equations, some of the quality parameters can be estimated by their morphological characteristics.

**Keywords:** Dextran, Digital Image Processing, Physicochemical Properties, Raw Cane Sugar