

مقاله پژوهشی

توسعه و ارزیابی الگوریتم پردازش تصویر برای دانه‌بندی کریستال‌های شکر سفید

حسن مسعودی^{۱*}، سید محمود اسدی^۲ و غلامرضا اکبری‌زاده^۳

۱. استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳. دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۶، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۵)

چکیده

آزمون الک روش استاندارد است که در کارخانه‌های تولید شکر برای تعیین اندازه ذرات شکر به‌طور گسترده استفاده می‌شود. نیاز به نمونه‌های نسبتاً بزرگ، زمان‌بر بودن، محدود بودن اطلاعات به دست آمده، خودکار و آنلاین نبودن از معایب آزمون الک می‌باشند. تکنیک پردازش تصویر می‌تواند به صورت سریع، خودکار و لحظه‌ای پارامترهای مربوط به اندازه و شکل ذرات شکر را تعیین نماید و جایگزین مناسبی برای آزمون الک می‌باشد. در این پژوهش با هدف ارائه الگوریتم مناسب پردازش تصویر برای تعیین اندازه کریستال‌های شکر سفید، ابتدا کریستال‌های توده شکر با استفاده از آزمون استاندارد الک (در ۷ اندازه الک و ۱۰ تکرار) بر اساس اندازه دسته‌بندی شدند. سپس تصاویر کریستال‌ها با استفاده از یک میکروسکوپ دیجیتال با دوربین ۵ مگا پیکسلی تهیه شد. سه نشانگر پیش‌زمینه-پس‌زمینه (FB)، فرسایش نهایی (UE) و تبدیل فاصله (DT) برای بخش‌بندی تصاویر و استخراج پارامترهای هندسی ذرات در محیط جعبه ابزار پردازش تصویر نرم‌افزار متلب استفاده شدند. تجزیه واریانس مقادیر شاخص میانگین روزنه (MA) بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه دانکن انجام شد. تأثیر هر دو عامل اندازه الک و روش بخش‌بندی و همچنین اثر متقابل آنها بر مقدار MA معنادار بود. مقادیر MA نشانگرهای FB و UE با مقدار MA مرجع به دست آمده با روش دستی تفاوت معناداری در سطح یک درصد نداشت. از آنجایی که نشانگر UE به دلیل خطای کمتر در تعیین MA (برابر با ۱۳/۱۰٪) بهترین عملکرد را داشت، لذا برای تعیین آنلاین اندازه کریستال‌های شکر سفید با تکنیک پردازش تصویر توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شکر سفید، تعیین اندازه ذرات، الگوریتم پردازش تصویر، ماشین بینایی، آزمون الک.

۱. مقدمه

های به هم چسبیده و یا دارای شکستگی باشند، تعیین اندازه با استفاده از آزمون الک به شدت سخت می‌باشد. در این روش توزیع اندازه توسط تعداد نسبتاً کمی از پارامترها مشخص می‌شود. این مشکل مانع از تعیین دقیق توزیع اندازه می‌شود [۴].

روش‌های جایگزین مانند تکنیک‌های میکروسکوپی و پردازش تصویر برای کاهش هزینه، سهولت استفاده و مقایسه داده‌ها با آزمون الک مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۵]. تکنیک ماشین بینایی یکی از سریع‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های اندازه‌گیری غیر تماسی می‌باشد، به طوری که استخراج پارامترهای مورفولوژیکی ذرات را با انجام عملیات پردازش تصویر روی عکس‌های تهیه شده از ذرات امکان‌پذیر می‌نماید. با به‌کارگیری روش‌های عددی مثل سری فوریه، شبیه‌سازی شکل ذره و استخراج ویژگی‌های آن امکان‌پذیر می‌باشد [۳]. ماشین بینایی می‌تواند به عنوان روشی مناسب برای تعیین، نظارت و کنترل بر اندازه، توزیع اندازه و شکل ذرات شکر نیز استفاده شود. پردازش تصویر می‌تواند به صورت مستقیم پارامترهای کمی اندازه و شکل ذرات را تعیین کند، لذا توسعه یک سیستم آنلاین تعیین اندازه ذرات که می‌تواند به حلقه نظارت و کنترل فرایند تولید شکر متصل شود، میسر می‌باشد. با توجه به این مزایا و قابلیت‌ها، استفاده از تکنیک پردازش تصاویر دیجیتال توجه تعداد زیادی از محققان را به خود جلب کرده است و چندین روش نظارت تصویری و کنترل فرایندهای ذره‌ای بر مبنای تصویر ارائه شده‌اند. تصاویر دیجیتال کریستال دارای کاربردهای فراوانی مانند تعیین اندازه ذرات [۷،۶]، مورفولوژی کریستال [۸]، نرخ رشد کریستال [۹]، نظارت بر شکل ذرات [۱۰، ۱۱] و شناسایی تحولات چند شکلی [۱۲] در طول فرایند کریستالیزاسیون می‌باشد.

پژوهشگران امکان استفاده از یک دوربین ویدئویی متصل به یک رایانه شخصی در صنعت شکر را بررسی نمودند. تصاویر کریستال با استفاده از نرم‌افزار IPP^۳ اخذ شد. مشخص شد که نرم‌افزار IPP می‌تواند برای پیش پردازش و

آزمون الک، روش استاندارد اشاره شده توسط کمیسیون بین‌المللی روشهای یکنواخت تجزیه و تحلیل شکر^۱، روشی است که معمولاً در پژوهش‌های مربوط به تعیین اندازه دانه‌های شکر و همچنین در اکثر کارخانه‌های تولید شکر به طور گسترده استفاده می‌شود [۱]. هدف از این کار اطمینان از اندازه مناسب و همچنین دسته‌بندی کریستال‌های شکر می‌باشد. اندازه مطلوب دانه‌های شکر بین ۰/۳ mm تا ۰/۸ mm می‌باشد [۲]. گستردگی استفاده از آزمون الک برای تعیین اندازه به دلیل هزینه پایین، قابلیت اطمینان و راحتی کارکردن با آن است. آزمون الک طیف گسترده‌ای از اندازه ذرات از ۲۰ μm تا ۱۰۰ mm را اندازه‌گیری می‌کند و برای پودرهای خشک و یکدست مناسب است. وزن شکر باقیمانده بر روی هر الک وزن شده و برای تعیین پارامترهای میانگین روزنه^۲ (MA) - یعنی اندازه الکی است که حداقل ۵۰٪ توده شکر از آن عبور کرده باشد - و ضریب تغییرات (CV) مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. این روش می‌تواند توسط عواملی مانند مقدار بار بر روی الک که باعث انسداد روزنه‌ها می‌شود، تحت تأثیر قرار گیرد. عوامل تأثیرگذار دیگر شامل درصد رطوبت، شکل ذره یا اگلومره بودن می‌باشند. نیاز به نمونه‌های نسبتاً زیاد، زمان‌بر بودن آماده‌سازی نمونه‌ها، زمان اندازه‌گیری نسبتاً طولانی، محدود بودن اطلاعات به دست آمده، خودکار و آنلاین نبودن از معایب آزمون الک می‌باشند. ضمن اینکه هنوز استخراج برخی پارامترها مثل کشیدگی، نوک تیز بودن و غیره به راحتی با وسایل آزمایشگاهی امکان‌پذیر نیست [۳]. مشکل عمده آزمون الک در تعیین اندازه کریستال شکر، کم بودن تعداد فواصل اندازه‌گیری است. به طور معمول در این روش از یک تا هشت الک استفاده می‌شود که برای تخمین جزئیات بیشتر در تعیین اندازه کریستال شکر محدودیت ایجاد می‌کند. زمانی که کریستال‌های شکر مورد آزمایش دارای خوشه‌ها و کریستال -

1. The International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis Ltd. (ICUMSA)
2. Mean aperture

3. Image Pro Plus (IPP)

مصنوعی را پس از انجام تحلیل موجی تصویر کریستال توسعه دادند. ضرایب موجی به عنوان ورودی برای یک الگوریتم پرسپترون چند لایه^۱ استفاده شد. نتایج آزمایش بر روی ۱۴۴ تصویر کریستال شکر نشان داد که ارتباط نسبتاً خوبی بین پیش‌بینی متوسط اندازه و متوسط اندازه واقعی، با میانگین خطای ۹ درصد وجود دارد [۷]. در پژوهشی با استفاده از روش ماشین بینایی، کنترل ابعادی ذرات شن و ماسه‌ی مورد استفاده در بتن انجام گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده، اندازه‌گیری ابعادی دانه‌های شن با میانگین خطای ۹۱ درصد امکان‌پذیر می‌باشد. همچنین، با استفاده از توصیف‌گرهای سری فوریه، خواص مورفولوژیکی دانه‌های شن از قبیل کشیدگی و گوشه‌دار بودن استخراج شد [۳].

در حال حاضر در تمامی کارخانه‌های تولید شکر از نیشکر، تعیین اندازه ذرات شکر سفید با آزمون الک انجام می‌شود که ضمن زمان‌بر بودن، امکان برخط شدن را ندارد. لذا هدف اصلی از این پژوهش توسعه یک الگوریتم پردازش تصویر مناسب برای تعیین اندازه کریستال‌های شکر سفید بود که بتواند به صورت برخط و با سرعت بالا و دقتی معادل آزمون استاندارد الک اندازه دانه‌های شکر را تعیین نماید.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. تعیین اندازه و دسته‌بندی ذرات شکر سفید با آزمون الک

ابتدا برای تهیه نمونه‌های شکر در اندازه‌های مختلف و ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های پردازش تصویر، آزمون دانه‌بندی با الک انجام شد. در این آزمایش از ۷ الک با اندازه‌های مختلف مطابق شکل (۱) استفاده شد. دانه‌بندی کریستال‌های شکر با آزمون استاندارد الک در مراحل زیر انجام شد:

- مقدار چهار کیلوگرم شکر سفید تولید شده در کارخانه شکر شرکت کشت و صنعت دعبل خرابی به ۱۰ نمونه ۴۰۰ تقسیم شد.

- پس از قرارگیری الک‌ها بر روی هم نمونه‌های شکر

آستانه تصاویر و همچنین برای محاسبه مساحت، محیط و تعداد کریستال‌ها در تصویر استفاده شود. نرم‌افزار IPP نتوانست به هم خوردگی و روی هم رفتگی کریستال‌ها را از هم جدا کند. در نتیجه کریستال‌هایی که روی هم رفته یا با هم در تماس بودند به عنوان یک کریستال در نظر گرفته شدند. همچنین راه حل‌های مکانیکی، شامل حذف کریستال در محیط‌های چسبنده برای جداسازی کریستال‌ها قبل از تصویربرداری آنها، ارائه شد. نتایج به صورت MA و CV مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و توزیع اندازه به دست آمد [۱۳]. محققین تصاویر کریستال شکر را بر اساس تجزیه و تحلیل طیفی با استفاده از شبکه‌های عصبی طبقه‌بندی کردند. پارامترهای شکل طیف (حداکثر طیف، پهنای باند انرژی و انرژی طیفی کل) به عنوان ورودی یک شبکه عصبی برای طبقه‌بندی تصاویر از نظر یکنواختی کریستال‌ها در نظر گرفته شدند. نتایج حاصل از طبقه‌بندی به صورت کیفی (یکنواخت بودن کریستال‌ها در تصویر) بررسی شدند، لیکن نتایج هیچ داده‌ای برای تعیین کمیت اندازه کریستال‌ها در تصویر نداشتند [۱۴]. در پژوهشی دیگر یک سیستم کلاسیک مبتنی بر تجزیه و تحلیل تصویر برای تعیین اندازه کریستال معرفی شد. یک الگوریتم بر اساس تصویر، ابتدا اشیاء را با توجه به ارزش مقیاس خاکستری آنها طبقه‌بندی کرد. بسته به گردی آنها، اشیاء ناخواسته، از جمله خوشه‌های کریستال، حاشیه‌های اضافی کریستال‌ها و حباب‌ها نادیده گرفته شد. برای حل مشکل بهم‌خوردگی و روی هم رفتگی کریستال‌ها از یک تابع تقسیم به صورت نیم‌خودکار استفاده شد. با این حال، این تابع و توابع مشابه نتوانستند تمام بهم‌خوردگی‌ها و هم‌پوشانی کریستال‌ها را جداسازی کنند و در این مورد، مرزهای کریستال‌ها به صورت دستی ترسیم شد. خواص مختلف کریستال از جمله مساحت، محیط، حداکثر ابعاد خطی، نسبت ابعاد و گردی برآورد شدند. پارامترهای دیگر مانند حجم معادل اندازه و مساحت تصویر شده، محاسبه و برای تعیین توزیع اندازه کریستال مورد استفاده قرار گرفت. MA و CV با استفاده از سیستم تصویربرداری و آزمون الک برای سه نمونه شکر خشک گرفته شده از کارخانه تولید شکر محاسبه شد [۱۵]. محققین دیگر یک روش تعیین اندازه کریستال با استفاده از شبکه عصبی

1. Multi-layer perceptron (MLP)

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (2)$$

$$MA = D_{50} \quad (3)$$

$$SD = \frac{D_{16} - D_{84}}{2} \quad (4)$$

$$CV = \frac{SD}{MA} \times 100 \quad (5)$$

منظور از D_{10} ، D_{16} ، D_{50} ، D_{60} و D_{84} به ترتیب اندازه سوراخ الکی است که حداقل ۱۰، ۱۶، ۵۰، ۶۰ و ۸۴٪ از کریستال‌های شکر از آنها عبور کرده باشند. MA ، میانگین روزه و معادل اندازه الکی است که حداقل ۵۰٪ توده شکر از آن عبور کرده باشد. SD انحراف معیار و CV ضریب تغییرات اندازه کریستال‌ها می‌باشند.

(در ۱۰ تکرار) بر روی الک‌ها ریخته شدند و بعد از تکان دادن الک‌ها برای جداسازی و سقوط بهتر کریستال‌ها، مقدار شکر باقیمانده بر روی هر الک وزن شد.

– درصد وزنی ذرات شکر رد شده از هر الک، از روی وزن شکر باقیمانده روی هر الک محاسبه شد و منحنی دانه‌بندی کریستال‌های شکر ترسیم گردید.

– از روی منحنی دانه‌بندی کریستال‌های شکر مقادیر ضریب یکنواختی (C_u)، ضریب انحنای (C_c) و شاخص‌های MA ، SD و CV کریستال‌های شکر از روابط ۱ تا ۵ تعیین شدند [۱۶، ۶]:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$



شکل (۱) تعیین اندازه کریستال‌های شکر سفید با آزمون استاندارد الک

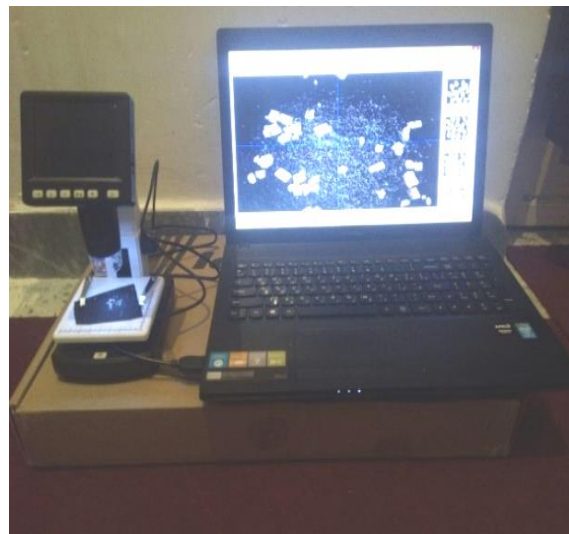
Fig 1. Determining the size of white sugar crystals with standard sieve test

شماره الک Sieve size	اندازه سوراخ‌های الک Sieve Opening (mm)
10	2
16	1.18
20	0.85
30	0.60
40	0.425
50	0.30
> 50	< 0.3

ابتدا نمونه‌های شکر سفید تهیه شده از روی هر الک به منظور افزایش کنتراست تصویر، بر روی یک مقوای سیاه رنگ پخش شدند. سپس، این مقوا در زیر میکروسکوپ قرار داده شد. در نهایت تصویر کریستال‌های شکر توسط دوربین دیجیتال متصل به میکروسکوپ گرفته و در حافظه رایانه ذخیره شدند. برای ذرات شکر باقیمانده بر روی هر الک، تصویربرداری با ۱۰ تکرار و ۲۰ دانه شکر در هر تصویر انجام شد که در مجموع ۷۰ تصویر از کریستال‌های شکر تهیه شد (شکل ۲).

۲.۲. آماده‌سازی سامانه بینایی ماشین و تهیه تصاویر از نمونه‌های شکر سفید

برای تهیه تصاویر از دانه‌های شکر، از یک سامانه بینایی ماشین استفاده شد. مطابق شکل (۲) این سامانه از یک میکروسکوپ دیجیتال کاواک مدل CT038 با رزولیشن ۵ مگاپیکسل و با بزرگ‌نمایی 4X، یک رایانه شخصی (لپ‌تاپ)، کابل رابط USB میکروسکوپ به رایانه و برنامه رایانه‌ای پردازش تصویر تهیه شده در محیط نرم‌افزار متلب تشکیل شده بود.



شکل (۲) سامانه بینایی ماشین برای تهیه تصاویر کریستال‌های شکر (راست) و نمونه‌ای از تصاویر کریستال‌های شکر سفید (چپ)
Fig 2. Machine vision system for taking images of sugar crystals (right) and a sample of white sugar crystals images (left)

برای شناسایی و جداسازی اشیاء از پس‌زمینه استفاده می‌شوند، پیش‌زمینه (کریستال‌ها) از پس‌زمینه - غیر از برخی پیکسل‌های پیش‌زمینه که به دلیل طبقه‌بندی نادرست جزء پس‌زمینه بودند- تفکیک یافت. با استفاده از عملگرهای مورفولوژیکی، حفره‌های درون تصویر پُر شده و تصویر تبدیل به تصویر باینری شد، به این صورت که اشیاء درون تصویر مقدار شدت یک و پیش‌زمینه مقدار صفر را گرفتند [۱۸]. پس از بخش‌بندی تصاویر و شناسایی کریستال‌ها، تعداد دانه‌های شکر درون تصویر تعیین شد و دانه‌ها با استفاده از تابع برجسب زنی^۳ نرم‌افزار متلب برجسب زده شدند. برای مجموعه پیکسل‌ها در تصویر به صورت جداگانه، یک عدد صحیح از یک تا کل دانه‌های موجود در تصویر در نظر گرفته شد. گروه‌بندی تصاویر با استفاده از اصول همسایگی پیکسل‌ها انجام شد. شکل (۴- چپ) نتیجه تشخیص دانه‌های شکر از پس‌زمینه و برجسب‌زنی آنها را نشان می‌دهد.

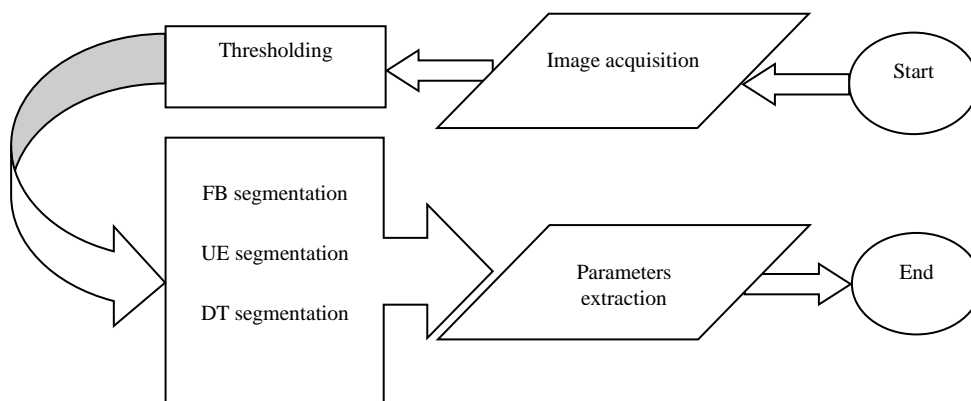
۳.۲. طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم‌های پردازش تصویر در محیط نرم‌افزار متلب

از جعبه ابزار پردازش تصویر نرم‌افزار متلب^۱ نسخه ۲۰۱۳ برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های پردازش تصویر مورد نظر جهت تشخیص اندازه کریستال‌های شکر سفید استفاده شد. شکل (۳) شماتیک مراحل پردازش تصویر استفاده شده را نشان می‌دهد.

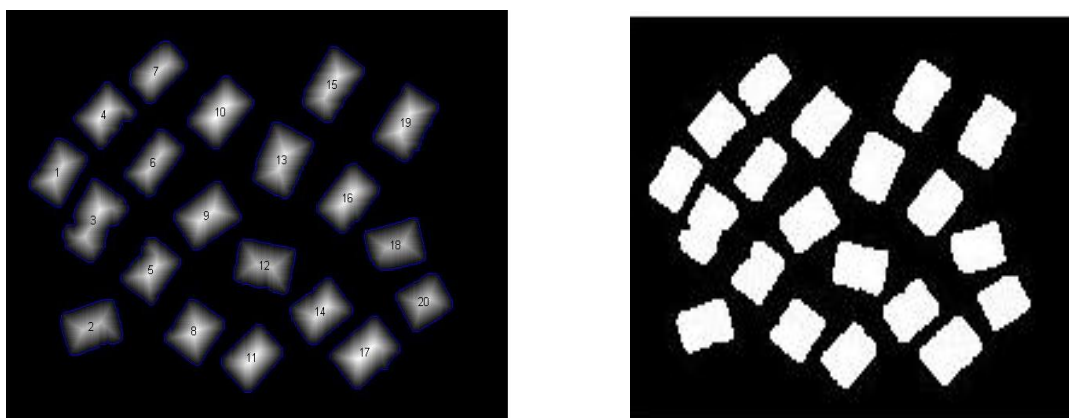
در فرآیند پردازش تصویر ابتدا تصویر رنگی RGB گرفته شده با اعمال عملگر (تابع) میانگین شدت سطوح در هر سطح از کانال R، G و B به سطح خاکستری تبدیل شد. سپس برای گسترش مقادیر شدت پیکسل به تمام سطوح خاکستری ممکن از تابع هیستوگرام تصویر استفاده شد. یک تابع آستانه خودکار برای تبدیل تصاویر خاکستری به تصاویر سیاه و سفید (باینری) بکار برده شد (شکل (۴) راست). مقدار آستانه با استفاده از روش شرح داده شده توسط آتسو [۱۷] بر اساس مقایسه بین واریانس‌ها بوده و در نهایت با انتخاب حداکثر واریانس ارائه می‌شود. با اعمال نشانگرهای^۲ بخش‌بندی که

3. bwlabel

1. MATLAB Image Processing Toolbox
 2. Markers



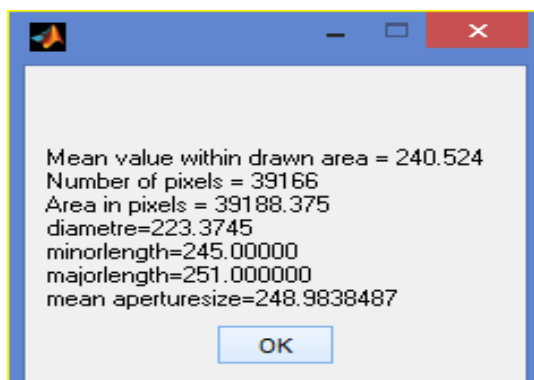
شکل (۳) شماتیک مراحل پردازش تصویر برای شناسایی کریستال‌های شکر سفید
Fig. 3. Schematic of the image processing steps to identify white sugar crystals



شکل (۴) اعمال تابع آستانه برای تبدیل تصاویر خاکستری به سفید و سیاه (راست) و برچسب زنی کریستال‌ها پس از شناسایی (چپ)
Fig 4. Applying the threshold function to convert gray images to black and white (right) and labeling of crystals after identification (left)



شکل (۵) نتیجه بخش‌بندی تصویر با نشانگرهای پیش‌زمینه-پس‌زمینه (a)، فرسایش نهایی (b) و تبدیل فاصله (c)
Fig 5. Result of image segmentation by foreground-background (a), ultimate erosion (b) and distance transform (c) markers



شکل (۶) نمونه‌ای از نتایج حاصل از تعیین ویژگی‌های هندسی کریستال‌های شکر به روش دستی

Fig 6. An example of results of determining the geometric properties of sugar crystals manually

۴.۲. استخراج پارامترهای هندسی کریستال‌های شکر از روی تصاویر پردازش شده

پس از مراحل بخش‌بندی و برجسب زنی اشیاء در تصویر، به کمک توابع ساختاری و هندسی نرم‌افزار متلب تعدادی از ویژگی‌های هندسی ذرات شامل مساحت، محیط، طول محور بزرگ و طول محور کوچک استخراج شدند. سپس پارامترهای تعیین اندازه شامل قطر معادل (d)، میانگین روزنه (MA) و ضریب تغییرات (CV) با استفاده از روابط ۶ تا ۸ محاسبه شدند [۷]:

$$d = \sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}} \quad (۶)$$

$$MA = (L_{max} \times L_{min}^2)^{1/3} \quad (۷)$$

$$CV = \frac{\text{stdv}(MA)}{MA} \times 100 \quad (۸)$$

که در این روابط A، مساحت ناحیه‌ای از کریستال شکر است که به وسیله شمارش تعداد پیکسل‌های دارای مقدار یک، بعد از برجسب زدن تصویر تعیین می‌شود و d، قطر دایره‌ای با همان مساحت کریستال است. بزرگ‌ترین محور طولی (L_{max}) و کوچک‌ترین محور طولی (L_{min}) کریستال‌ها در تصویر باینری، با استفاده از تابع ویژگی‌های ناحیه^۴ در

بعد از اینکه تصویر رنگی به خاکستری تبدیل شد و قبل از تبدیل تصویر به تصویر باینری نیاز است که کریستال‌ها از بخش پس‌زمینه شناسایی و جدا شوند تا در مراحل بعدی برای تعیین اندازه کریستال‌ها، مسیر هموار شود. برای این منظور معمولاً از نشانگرها استفاده می‌شود. سه نشانگر پیش-زمینه-پس‌زمینه^۱ (FB)، فرسایش نهایی^۲ (UE) و تبدیل فاصله^۳ (DT) برای بخش‌بندی و تشخیص دانه‌های شکر به‌طور جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفتند [۶]. در شکل (۵) نتیجه حاصل از اعمال هر سه نشانگر آمده است.

با مقایسه نتایج حاصل از سه نشانگر بخش‌بندی خودکار با نتایج بخش‌بندی دستی، دقت هر یک از نشانگرها در بخش‌بندی تصاویر قابل تعیین است. اگر چه استفاده از روش دستی خسته‌کننده و طاقت‌فرسا می‌باشد، اما استفاده از این روش بهترین شاخص برای ارزیابی دقت الگوریتم‌های بخش‌بندی برای پردازش تصویر می‌باشد [۶]. در این پژوهش برای اجرای بخش‌بندی دستی با استفاده از نرم‌افزار متلب، مرز دانه‌های شکر در تمامی تصاویر توسط انسان مشخص شد و سپس تابعی نوشته شد که با استفاده از آن ویژگی‌های مورفولوژیکی دانه‌های شکر به دست آمد. میانگین روزنه (MA) و ضریب تغییرات (CV) پس از کلیک بر روی دانه‌های شکر و جداسازی آنها از پس‌زمینه، به صورت جداگانه برای هر دانه محاسبه شدند. پارامترهای تعیین اندازه مانند MA براساس پیکسل به دست آمدند که به میلی‌متر تبدیل شده و به عنوان معیار با پارامترهای حاصل از الگوریتم‌های UE، FB و DT مقایسه شدند. نمونه‌ای از نتایج حاصل از تعیین ویژگی‌های هندسی کریستال‌های شکر به روش دستی در شکل (۶) آمده است.

1. Foreground background
2. Ultimate erosion
3. Distance transform

۳. نتایج و بحث

۱.۳. نتایج دانه‌بندی کریستال‌های شکر سفید با آزمون الک

نمودار دانه‌بندی کریستال‌های شکر سفید با آزمون الک در شکل (۷) آمده است. میانگین مقادیر D10، D30 و D60 به ترتیب برابر ۰/۳۵ mm، ۰/۵۳ mm و ۰/۹ mm می‌باشند. با استفاده از روابط (۱) و (۲) مقادیر ضریب یکنواختی (Cu) و ضریب انحناء (Cc) به ترتیب برابر با ۲/۵۷ و ۰/۸۹ به دست آمدند. با توجه به اینکه برای ذرات یکنواخت مقدار این دو پارامتر برابر با یک است، لذا می‌توان گفت که کریستال‌های شکر سفید استفاده شده در این پژوهش از نظر اندازه نسبتاً یکنواخت می‌باشند. همچنین میانگین مقادیر D16، D50 و D84 از روی نمودار دانه‌بندی به ترتیب برابر ۰/۴۱ mm، ۰/۷۹ mm و ۱/۰۷ mm می‌باشند، لذا از روابط ۳ تا ۵ مقدار MA، SD و CV به ترتیب برابر با ۰/۷۹ mm و ۰/۳۳ mm و ۰/۴۱/۷۷٪ به دست می‌آیند. این مقادیر به عنوان مرجع برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های پردازش تصویر استفاده می‌شوند.

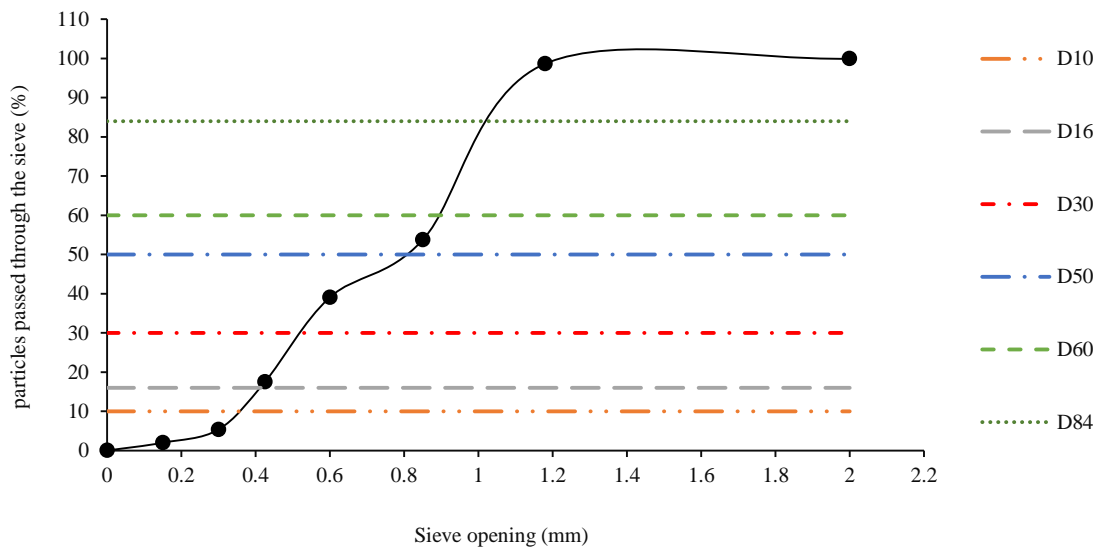
نرم‌افزار متلب محاسبه شدند. میانگین روزنه (MA) به نوعی متوسط اندازه کریستال‌های شکر در تصویر و ضریب تغییرات (CV) معیاری برای ارزیابی یکنواختی (توزیع) اندازه کریستال‌ها در تصویر می‌باشند.

۵.۲. ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های پردازش تصویر و انتخاب الگوریتم مناسب

به منظور ارزیابی دقت الگوریتم‌های بخش‌بندی UE، FB و DT و انتخاب الگوریتم پردازش تصویر مناسب، پس از تعیین مقادیر MA و CV برای تمامی ۷۰ تصویر کریستال‌های شکر با اعمال این روش‌های بخش‌بندی، نتایج حاصل با مقادیر MA و CV روش بخش‌بندی دستی مقایسه شد و دقت اندازه‌گیری به صورت میانگین درصد خطا E از رابطه (۹) محاسبه گردید [۷]:

$$E = \left(\frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{P_i - D_i}{D_i} \right|}{N} \right) \times 100 \quad (9)$$

که در آن N تعداد تصاویر، P_i مقدار MA تصویر بخش‌بندی شده با نشانگرها و D_i مقدار MA تصویر بخش‌بندی شده به صورت دستی می‌باشد.



شکل (۷) نمودار دانه‌بندی کریستال‌های شکر سفید

Fig7. The gradation chart of white sugar crystals

کریستال‌های شکر باقیمانده بر روی الک شماره ۲۰ با قطر روزنه ۰/۸۵ mm با اعمال نشانگر FB در جدول (۱) آمده است. میانگین پارامتر هندسی MA دانه‌های شکر در این تصویر برابر ۰/۹۲ mm است که با مقدار واقعی MA مربوط به این نمونه در آزمون الک (برابر با ۰/۸۵) تفاوت اندکی دارد.

۲.۳. نتایج تعیین اندازه کریستال‌های شکر سفید با پردازش تصویر
برای هر ۲۰ دانه شکر موجود در هر تصویر که نشانگرها بر روی آنها اعمال شد، پارامترهای هندسی مساحت، محیط، بزرگ‌ترین طول و کوچک‌ترین طول با پردازش تصویر تعیین شدند و مقادیر قطر معادل و MA از روابط (۶) و (۷) محاسبه شدند. به عنوان نمونه نتایج به دست آمده برای یک تصویر از

جدول (۱) پارامترهای اندازه برای کریستال‌های شکر در یک تصویر با استفاده از نشانگر FB

Table 1. Size parameters of sugar crystals in an image with FB marker

شماره کریستال Crystal number	مساحت Area (mm ²)	محیط Perimeter (mm)	بزرگ‌ترین طول Max. length (mm)	کوچک‌ترین طول Min. length (mm)	قطر معادل Mean diameter (mm)	میانگین روزنه MA (mm)
1	12.12	2.67	0.96	0.74	3.93	0.81
2	20.97	3.64	1.32	0.93	5.17	1.05
3	13.19	2.78	1.02	0.75	4.10	0.83
4	10.71	2.46	0.82	0.77	3.70	0.79
5	24.53	2.85	1.34	1.08	5.59	1.16
6	14.15	2.87	1.01	0.82	4.25	0.88
7	17.50	3.21	1.16	0.88	4.72	0.95
8	18.46	3.38	1.32	0.81	4.89	0.95
9	23.88	3.82	1.50	0.93	5.52	1.09
10	12.18	2.65	0.91	0.78	3.94	0.82
11	10.34	2.40	0.86	0.69	3.63	0.74
12	21.56	3.60	1.17	1.08	5.24	1.11
13	10.94	2.47	0.86	0.74	3.73	0.78
14	15.89	3.07	1.11	0.83	4.50	0.91
15	27.35	4.15	1.61	0.99	5.90	1.16
16	15.27	3.05	1.16	0.77	4.41	0.88
17	10.20	2.39	0.83	0.70	3.60	0.74
18	9.45	2.35	0.87	0.64	3.47	0.71
19	23.81	3.90	1.46	0.96	5.50	1.10
20	12.90	2.70	0.92	0.81	4.05	0.85
Average	16.27	3.07	1.11	0.83	4.48	0.92
SD	5.61	0.58	0.24	0.12	0.77	0.14
CV	34.55	19.06	22.07	14.85	17.17	15.73

MA کریستال‌های موجود در این تصویر و به عبارتی دیگر یکنواختی آنها است. از آنجایی که کریستال‌های موجود در این تصویر همگی از یک الک انتخاب شده‌اند، این یکنواختی قابل توجیه و عملکرد الگوریتم‌های پردازش تصویر قابل قبول است.

لذا می‌توان گفت که الگوریتم پردازش تصویر توانسته است مقادیر اندازه کریستال‌ها را با دقت مناسبی تعیین نماید. انحراف معیار مربوط به مقادیر MA در این تصویر برابر mm ۰/۱۴ و ضریب تغییرات (CV) (که از رابطه (۸) محاسبه شد) برابر با ۱۵/۷۳٪ می‌باشد؛ که بیانگر تفاوت اندک بین مقادیر

پردازش تصویر نشان می‌دهد که میانگین مقادیر MA و CV نشانگر UE در مقایسه با دو روش بخش‌بندی دیگر کمترین اختلاف را با مقادیر MA واقعی (به دست آمده با روش الک) و روش دستی به عنوان مرجع ارزیابی نتایج دارند؛ لذا در مجموع روش مناسب پردازش تصویر برای تعیین پارامترهای هندسی کریستال‌های شکر، نشانگر UE می‌باشد. نهایتاً از بین روش‌های مختلف بخش‌بندی به ترتیب روش‌های دستی، UE، FB و DT کمترین اختلاف را با نتایج آزمون الک دارند.

۳.۳. مقایسه نتایج الگوریتم‌های پردازش تصویر با نتایج آزمون الک و روش دستی

پس از تصویربرداری از تمامی نمونه‌های آزمون الک، کلیه تصاویر با استفاده از سه الگوریتم FB، UE و DT برای استخراج پارامترهای اندازه، پردازش شدند؛ سپس نتایج با روش‌های دستی و الک مقایسه شد. نتایج تعیین اندازه کریستال‌های شکر باقیمانده بر روی الک‌ها با نشانگرهای مختلف در جدول (۲) آمده است. مقایسه نتایج الگوریتم‌های

جدول (۲) مقایسه نتایج سه الگوریتم پردازش تصویر با نتایج آزمون الک و روش دستی

Table 2. Comparison of the results of three image processing algorithms with sieve test and manual method results

شماره الک Sieve number	روش الک		نشانگر FB		نشانگر UE		نشانگر DT		روش دستی	
	Sieve method		FB marker		UE marker		DT marker		Manual method	
	MA (mm)	CV (%)	MA (mm)	CV (%)	MA (mm)	CV (%)	MA (mm)	CV (%)	MA (mm)	CV (%)
10	2	19.09	2.58	17.17	2.72	19.30	2.78	23.40	2.73	17.55
16	1.18	19.09	1.47	17.08	1.39	16.47	1.54	19.67	1.37	16.89
20	0.85	17.70	0.96	16.69	0.92	18.85	1.02	17.21	0.92	17.05
30	0.60	19.58	0.69	16.84	0.66	18.39	0.67	19.04	0.63	17.51
40	0.425	20.52	0.47	19.18	0.45	18.76	0.52	19.43	0.44	18.31
50	0.30	19.61	0.33	15.93	0.32	16.56	0.37	15.93	0.33	15.96
> 50	0.25	18.90	0.22	18.36	0.21	18.27	0.23	20.15	0.19	18.50

۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۵۰ (>) و عامل دوم روش بخش‌بندی تصویر در چهار سطح (شامل سه نشانگر FB، UE و DT و روش دستی) بود، لذا در مجموع ۲۸ تیمار وجود داشت. مطابق جدول (۳) تأثیر هر دو عامل اندازه الک و روش بخش‌بندی و همچنین اثر متقابل آنها بر مقدار MA معنادار است.

۴.۳. تجزیه واریانس نتایج الگوریتم‌های پردازش تصویر

تجزیه واریانس مقادیر MA بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۱۰ تکرار انجام شد. عامل اول اندازه الک در هفت سطح (شامل اندازه‌های ۱۰، ۱۶، ۲۰،

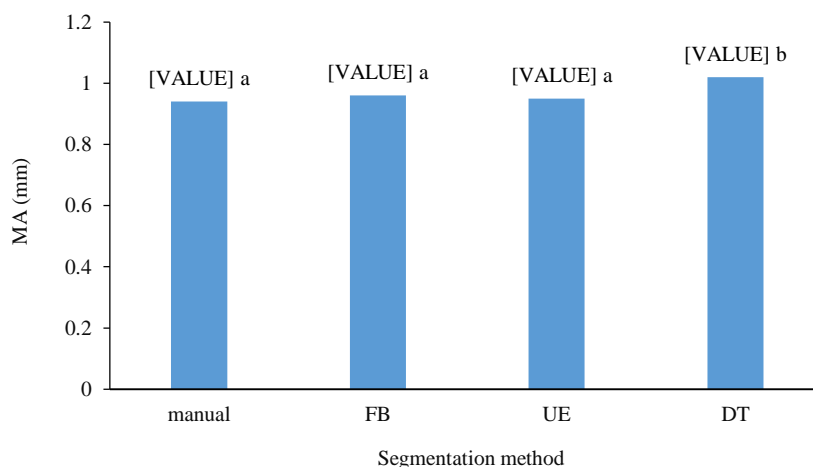
جدول (۳) تجزیه واریانس نتایج MA روش‌های مختلف تعیین اندازه کریستال‌های شکر سفید

منابع تغییرات Source of variation	df	SS	MS	F
اندازه الک Sieve size	6	182.80	30.466	3574.24 **
روش بخش‌بندی تصویر Image segmentation method	3	0.25	0.082	9.58 **
اندازه الک × روش بخش‌بندی Sieve size × Segmentation method	18	0.32	0.018	2.09 **
خطا Error	252	2.15	0.009	
کل Total	279	185.51		

UE با مقدار MA مرجع به دست آمده با روش دستی تفاوت معناداری ندارد، لیکن مقدار MA نشانگر DT با مقادیر بقیه نشانگرها و نیز روش دستی تفاوت معنادار در سطح یک درصد دارد. لذا دو نشانگر FB و UE مناسب تر هستند و باید برای استفاده در سامانه بینایی ماشین تعیین اندازه کریستال‌های شکر سفید در اولویت قرار گیرند. همچنین مطابق نتایج آزمون دانکن، مقدار MA تمامی الک‌ها با یکدیگر در سطح یک درصد اختلاف معنادار دارند که بیانگر اندازه متفاوت کریستال‌ها در الک‌ها است.

به عبارتی دیگر بین روش‌های مختلف بخش‌بندی در تعیین مقدار MA در اندازه‌های مختلف کریستال‌های شکر اختلاف معناداری وجود دارد. برای تعیین اینکه کدام روش بخش‌بندی با روش دستی تفاوت معناداری ندارد، مقایسه میانگین مقادیر MA روش‌های مختلف بخش‌بندی با آزمون چند دامنه دانکن انجام شد.

شکل (۸) نتیجه مقایسه میانگین مقادیر MA کریستال‌های شکر که با نشانگرهای مختلف به دست آمده را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقادیر MA نشانگرهای FB و



شکل (۸) مقایسه میانگین مقادیر MA به دست آمده توسط نشانگرهای مختلف با آزمون دانکن
Fig 8. Comparison of mean values of MA obtained by different markers with Duncan's test

مطابق جدول (۴)، درصد خطای الگوریتم UE نسبت به دو الگوریتم دیگر کمتر و در نتیجه دقت این الگوریتم برای تعیین اندازه کریستال‌های شکر سفید بالاتر و برابر ۸۷/۸۹٪ است. در نتیجه از بین سه الگوریتم پردازش تصویر ارزیابی شده در این پژوهش، الگوریتم فرسایش نهایی (UE) برای تعیین اندازه کریستال‌های شکر سفید توصیه می‌شود.

۵.۳. ارزیابی دقت الگوریتم‌های بخش‌بندی

برای ارزیابی دقت هر یک از الگوریتم‌های بخش‌بندی از رابطه (۹) استفاده شد که درصد خطای هر کدام از الگوریتم‌ها را نسبت به روش دستی محاسبه می‌کند. هر چه درصد خطا کمتر باشد، عملکرد الگوریتم مناسب‌تر است و دقت الگوریتم برای تعیین اندازه کریستال‌های شکر بالاتر است.

جدول (۴) درصد خطای هر کدام از الگوریتم‌های بخش‌بندی

Table 4. Error of each segmentation algorithm (%)

نوع الگوریتم بخش‌بندی Segmentation method	DT	UE	FB
درصد خطا Error (%)	17.27	10.13	12.46

۴. نتیجه‌گیری

فرسایش نهایی (UE) عملکرد بهتری نسبت به دو الگوریتم دیگر داشت؛ لذا این نشانگر برای تعیین اندازه کریستال‌های شکر سفید با تکنیک پردازش تصویر توصیه می‌شود.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز از این تحقیق در قالب پژوهانه به شماره ۹۵/۳/۰۲/۳۱۴۰۰ تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین نویسندگان مقاله از مدیریت و کارکنان شرکت کشت و صنعت نیشکر دعبل خزاعی که در انجام این پژوهش همکاری نمودند، سپاس‌گزاری می‌نمایند.

این پژوهش برای بررسی امکان جایگزینی روش پردازش تصویر به جای روش استاندارد الک جهت تعیین اندازه کریستال‌های شکر سفید انجام شد. کریستال‌های شکر بررسی شده در این پژوهش دارای یکنواختی نسبتاً مناسبی از نظر اندازه ذرات بودند. نتایج نشان داد که می‌توان از روش پردازش تصویر برای تعیین اندازه کریستال‌های شکر استفاده نمود. همچنین الگوریتم‌های پردازش تصویر ارائه شده توانستند مقادیر اندازه کریستال‌های شکر سفید را با دقت مناسبی تعیین کنند. از بین سه الگوریتم پردازش تصویر ارائه شده (دارای نشانگرهای FB، UE و DT)، الگوریتم با نشانگر

مراجع

- [1] ICUMSA (The International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis Ltd.). Particle Size Distribution of White Sugar and Plantation White Sugar by Sieving. ICUMSA Method GS 2/9-37, 2007. URL <http://www.icumsa.org>. Accessed 01.05.17.
- [2] Běnnár, M., Betoret, E., Bojňanská, T., Brño, D., Hambáľková, J., & Richter, A. (2012). Optimal particle size distribution of white sugar. *Czech Sug. Sug. Beet J.*, 128, 385-389.
- [3] Khalili, Kh., & Emam, S.M. (2018). Dimensional control of sand particles based on the Iranian National Standard Organization using image processing technique. *Iran. J. Manuf. Eng.*, 5(3), 52-62. [In Persian]
- [4] Miller, K.F. & Beath, A.C. (2000). The measurement of raw sugar crystal size by sieving and laser diffraction. In: *Proceeding of the Aust. Soc. Sug. Cane Technol.* (pp. 393-398), Brisbane, Australia.
- [5] Argaw, G.A. (2007). *Sugar Crystal Size Characterization Using Digital Image Processing*. Durban, South Africa: University of KwaZulu-Natal, School of Physics.
- [6] Argaw, G.A., Alport, M.J. & Malinga, S.B. (2006). Automatic measurement of crystal size distribution using image processing. In: *Proceeding of the Cong. of S. Afr. Sug. Technol. Ass.* (pp. 399-411), Durban, South Africa.
- [7] Mhlongo, A.Z. & Alport, M.J. (2002). Application of artificial neural network techniques for measuring grain sizes during sugar crystallization. In: *Proceeding of the Cong. of S. Afr. Sug. Technol. Ass.* (pp. 460-468), Durban, South Africa.
- [8] Wang, X.Z., Roberts, K.J., & Ma, C. (2008). Crystal growth measurement using 2D and 3D imaging and the perspectives for shape control. *Chem. Eng. Sci.*, 63, 1173-1184.
- [9] Wang, L.M., Zhu, M.R., & Fan, C.L. (2009). Application of image recognition in sugar crystal size measurement. *Computer Simul.*, 26, 294-297.
- [10] Patience, D.B., & Rawlings, J.B. (2001). Particle-shape monitoring and control in crystallization processes. *AIChE J.*, 47, 2125-2130.
- [11] De Anda, J.C., Wang, X.Z., & Roberts, K.J. (2005). Multi-scale segmentation image analysis for the in-process monitoring of particle shape with batch crystallisers. *Chem. Eng. Sci.*, 60, 1053-1065.
- [12] Dharmayat, S., De Anda, J.C., Hammond, R.B., Lai, X.J., Roberts, K.J., & Wang, X.Z. (2006). Polymorphic transformation of L-glutamic acid monitored using combined on-line video microscopy and X-ray diffraction. *J. Crystal Growth*, 294, 35-40.
- [13] Schumann, G.T. & Thakur, C.S. (1993). The use of video camera and PC for crystal image analysis. In: *Proceedings of the S. Afr. Sug. Technol. Ass.* (pp. 135-139), Durban, South Africa.
- [14] Palenzuela, E.S.G. & Cruz, P.I.V. (1996). Techniques for classifying sugar crystallization images based on spectral analysis and the use of neural networks. In: *Proceedings of the IWISP '96* (pp. 641-645), Manchester, United Kingdom.
- [15] Dalziel, S.M., Tan, S.Y., White, E.T. & Broadfoot, R. (1999). An image analysis system for sugar crystal sizing. In: *Proceeding of the Aust. Soc. Sug. Cane Technol.* (pp. 366-372), Brisbane, Australia.



[16]Merkus, H.G. (2009). *Particle Size Measurements: Fundamentals, Practice, Quality*. Dordrecht, Netherlands: Springer.

[17]Otsu, N. (1979). A threshold selection method from grey level histograms. *IEEE Transactions on Syst., Man, and Cybernetics*, 9, 62-66.

[18]Venkataraman, S., Allison, D.P., Qi, H., Morrell-Falvey, J.L., Kallewaard, N.L., Crowe Jr., J.E., & Doctaycz, M.J. (2006). Automated image analysis of atomic force microscopy images of rotavirus particles. *Ultra microscopy*, 106, 829-837.

Research Article
Development and Evaluation of an Image Processing Algorithm for Gradation of White Sugar Crystals

Hassan Masoudi ^{1*}, Seyed Mahmood Asadi ², Gholamreza Akbarizadeh ³

1. Assistant professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz
2. Former M.Sc. student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz
3. Associate professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz

Abstract

Sieve test is a standard method widely used in sugar factories to determine the size of sugar particles. Needing for relatively large samples, time-consuming, limited measured parameters, being not automatic and offline are main disadvantages of the sieve test. Image processing technique can determine the parameters related to size and shape of sugar particles, quickly, automatically and instantly and is a good alternative to the sieve test. The objective of this study was presenting a suitable image processing algorithm for online determination of white sugar crystals size. First, the sugar mass crystals were sorted according to size using the standard sieve test (with 7 sieves at 10 replications). Then, the crystals images were taken by a digital microscope with 5 megapixels image sensor. Three marking methods, including foreground-background (FB), ultimate erosion (UE) and distance transform (DT), were used for images segmentation and determination of the crystals morphological parameters in the image processing toolbox of MATLAB software. The analysis of variance of mean aperture (MA) values was performed based on factorial experiment in a completely randomized design and the mean of MA values was compared with Duncan's multiple range test. The effects of both sieve size and segmentation method factors as well as their interaction on the MA value were significant. The MA of FB and UE markers were not significantly different from the reference MA value that obtained manually at 1% level. Since, the UE marker showed the best performance in MA determination due to a lower error (equal 10.13%), so it is recommended for online determination of white sugar particles size by image processing.

Key words: White sugar, Particle size determination, Image processing algorithm, Machine vision, Sieve test.

*Corresponding Author: hmasoudi@scu.ac.ir