

Research Article

Agricultural Engineering, 46(4) (2024) 411-427  
DOI: 10.22055/agen.2024.45414.1696

ISSN (E): 2588-526X  
ISSN (P): 2588-5944

## Determining the Sugar Crystals Size in Massecuite using Image Processing Algorithms

H. Masoudi<sup>1,\*</sup>, S.M. Asadi<sup>2</sup> and Gh. Akbarizadeh<sup>3</sup>

1. Associate professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Khuzestan, Iran.
2. Graduated M.Sc. student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Khuzestan, Iran.
3. Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Khuzestan, Iran.

Received: 30 November 2023

Accepted: 13 January 2024

\*Corresponding Author: hmasoudi@scu.ac.ir

### Abstract

**Introduction:** In sugar factories, control of sugar crystals growth in the crystalliation stages is very important to produce sugar grains with a special and required size. Machine vision systems can determine the size of sugar crystals. The main challenge of image processing systems is the lack of powerful algorithms to separate contact and overlap crystals accurately. So far, various algorithms have been developed to detect crystals and remove their overlapping. However, these methods have not been able to fully detect and separate the overlap of crystals. The purpose of this study was to provide an appropriate image processing algorithm for determining the size of crystals in sugar baking solution (massecuite), which gives us the characteristics of size and shape for the particles in the baking pot instantly to evaluate and improve the quality of the final product.

**Materials and Methods:** The massecuite samples were provided from Debal Khozaei Sugarcane Agro-industrial Company, Ahvaz, Iran. After preparation of the sugar crystals samples under lam and lamer (microscope slides), a digital camera with two Megapixel resolution, attached to a ZS9 Olympus microscope, was used for image capturing. Then, using MATLAB image processing toolbox, the color image (RGB) transferred to grey scale. A mixture of structural operations such as erosion and expansion with spatial filters including median filter were used to remove the image noises. The function of histogram local adjustment was used to improve image contrast. Three methods of segmentation including convexity, fuzzy clustering, and multiplicative intrinsic component optimization (MICO), along with their combination were used to segment the image of massecuite crystals. A reference image was used to determine accuracy of the image processing algorithms. To do this, the massecuite crystals image was manually segmented by Image J software. All segmentation algorithms were applied on the reference image, and seven geometrical parameters, including the mean aperture (MA), coefficient of variation (CV), and standard deviation (SD) were calculated for all the sugar particles in the image. Finally, the percent of MA measurement error was calculated for each sugar crystal to find the best algorithm.

**Results and Discussion:** In manual segmentation, the number of sugar crystals in the selected image was 26. In the manually segmented image, the average of MA, SD and CV for sugar grains were 0.422 mm, 0.157 mm and 37.18% respectively. The relatively large CV of the calculated



geometrical parameters indicated the non-uniformity of the sugar particles size inside the massecuite. The convexity method was able to perform well in some areas of the image, and in some other areas, it could not detect the contact between the crystals. The value of the SD and CV of all the geometric parameters determined by the convexity method were greater than the reference values determined by the manual segmentation. This indicates the weaker performance of this method in determining the sugar crystals size compared to the manual method. The values of SD and CV of all geometric parameters determined by the combined fuzzy-convexity method were greater than the reference values, but lower than the values of the convexity method alone. So, the combination of the fuzzy clustering method with the convexity method improved the segmentation performance of crystal images. The SD and CV values of all geometric parameters determined by the combined MICO-convexity method were greater than the reference values, but lower than the values of convexity and fuzzy-convexity methods. This point shows the better performance of the combined MICO-convexity method in segmenting the images of sugar crystals compared to the other two methods. The average of MA, SD and CV for sugar crystals in the image were 0.382 mm, 0.150 mm and 39.23% respectively and had no significant difference with the reference method values in 5% probability level. The mean error of MA determined by the combined MICO-convexity algorithm was 13.24% and Pearson correlation factor was 0.88. As a result, the combined MICO-convexity method was proposed to determine the size of sugar crystals in massecuite.

**Conclusion:** After applying different algorithms on the selected image of sugar crystals in massecuite, it was found that the combined MICO-convexity method can separate sugar crystals well. Also, the CV obtained for this image segmentation algorithm was not much different from the CV of the manual reference method, so this algorithm can be used in the image processing system of the massecuite crystals.

**Keywords:** *Massecuite, digital microscope, image processing, convexity method, fuzzy clustering method, MICO method.*

## تعیین اندازه کریستال‌های محلول شکر در دوره پخت با الگوریتم‌های پردازش تصویر

حسن مسعودی<sup>۱\*</sup>، سید محمود اسدی<sup>۲</sup> و غلامرضا اکبری زاده<sup>۳</sup>

۱- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز ایران

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۳- استاد گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

## تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۹

پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳

## کلمات کلیدی:

مسکوئیت،

میکروسکوپ دیجیتال،

پردازش تصویر،

روش تحدب،

روش خوشه‌بندی فازی،

روش میکو.

## چکیده

در فرآیند تولید شکر، کنترل میزان رشد کریستال‌های شکر در مراحل دانه‌سازی، برای داشتن ذرات شکر با اندازه مورد نیاز و یکسان، ضروری است. امروزه از روش‌های مختلفی به ویژه پایش چشمی توسط اپراتور برای تعیین اندازه ذرات استفاده می‌شود، که روشی زمان‌بر و کم دقت است. هدف از این پژوهش ارائه الگوریتم پردازش تصویر مناسب برای تعیین اندازه کریستال‌های شکر در محلول پخت (مسکوئیت) بود که بتواند ویژگی‌های اندازه و شکل ذرات درون دیگ پخت را ارائه دهد. نمونه‌های مسکوئیت از کارخانه تولید شکر شرکت کشت و صنعت نیشکر دعبل خزایی تهیه شدند. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها در زیر لام و لامل، با یک دوربین دیجیتال متصل به میکروسکوپ با رزولوشن دو مگاپیکسل تصویربرداری شد. در جعبه ابزار پردازش تصویر نرم‌افزار متلب، ابتدا تبدیل تصویر رنگی به خاکستری، حذف نویزها با عملیات فرسایش و گسترش به کمک فیلترهای مکانی از جمله فیلتر میانه و بهبود کنتراست با تابع تعدیل محلی هیستوگرام انجام شد. برای بخش‌بندی تصویر، سه روش تحدب، خوشه‌بندی فازی و میکو و ترکیب آنها استفاده شد. در نهایت ضریب تغییرات روش‌های دستی و الگوریتم‌های پردازش تصویر محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد و درصد خطای محاسبه میانگین روزنه بدست آمد. در تصویر بخش‌بندی شده دستی، میانگین روزنه ذرات شکر برابر ۰/۴۲۲ میلی‌متر و انحراف معیار ۰/۱۵۷ میلی‌متر با ضریب تغییرات برابر ۳۷/۱۸ درصد بدست آمد. در بخش‌بندی تصویر با روش ترکیبی میکو-تحدب، میانگین روزنه ذرات شکر برابر ۰/۳۸۲ میلی‌متر و انحراف معیارشان ۰/۱۵۰ میلی‌متر با ضریب تغییرات برابر ۳۹/۲۳ درصد بدست آمد. میانگین خطای اندازه‌گیری میانگین روزنه نسبت به روش دستی برابر با ۱۳/۲۴ درصد و ضریب همبستگی مقادیر میانگین روزنه دو روش ۰/۸۸ بود. به دلیل نزدیکی مقادیر ضریب تغییرات، روش بخش‌بندی میکو-تحدب برای تعیین اندازه کریستال‌های شکر در مسکوئیت با پردازش تصویر مناسب‌تر بود.

\* عهده دار مکاتبات

Email: hmasoudi@scu.ac.ir

### مقدمه

در کارخانجات تولید شکر، کنترل بهینه رشد دانه‌های شکر در مراحل دانه‌سازی، برای تولید دانه‌های شکر با اندازه ویژه و مورد نیاز، بسیار مهم است. می‌توان گفت تعیین اندازه دانه شکر یک پیش نیاز کلیدی برای کنترل رشد دانه‌های شکر در مرحله دانه‌سازی و تعیین کیفیت محصول نهایی است. تولیدکنندگان باید اطمینان حاصل کنند که محصول مطابق با مشخصات مورد نیاز تولید می‌شود. باید کنترل شود که ذرات شکر نه بیش از حد کوچک و نه خیلی بزرگ تولید شوند، بلکه در اندازه مورد نیاز مشتری، نسبتاً یکنواخت و هم اندازه باشند. به صورت تجاری، تعیین اندازه دانه‌های شکر یا بصورت چشمی (مشاهده توسط کاربر در زیر میکروسکوپ) یا با استفاده از الک انجام می‌شود (۱ و ۹). این روش‌ها جدا از اینکه زمان زیادی را برای بررسی نیاز دارند، اطلاعات نسبتاً کمی را نیز برای تصمیم‌گیری در اختیار کاربر قرار می‌دهند. در مرحله پخت نیاز به تعیین آنی اندازه کریستال‌های شکر می‌باشد که این کار توسط الک مقذور نیست. همچنین روش چشمی، ذهنی و تجربی بوده و بسته به تجربه کاربر، دقت آن متفاوت است. به همین دلیل، روش اندازه‌گیری دیگری که بتواند بصورت لحظه‌ای اندازه کریستال‌ها در دیگ پخت را تعیین نماید، مورد نیاز است.

تعدادی روش‌های مستقیم و غیرمستقیم برای نظارت آنی بر رشد کریستال‌های شکر در دیگ پخت ارائه شده‌اند. روش‌های غیرمستقیم - مانند اندازه‌گیری PH، هدایت الکتریکی محلول و نقطه‌ی جوش - نمی‌توانند برای تعیین اندازه کریستال‌های شکر بصورت کمی در قالب کمیته‌های میانگین روزنه<sup>۱</sup> (MA) و ضریب تغییرات<sup>۲</sup> (CV) استفاده شوند. همچنین اطلاعات کمی محدودی را فراهم

می‌کنند و تجزیه و تحلیل اطلاعات در این روش‌ها نیاز به صرف زمان زیادی دارد. علاوه بر این، اکثر این روش‌ها ذهنی و بصری بوده و امکان اشتباه در آنها زیاد است (۲). روش‌های مستقیم تعیین اندازه کریستال‌های شکر شامل روش الک برای شکر خشک (۱۳)، امواج مایکروویو (۲۲ و ۸)، پرتوهای لیزر (۱۷ و ۱۶) و تصویربرداری از کریستال‌های شکر (۱، ۲۰ و ۲۴) می‌باشند. با روش‌های مستقیم می‌توان پارامترهای کمی تعیین اندازه کریستال‌های شکر (مانند MA و CV) را بدست آورد.

ایده استفاده از تصویربرداری برای تعیین اندازه کریستال‌های شکر، به اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی در آفریقای جنوبی برمی‌گردد. روش تصویربرداری می‌تواند بطور کمی، دقیق و قابل تکرار اندازه کریستال‌های شکر را تعیین نماید. همچنین کنترل رشد کریستال‌های شکر در طول مرحله کریستال‌سازی و اندازه‌گیری و تحلیل نمونه‌ها را مقذور می‌سازد (۱). در این روش از یک دوربین نصب شده بر روی دیگ پخت برای اخذ تصویر از کریستال‌های در حال رشد استفاده می‌شود و یا از ذرات شکر خالص تصویربرداری می‌شود. سپس تصویر گرفته شده از کریستال‌های شکر به نرم افزار پردازش تصویر منتقل شده و در آنجا شاخص‌های اندازه کریستال استخراج می‌شوند (۳).

فاریا و همکاران<sup>۳</sup> سامانه تجزیه و تحلیل تصویر به صورت خودکار برای دانه شکر بر اساس روش تحلیل تفکیکی عوامل<sup>۴</sup> (DFA) را طراحی کردند. اندازه بلورها با دسته‌بندی ذرات خروجی از فرایند پخت مشخص شدند، و سپس با توجه به مشخصات آنها به دو نوع تقسیم شدند (۶). آرگاوا<sup>۵</sup> تعیین اندازه و ارزیابی کریستال شکر در مرحله پخت را با استفاده از پردازش تصویر بررسی نموده و نتیجه گرفتند که اندازه‌گیری ذرات شکر در طی

3- Faria *et al.*

4- Discriminant Factor Analysis

5- Argaw

1- Mean Aperture

2- Coefficient of Variation

استفاده از این سامانه بدست آمد (۱۱). کاردونا<sup>۶</sup> در پژوهش خود الگوریتم پردازش تصویر را بر روی دو نمونه از تصاویر کریستال‌های شکر اعمال نمود. خطای تعیین ابعاد بزرگ و کوچک کریستال‌های شکر به ترتیب در نمونه اول ۳/۰۷ و ۳/۰۸ درصد و در نمونه دوم ۲/۴۷ و ۲/۹۲ درصد بود. همچنین برای نمونه اول و دوم به ترتیب مقادیر MA برابر با ۰/۹۵۷۱ و ۰/۶۶۲ میلی‌متر و مقادیر CV برابر با ۲۹/۸۳ و ۶۱/۴۷ درصد بدست آمد (۴).

چالش اصلی سامانه‌های پردازش تصویر، نبود یک الگوریتم توانمند برای جداسازی تماس و همپوشانی کریستال‌ها در تعیین اندازه است (۲۱ و ۱۰). تاکنون الگوریتم‌های مختلفی برای تشخیص کریستال‌ها و حذف همپوشانی آنها توسعه یافته‌اند. همچنین از مورفولوژی ریاضی به عنوان یک ابزار کمکی برای نشانه‌گذاری و حذف تماس و همپوشانی کریستال‌ها استفاده شده است. لیکن، این روش‌ها نتوانسته‌اند به طور کامل همپوشانی کریستال‌ها را تشخیص داده و جدا کنند. در سال‌های اخیر الگوریتم‌های یادگیری عمیق مانند شبکه‌های عصبی پیچشی<sup>۷</sup> (۵ و ۷ و ۲۸) و شبکه‌های عصبی بازگشتی<sup>۸</sup> (۲۹) برای شناسایی و دسته‌بندی کریستال‌های شکر در دیگ پخت استفاده شده‌اند، که نتایج امیدوارکننده‌ای داشته‌اند. بعنوان نمونه در پژوهش وو و همکاران<sup>۹</sup> یک روش شناسایی و تقسیم‌بندی آمودال کریستال‌های نیشکر، بر اساس شبکه‌های عصبی عمیق پیشنهاد شد. نتایج نشان داد که ساختار شبکه پیشنهادی برای سه نوع عملکرد کریستالی، با MIoU برابر با ۸۱/۴۷ درصد و OA معادل ۹۱ درصد تقسیم‌بندی بهتری دارد (۲۵).

این پژوهش با هدف توسعه یک الگوریتم پردازش تصویر مناسب جهت تشخیص و تعیین اندازه کریستال‌های شکر در محلول دیگ پخت (مسکوئیت) به منظور

فرایند تبلور شکر برای بهبود کیفیت تولید شکر و افزایش سرعت ضروری بوده و تحقق مکانیزه کردن فرایند تبلور شکر نیاز به توسعه فناوری‌های تشخیصی دارد (۱). وانگ و همکاران<sup>۱</sup> یک سامانه تشخیصی برای فرایند تبلور شکر از نیشکر را طراحی کردند. در این سامانه از یک دوربین CCD همراه با الگوریتم بینایی ماشین به ترتیب، برای بدست آوردن تصویر دانه و پردازش تصویر استفاده شد. امکان اجرایی شدن این سامانه به اثبات رسید، اما زمان پردازش تصاویر در آن بیش از حد طولانی بود (۲۴). ژانگ و همکاران<sup>۲</sup> از تغییر و تحول فضای رنگی و روش آستانه بهبود یافته اوتسو<sup>۳</sup> برای پردازش تصویر ساکارز استفاده نمودند. برخی از مقادیر مشخصه، مانند تعداد، مساحت، محیط و شاخص شکل، پس از پردازش تصویر استخراج شدند (۲۶). پان و همکاران<sup>۴</sup> یک سامانه تهیه تصویر و روشی برای کنترل فرآیند تبلور شکر از نیشکر طراحی کردند. در این سامانه برخی از مقادیر مشخصه دانه‌های شکر توسط الگوریتم پردازش تصویر استخراج شد (۱۸). همچنین پان و همکاران یک سامانه دیگر برای استخراج اطلاعات تصویر ساکارز طراحی کردند. این سامانه بهبود یافته دارای یک رابط گرافیکی کاربر بود، که می‌توانست عملیات نظارت، تصویربرداری و ذخیره‌سازی را به صورت آنلاین انجام داد (۱۹). لیاو و همکاران<sup>۵</sup> یک سامانه تشخیصی آنلاین برای تجزیه و تحلیل اندازه ذرات ریز توسعه دادند. تصاویر ذرات توسط فناوری اسکن نوری خطی تهیه شدند و توسط پردازش تصویر دیجیتال مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. این سامانه متشکل از چهار واحد، شامل: واحد جداسازی ذرات، واحد اکتساب تصویر، واحد پردازش تصویر و یک واحد کنترل الکترونیکی بود. توزیع اندازه ذرات و کرویت آنها با

1- Wang *et al.*2- Zhang *et al.*

3- Improved Otsu threshold method

4- Pan *et al.*5- Liao *et al.*

6- Cardona

7- Convolutional neural network (CNN)

8- Recurrent neural network (RNN)

9- Wu *et al.*

استفاده شد. برای بهبود کنتراست تصویر از تابع تعدیل محلی هیستوگرام با دستور `histeqadabt` استفاده شد. پس از فرایند پیش‌پردازش تصویر، تصویر وارد مرحله اصلی پردازش یعنی بخش‌بندی شد. تماس و همپوشانی کریستال‌ها در مسکوئیت، بخش‌بندی تصویر را دشوار می‌نمود. برای بخش‌بندی تصاویر از روش‌های تحدب، خوشه‌بندی فازی، میکو و ترکیب آنها استفاده شد تا در نهایت الگوریتمی که بهترین عملکرد را دارد، انتخاب شود.

### بخش‌بندی تصویر با روش تحدب<sup>۲</sup>:

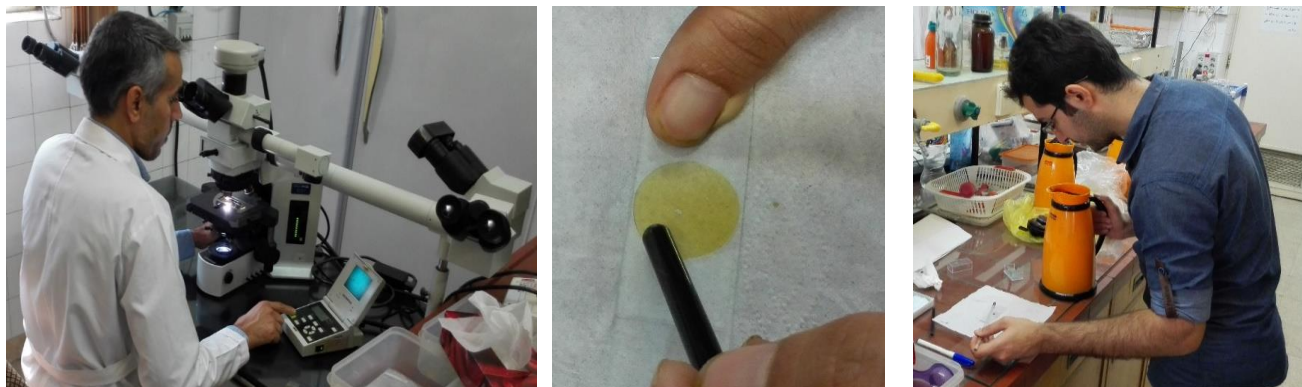
یکی از روش‌های بخش‌بندی تصویر، به ویژه برای جداسازی اشیاء متصل به هم، استفاده از ویژگی‌های هندسی اشکال از جمله تحدب آنها می‌باشد. تحدب یک شیء در تصویر، زمانی به وجود می‌آید که دو شیء در تصویر، روی هم قرار گیرند و یا دارای نقاط اتصال باشند. در الگوریتم پوش محدب، فرایند بخش‌بندی از بالا سمت چپ تصویر برای پیدا کردن اولین ردیف دارای کمترین مقدار شدت روشنایی آغاز شد. سپس در میان این ردیف، ستون با کمترین مقدار شدت روشنایی به عنوان اولین نقطه مرزی در نظر گرفته شد. برای یافتن نقطه مرزی بعدی، مطابق شکل ۳ مسیر در خلاف عقربه‌های ساعت ادامه یافت. نقطه‌ای که بردار ترسیم شده بین نقطه اولیه تا آن نقطه دارای کمترین زاویه نسبت به افق بود، به عنوان نقطه مرزی بعدی در نظر گرفته شد. این فرایند تا پیدا کردن کل نقاط مرزی شیء ادامه یافت (۱).  $\phi_n$  زاویه بین بردار متصل از پیکسل  $P_k$  به پیکسل  $P_q$  با محور  $x$ ‌ها است، که با کمک تعریف ضرب داخلی بردارها و داشتن مولفه‌های دو بردار محاسبه شد.

خودکار کردن تعیین اندازه کریستال‌های شکر در مرحله پخت و جایگزینی آن با روش چشمی انجام شد. که باعث افزایش سرعت و دقت در تعیین اندازه کریستال‌های شکر خواهد شد. نوآوری این پژوهش جایگزینی روش بینایی ماشین بجای روش چشمی در تعیین اندازه کریستال‌های شکر در مسکوئیت در کارخانجات شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی است که تاکنون در ایران انجام نشده است.

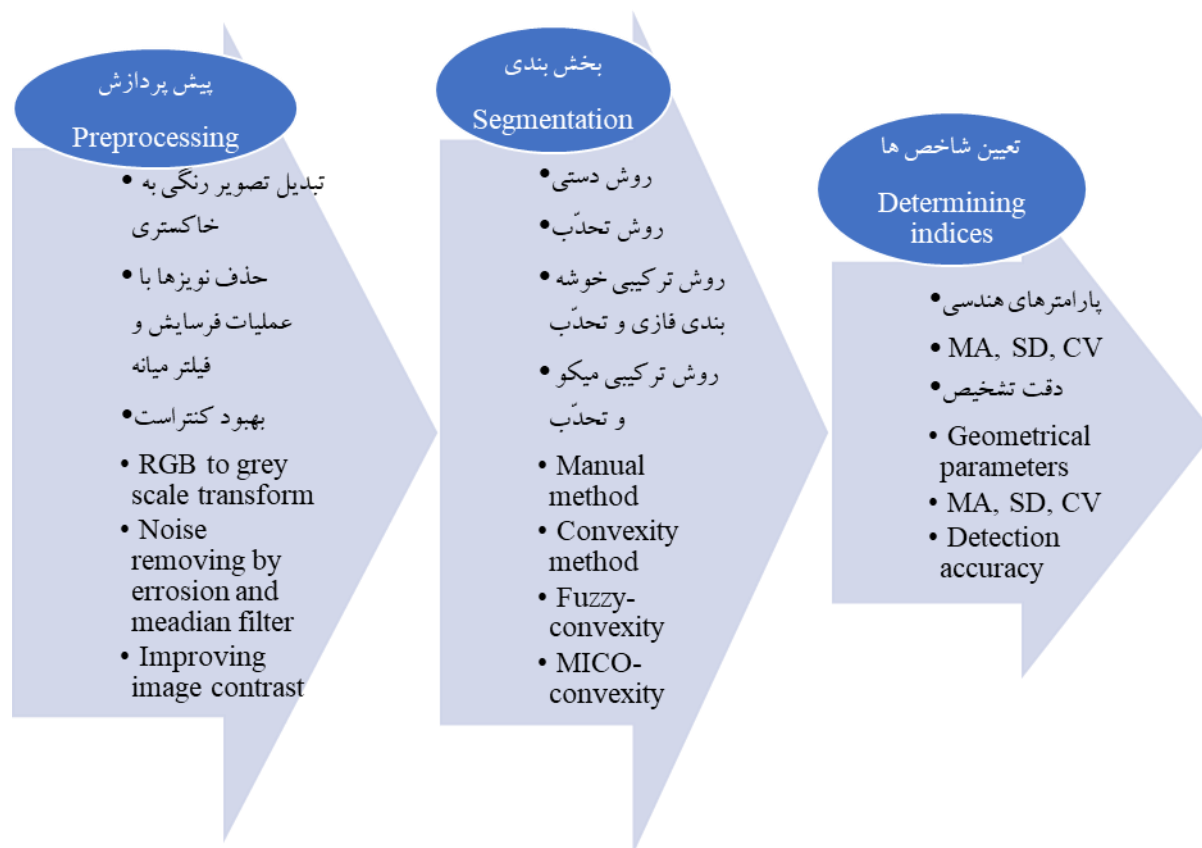
### مواد و روش‌ها

نمونه‌های مسکوئیت از کارخانه تولید شکر شرکت کشت و صنعت دعبل خزایی تهیه شدند. نمونه‌ها (حدود ۳۰۰ میلی‌لیتر) از مراحل مختلف رشد کریستال و در حین پخت از دیگ تهیه شده و به آزمایشگاه برای اخذ تصویر منتقل شدند. پس از آماده‌سازی نمونه‌های کریستال‌های شکر در زیر لام (اسلاید شیشه‌ای با ابعاد  $۷۵ \times ۲۵$  میلی‌متر و ضخامت حدود ۱ میلی‌متر) و لامل (صفحه‌ای شیشه‌ای نازک با ابعاد  $۲۰ \times ۲۰$  میلی‌متر و ضخامت کمتر از  $۰/۲$  میلی‌متر)، با استفاده از یک دوربین دیجیتال متصل به میکروسکوپ OLYMPUS مدل ZS9 با رزولیشن دو مگاپیکسل و با بزرگنمایی 204X (عدسی چشمی با ضریب ۲۰ و عدسی شیئی با ضریب ۴ و در مجموع با بزرگنمایی ۸۰ برابر) اقدام به تصویربرداری شد (شکل ۱). برای کنتراست بهتر تصاویر، نوردهی از پایین استفاده شد. از جعبه ابزار پردازش تصویر نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> نسخه ۲۰۱۲a برای کدنویسی و پیاده‌سازی الگوریتم‌های مورد استفاده در این پژوهش استفاده شد.

شکل ۲ مراحل مختلف فرآیند تعیین اندازه کریستال‌های شکر در محلول پخت را نشان می‌دهد. ابتدا تصویر رنگی (RGB) گرفته شده به تصویر با فضای خاکستری تبدیل شد. سپس برای حذف نویزهای درون تصویر از جمله حباب‌ها، از ترکیبی از عملیات ساختاری مانند، فرسایش و گسترش با فیلترهای مکانی از جمله فیلتر میانه

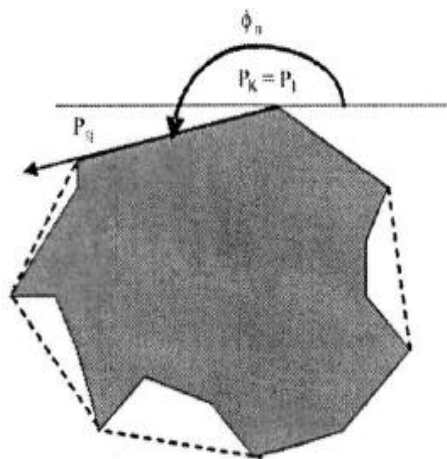


شکل (۱) آماده‌سازی و اخذ تصویر از کریستال‌های شکر در مسکوئیت با میکروسکوپ دیجیتال OLYMPUS  
 Figure (1) Preparation and image acquisition from the sugar crystals in massecuite by OLYMPUS digital microscope



شکل (۲) مراحل فرایند پردازش تصاویر کریستال‌های شکر در مسکوئیت  
 Figure (2) Image processing steps of the massecuite sugar crystals

مسعودی و همکاران: تعیین اندازه کریستال‌های محلول...



شکل (۳) نمونه‌ای از پوش محدب بر روی شی (۱)

Figure (3) A sample of convex hull on the object (1)

ویژگی‌ها یا خواص مشابهی هستند؛ در حالیکه پیکسل‌های نواحی مختلف (حتی مجاور) غیرهمگن هستند. معیار  $P$  برای تعیین اینکه یک پیکسل متعلق به کدام ناحیه است، می‌تواند شدت روشنایی، بافت، رنگ و سایر ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری تصویر باشد. برای تقسیم‌بندی تصویر به نواحی مختلف، باید دو شرط زیر برقرار گردد (۳):

$$P(S_i) = true \quad (3)$$

$$P(S_i \cap S_j) = false, i \neq j$$

### بخش‌بندی تصویر با روش میکو (MICO):

روش «بهینه‌سازی چندگانه مولفه اصلی» یا میکو، که برای بخش‌بندی و تخمین میدان بایاس تصاویر MRI مغز ارائه شده است، بر مبنای بهینه‌سازی انرژی و بهبود بخش‌بندی و تخمین میدان بایاس تصویر به صورت هم‌زمان می‌باشد. در تصاویر کریستال شکر در مسکوئیت به دلیل اختلاط کریستال‌های شکر در شربت شکر ناهمگنی شدت<sup>۳</sup> روشنایی تصویر اتفاق افتاد. این امر باعث ایجاد طیف‌های مختلف شدت در سراسر تصویر شد. برای حذف این ناهمگنی شدت و اصلاح تصویر از روش میکو استفاده شد.

### بخش‌بندی تصویر با روش خوشه‌بندی فازی:

تکنیک تقسیم‌بندی فازی می‌تواند روی تصاویر با ویژگی‌های مشابه با موفقیت اعمال شود. اجرای روش خوشه‌بندی فازی، برای به دست آوردن مقادیر عضویت خوشه‌ها شامل اشیاء و پس زمینه بود. ویژگی‌های متفاوتی بین اشیاء و پس زمینه تصویر وجود داشت، که الگوریتم خوشه‌بندی فازی با پیدا کردن این ویژگی‌ها، باعث جداسازی اشیاء و ناحیه پس‌زمینه شد. با اعمال این الگوریتم مناطق اتصالی در تصاویر ذرات تا حدودی برطرف شد، زیرا مقادیر عضویت آنها برای اشیاء و پس‌زمینه متفاوت بودند. تصویر بخش‌بندی شده نهایی با تفریق مناطق اتصالی از تصویر آستانه بدست آمد (۲۷).

تقسیم‌بندی تصویر با روش خوشه‌بندی فازی چندمنظوره به شرح زیر انجام می‌شود. فرض کنید  $F$  نشان دهنده تمام پیکسل‌های یک تصویر است، مجموعه  $F$  به  $n$  ناحیه تقسیم‌بندی می‌شود (۳):

$$F = \bigcup_{i=1}^n S_i \quad (1)$$

$$S_i \cap S_j = \emptyset, i \neq j \quad (2)$$

بطوریکه  $S_i$  و  $S_j$  به ترتیب  $i$ مین و  $j$ مین ناحیه از تصویر و  $\emptyset$  مجموعه تهی است. برای هر ناحیه، تمام پیکسل‌ها دارای



- مساحت (A): ناحیه‌ای از دانه شکر که با شمارش تعداد پیکسل‌های دارای مقدار یک بعد از برچسب زدن تصویر تعیین شد.

- قطر معادل (d): قطر دایره‌ای هم مساحت با ذره که قطر سطح تصویر شده<sup>۱</sup> نیز نامیده می‌شود و از رابطه ۴ بدست آمد:

$$d = \sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}} \quad (۴)$$

- بزرگ‌ترین طول ( $L_{max}$ ) و کوچک‌ترین طول ( $L_{min}$ ) ذرات، با استفاده از تابع regionprope نرم افزار متلب محاسبه شدند.

- میانگین روزنه (MA) که به نوعی متوسط اندازه ذرات است، با داشتن  $L_{max}$  و  $L_{min}$  از رابطه ۵ تعیین شد (۱۵):

$$MA = (L_{max} \times L_{min}^2)^{1/3} \quad (۵)$$

- ضریب تغییرات (CV) معیاری برای ارزیابی توزیع اندازه ذرات است، که از رابطه ۶ محاسبه شد (۳ و ۱۳):

$$CV = \frac{stdv(MA)}{MA} \times 100 \quad (۶)$$

- دقت بخش‌بندی: برای تعیین دقت الگوریتم‌های بخش‌بندی، از تصویر مرجع استفاده شد. ابتدا، تصویر کریستال‌های شکر در مسکوئیت به صورت دستی و با نرم افزار Image J 150i بخش‌بندی و تفکیک شد. سپس، الگوریتم‌های بخش‌بندی بر روی همان تصویر اعمال شدند تا پارامترهای هندسی کریستال‌ها محاسبه شوند. سپس دقت هر یک از الگوریتم‌ها به صورت میانگین درصد خطا (E) از رابطه ۷ محاسبه شد (۳):

$$E = \left( \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{P_i - D_i}{D_i} \right|}{N} \right) \times 100 \quad (۷)$$

در این رابطه  $P_i$  و  $D_i$  به ترتیب مقادیر MA مربوط به  $i$ مین تصویر با الگوریتم بخش‌بندی و روش دستی و N تعداد تصاویر می‌باشد.

ناهمگنی شدت روشنایی در تصویر، زمانی اتفاق می‌افتد که تغییرات شدیدی در مقدار شدت روشنایی یک ناحیه از تصویر در سراسر تصویر وجود داشته باشد. به دلیل وجود ناهمگنی شدت در تصویر، همپوشانی قابل توجهی از طیف‌های مختلف شدت به وجود می‌آید، که این مسئله باعث طبقه‌بندی نادرست نواحی و اشیاء در تصویر می‌شود (۳).

روش میکو، یک تکنیک بهینه‌سازی انرژی برای ارزیابی و اصلاح میدان بایاس و همزمان بخش‌بندی تصویر را فراهم می‌کند. میدان بایاس با ناهمگنی شدید موجود در فضای تصویر در ارتباط است و تصویر واقعی یک ویژگی فیزیکی بافت را تعریف می‌کند. روش پیشنهادی به طور کامل از تجربه تصاویر MR به دو مولفه چندگانه استفاده می‌کند، یکی تصویر واقعی که خصوصیات فیزیکی بافت‌ها را نشان می‌دهد و میدان بایاس که ناهمگنی شدت تصویر و ویژگی‌های فضایی مربوطه آن را مشخص می‌کند. برآورد میدان بایاس و تقسیم‌بندی بافت به طور همزمان با یک فرایند بهینه‌سازی انرژی به دست می‌آید که با هدف بهینه‌سازی دو جزء چندگانه یک تصویر MR به دست می‌آید. میدان بایاس با استفاده از محاسبات ماتریس کارآمد به صورت یکپارچه بهینه شده، که توسط تحلیل عددی ماتریسی تأیید شده‌اند. این الگوریتم برای هر متغیر، از تحذب استفاده کرده که باعث استحکام الگوریتم در بهینه‌سازی انرژی می‌شود. این روش می‌تواند بافت را به صورت سه بعدی و حتی چهار بعدی با تنظیم براساس فضا و زمان یا مستقل از زمان تقسیم‌بندی کند. ارزیابی کمی و مقایسه با برخی از نرم افزارهای رایج، عملکرد روش میکو را از لحاظ استحکام و دقت نشان داده است (۱۲).

### ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های پردازش تصویر:

پس از بخش‌بندی و برچسب‌زنی کریستال‌های شکر در تصویر، ویژگی‌های هندسی ذرات (شکل ۴)، میانگین روزنه (MA) و ضریب تغییرات (CV) ذرات و همچنین دقت بخش‌بندی الگوریتم‌ها به شرح زیر محاسبه شدند (۳، ۹ و ۱۳).

مسعودی و همکاران: تعیین اندازه کریستال‌های محلول...

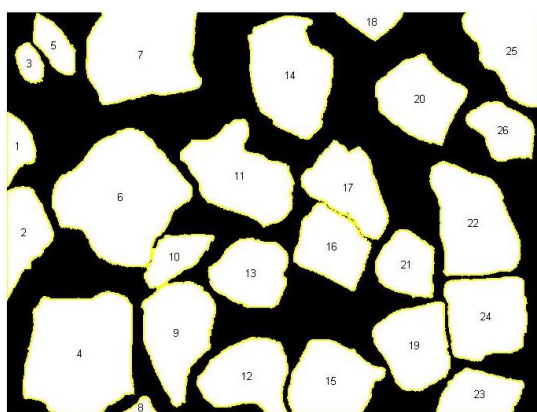


شکل (۴) برخی از قطرهای هندسی کریستال‌های شکر (۲۳)  
 Figure (4) Some geometrical diameters of the sugar crystals (23)

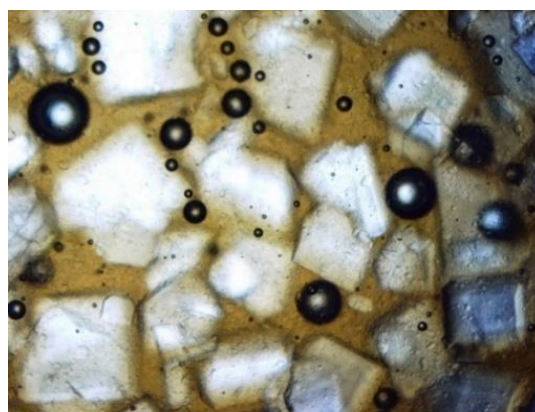
شکل ۵-ب تصویر بخش‌بندی شده به روش دستی با نرم افزار Image J را نشان می‌دهد. تعداد کل کریستال‌های شکر در تصویر اخذ شده ۲۶ عدد بود. برای تمامی ذرات شکر موجود در تصویر که نشانگر دستی بر روی آن اعمال شد، هفت پارامتر هندسی استخراج شدند که در جدول ۱ مقادیر میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات آنها آورده شده است. ضریب تغییرات نسبتاً بزرگ پارامترهای هندسی محاسبه شده بیانگر غیریکنواخت بودن اندازه ذرات شکر در داخل مسکوئیت است.

### نتایج و بحث

تصویر منتخب اخذ شده از کریستال‌های شکر در مسکوئیت در شکل ۵-الف آمده است. این تصویر از پخت نهایی مرحله آخر (اصطلاحاً ۹۰ درصد) اخذ شده است. مشاهده می‌شود که تصویر اخذ شده از کریستال‌های شکر در دوره پخت دارای نویزهای مختلف از جمله حباب‌ها و همچنین نقاط تماس و همپوشانی می‌باشد. این موارد باعث ایجاد مشکل در بخش‌بندی تصویر و در نهایت تفکیک کریستال‌ها از پس‌زمینه می‌شود. بنابراین، روش‌های معمول از جمله استفاده از حوضچه برای بخش‌بندی اینگونه تصاویر کارساز نیست و باید روش‌های پیچیده‌تری برای این منظور استفاده شود.



(b)



(a)

شکل (۵) الف) تصویر گرفته شده از کریستال شکر در مسکوئیت، ب) تصویر بخش‌بندی شده به روش دستی  
 Figure (5) a) Image taken from the sugar crystal in massecuite, b) Manually segmented image

## نتایج الگوریتم تحدب

متاسفانه این روش عملکرد مناسبی در بخش‌بندی تصویر کریستال‌ها نداشت. این امر ممکن است، ناشی از وجود کتراست و کیفیت پایین در نواحی مختلف تصویر باشد. زمانی که تصویر رنگی به تصویر خاکستری تبدیل می‌شود، به دلیل اختلاط کریستال‌ها در شربت، تفکیک کریستال‌ها در فضای خاکستری مشکل است، و الگوریتم خوشه‌بندی فازی نتوانسته بر این مشکل فائق آید. یکی دیگر از دلایل احتمالی ناکامی روش خوشه‌بندی فازی برای تفکیک کریستال‌های شکر در تصویر، وجود نویزهایی است که از مرحله پیش‌پردازش باقی مانده‌اند. این نویزها شامل حباب‌های هوا می‌باشند که در اثر جوشیدن مسکوئیت و بصورت طبیعی در داخل دیگ پخت ایجاد می‌شوند. این حباب‌ها، بصورت دایره‌های سیاه رنگ با هسته سفید در تصویر (شکل ۵-الف) دیده می‌شوند. وجود این حباب‌ها باعث ایجاد مشکل در بخش‌بندی تصویر و در نهایت تفکیک کریستال‌ها از پس زمینه می‌شود.

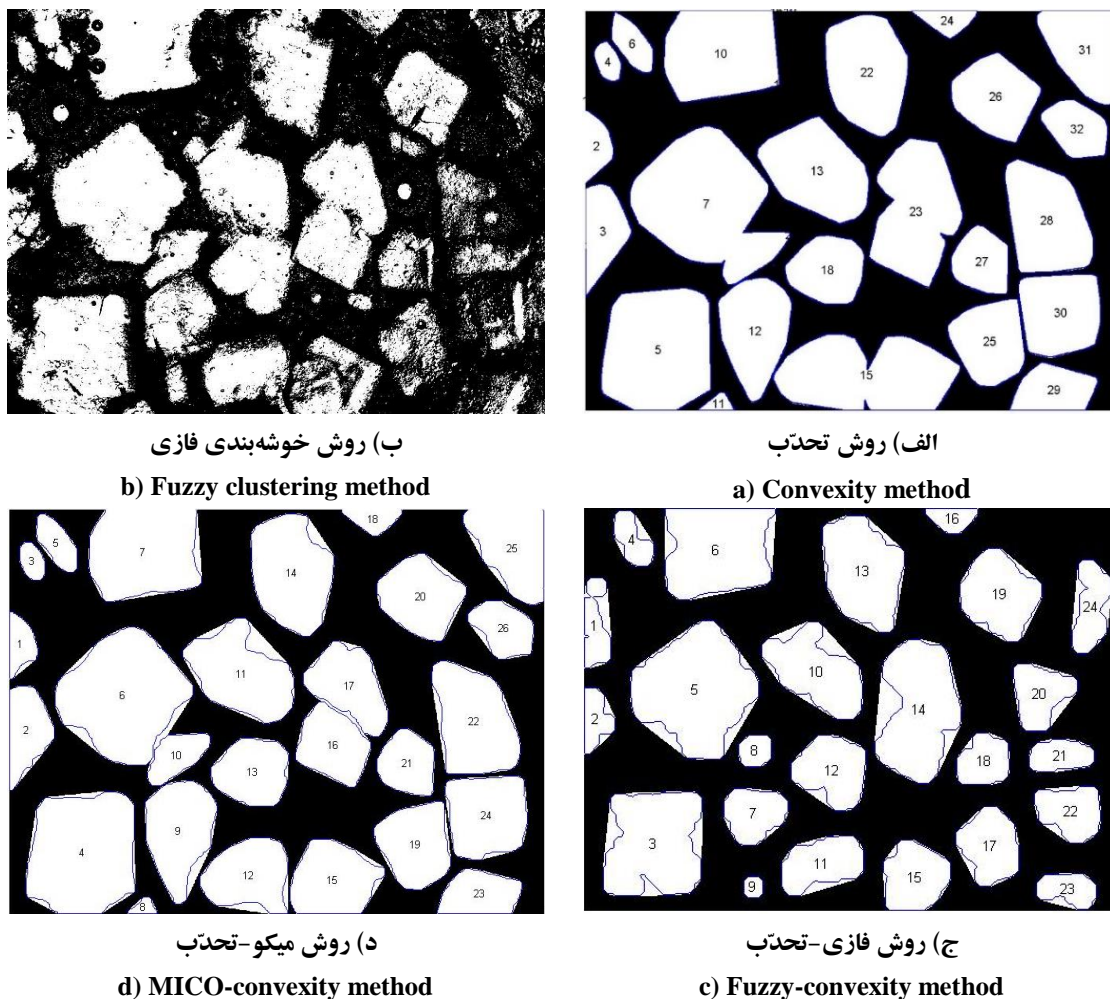
برای بهبود بخش‌بندی تصویر، روش خوشه‌بندی فازی با روش تحدب ترکیب شد. با اعمال این ترکیب، نتیجه تا حدی قابل قبول بدست آمد که در شکل ۶-ج قابل مشاهده است. این روش نیز نتوانسته است همپوشانی کریستال‌های شکر را از یکدیگر جدا کند. به علاوه، بعضی کریستال‌ها در این روش، نسبت به کریستال‌ها در شکل کوچک‌تر شده‌اند، که باعث افزایش خطا در تعیین اندازه‌ها می‌شود. از ۲۶ دانه شکر موجود در تصویر، تعداد ۲۴ دانه شکر به وسیله نشانگر خوشه‌بندی فازی و تحدب شناسایی شد که برای هر ۲۴ دانه شکر، پارامترهای هندسی استخراج شد. مطابق قسمت سوم جدول ۱، مقادیر انحراف معیار و ضریب تغییرات تمامی پارامترهای هندسی تعیین شده با روش ترکیبی فازی-تحدب بزرگ‌تر از مقادیر مرجع تعیین شده با روش بخش‌بندی دستی، اما کمتر از مقادیر روش تحدب به تنهایی است. این نکته بیانگر آن است که ترکیب روش خوشه‌بندی فازی با روش تحدب عملکرد بخش‌بندی تصاویر کریستال‌ها را بهبود بخشیده است.

بخش‌بندی تصویر منتخب با استفاده از روش تحدب و در نهایت برچسب زنی ذرات در شکل ۶-الف آمده است. مشاهده می‌شود که استفاده از روش تحدب در بخشی از نواحی تصویر توانسته عملکرد خوبی داشته باشد و در بعضی نواحی دیگر مانند کریستال‌های ۷ و ۱۵ و ۲۳ نتوانسته اتصال بین کریستال‌ها را تشخیص دهد. این ناکارآمدی روش تحدب، به علت همپوشانی کریستال‌ها در این نواحی است. این امر باعث می‌شود که الگوریتم تحدب دچار اشتباه شده و دو کریستال همپوشانی شده را یک کریستال در نظر بگیرد. کریستال‌های تشخیصی در مرحله پیش‌پردازش این روش بیشتر از تعداد واقعی بود. علت این پدیده، وجود ذرات کوچک باقیمانده بعد از پیش‌پردازش است. در مرحله پیش‌پردازش، به دلیل وجود ناهمگنی در کتراست تصویر و پائین بودن شدت در برخی نواحی کور تصویر، افزایش مقدار آستانه برای تفکیک کامل ذرات از پس‌زمینه مقدور نبود، زیرا افزایش مقدار آستانه، باعث حذف کریستال‌های شکر در تصویر می‌شد. همچنین این امر مانع افزایش اندازه عنصر ساختاری در عملیات مورفولوژیکی برای بهبود تصویر گردید. با این حال، استفاده از روش تحدب، توانست همگی کریستال‌های شکر را از تصویر خارج کند.

نتایج تعیین پارامترهای هندسی کریستال‌های شکر به روش تحدب در قسمت دوم جدول ۱ آمده است. از ۲۶ دانه شکر موجود در تصویر، تعداد ۲۴ دانه شکر به وسیله نشانگر تحدب شناسایی شدند. مقدار انحراف معیار و ضریب تغییرات تمامی پارامترهای هندسی تعیین شده با روش تحدب بزرگ‌تر از مقادیر مرجع تعیین شده با روش بخش‌بندی دستی است. این نکته بیانگر عملکرد ضعیف‌تر این روش در تعیین اندازه کریستال‌های شکر نسبت به روش دستی است.

## نتایج الگوریتم خوشه‌بندی فازی و ترکیب آن با روش تحدب

با اعمال روش خوشه‌بندی فازی چندگانه بر روی تصویر منتخب پس از مرحله پیش‌پردازش، تصویر بخش‌بندی شده‌ای از اشیاء و پس‌زمینه بدست آمد (شکل ۶-ب).



شکل (۶) بخش‌بندی تصویر کریستال‌های شکر در مسکوئیت با روش‌های مختلف

Figure (6) Segmentation of the massecuite sugar crystals image by various methods

ضریب تغییرات تمامی پارامترهای هندسی تعیین شده با روش ترکیبی میکو و تحدب بزرگتر از مقادیر مرجع تعیین شده با روش بخش‌بندی دستی، اما کمتر از مقادیر دو روش تحدب و فازی-تحدب است. این نکته بیانگر عملکرد بهتر روش ترکیبی میکو-تحدب در بخش‌بندی تصاویر کریستال‌های شکر نسبت به دو روش دیگر است.

**مقایسه نتایج تعیین پارامتر MA به روش دستی و الگوریتم‌های پردازش تصویر:**

با مقایسه تصاویر بخش‌بندی شده کریستال‌های شکر با روش‌های مختلف در شکل ۶ مشاهده می‌شود که روش‌های تحدب و فازی-تحدب نتوانستند تمامی کریستال‌ها را

### نتایج الگوریتم میکو و ترکیب آن با روش تحدب

با اعمال روش ترکیبی میکو و تحدب، عملکرد بسیار خوبی از نظر جداسازی کریستال‌های متصل به هم و رفع همپوشانی آنها بدست آمد. نتیجه اعمال این روش ترکیبی بر روی تصویر کریستال‌های شکر محلول در شکل ۶-د آمده است. ملاحظه می‌شود که تمامی کریستال‌های موجود در تصویر به خوبی از یکدیگر و از پس‌زمینه جدا شده‌اند. از ۲۶ دانه شکر موجود در تصویر، تمامی ۲۶ دانه شکر به وسیله روش ترکیبی میکو-تحدب شناسایی شدند. مطابق قسمت چهارم جدول ۱ مقادیر انحراف معیار و

با توجه به وجود ذرات با اندازه های مختلف در تصویر گرفته شده از مسکوئیت، مقدار CV بزرگ طبیعی است. در پژوهش مینگ و همکاران<sup>۱</sup> (۱۴) نیز دامنه مقادیر CV اندازه کریستال های شکر در فرآیند پخت، ۲۵ تا ۳۰ درصد بوده است (۱۴). همچنین در پژوهش کاردانو (۴) مقادیر CV برابر با ۲۹/۸۳ و ۶۱/۴۷ درصد بدست آمد.

شناسایی کنند و تنها روش ترکیبی میکو-تحدب همانند روش دستی توانست تمامی ۲۶ کریستال موجود در تصویر را شناسایی کند. همچنین مقادیر MA بدست آمده از تصویر با روش های دستی و میکو-تحدب با آزمون آماری t استیودنت<sup>۱</sup> با یکدیگر مقایسه شدند، که اختلاف آنها در سطح احتمال پنج درصد معنادار نبود. مقدار ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر MA روش دستی و روش میکو-تحدب برابر با ۰/۸۸ بدست آمد. مقدار خطای تعیین MA با روش میکو-تحدب با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شد که برابر با ۱۳/۲۴ درصد بدست آمد. به عبارتی دیگر الگوریتم ترکیبی میکو و تحدب توانسته است با دقت ۸۶/۷۶ درصد اندازه کریستال های شکر محلول در دیگ پخت را تعیین نماید. در پژوهش های مشابه، ژانگ و همکاران (۲۸) دقت ۸۳ تا ۹۹ درصد، چایاتومانگون و چونگ سستیتواتانا (۵) دقت ۸۲ تا ۹۲ درصد و هیالی و اکبری زاده (۷) با تکنیک شبکه های عصبی عمیق دقت ۹۳/۲۶ درصد را در شناسایی کریستال های شکر بدست آوردند. لذا دقت روش ترکیبی میکو-تحدب قابل قبول بوده و برای استفاده در سامانه بینایی ماشین توصیه می شود.

مطابق جدول ۲، انحراف معیار و ضریب تغییرات مقادیر MA تصاویر در روش ترکیبی میکو-تحدب نیز به روش دستی نزدیک تر است. دلیل زیاد بودن ضریب تغییرات، وجود کریستال ها با اندازه های مختلف در دیگ پخت می باشد، که باعث می شود پراکندگی آنها نسبت به میانگین افزایش یابد. با توجه به اینکه CV روش میکو-تحدب تفاوت زیادی با CV روش دستی ندارد، می توان گفت که روش ترکیبی میکو-تحدب برای تعیین اندازه کریستال های شکر در محلول پخت، قابل قبول است. با این حال راه های دیگری برای بهبود عملکرد این الگوریتم وجود دارند که نیازمند بررسی های بیشتر می باشد.

مسعودی و همکاران: تعیین اندازه کریستال‌های محلول...

جدول (۱) مقادیر پارامترهای هندسی کریستال‌های شکر در مسکوئیت با الگوریتم‌های مختلف

Table(1) The geometric parameters values of the massecuite sugar crystals by various algorithms

گرادی Curvature (%)	قطر معادل Projected area diameter (mm)	کوچک‌ترین طول Minimum length (mm)	بزرگ‌ترین طول Maximum length (mm)	محیط Perimeter (mm)	مساحت Area (mm <sup>2</sup> )	شاخص Index	الگوریتم بخش‌بندی Segmentation Method
10.48	1.741	0.377	0.536	1.541	2.6761	میانگین Average	دستی Manual
2.66	0.623	0.158	0.167	0.528	1.7155	SD	
25.44	35.78	41.80	31.07	34.27	64.10	CV (%)	
10.38	1.821	0.382	0.575	1.618	3.1152	میانگین Average	تحدب Convexity
2.94	0.822	0.187	0.258	0.773	2.2799	SD	
28.37	45.15	48.93	44.78	47.78	73.18	CV (%)	
0.67	0.309	0.268	0.403	1.163	3.0139	میانگین Average	ترکیب فازی و تحدب
0.21	0.121	0.125	0.147	0.489	2.2521	SD	Fuzzy-
31.07	39.39	46.53	36.49	42.06	74.72	CV (%)	Convexity
9.47	1.705	0.338	0.503	1.412	2.4824	میانگین Average	ترکیب میکو و تحدب
2.98	0.647	0.150	0.170	0.488	1.5935	SD	MICO-
31.49	37.98	44.48	33.76	34.56	64.19	CV (%)	Convexity

جدول (۲) مقایسه عملکرد روش‌های مختلف بخش‌بندی تصاویر کریستال‌های شکر در تعیین MA

Table (2) Comparing the performance of segmentation methods in determining MA

CV (%)	SD (mm)	MA (mm)	روش بخش‌بندی Segmentation method
37.18	0.157	0.422	دستی Manual
45.87	0.199	0.435	تحدب Convexity
41.01	0.125	0.304	ترکیبی فازی-تحدب Fuzzy-Convexity
39.23	0.150	0.382	ترکیبی میکو-تحدب MICO-Convexity

MA= Mean aperture, SD= Standard deviation, CV= Coefficient of variation

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، توسعه سامانه بینایی ماشین برای تعیین اندازه کریستال‌های محلول شکر در دیگ پخت (مسکوئیت) مد نظر بود. پس از بررسی بسیار برای یافتن الگوریتم‌های مناسب پردازش تصویر برای این منظور، روش‌های تحدب، خوشه‌بندی فازی و میکو انتخاب شدند و الگوریتم‌های مربوط به این روش‌ها توسعه داده شدند. چالش بسیار بزرگی که برای بخش‌بندی تصاویر کریستال‌های شکر وجود داشت، تماس و همپوشانی ذرات درون تصویر با یکدیگر بود. این مشکل، در تصاویر با کنتراست پایین اثر زیادی داشت. پس از اعمال الگوریتم‌های مختلف بر روی تصویر منتخب، مشخص شد که روش ترکیبی میکو-تحدب می‌تواند با دقت ۸۶/۷۶ درصد به خوبی کریستال‌های شکر را از یکدیگر جدا کند. همچنین مقدار ضریب تغییرات بدست آمده برای این الگوریتم بخش‌بندی تصویر با مقدار ۳۹/۲۳ درصد تفاوت زیادی با مقدار ضریب تغییرات روش مرجع دستی نداشت، لذا پس از ارزیابی تکمیلی الگوریتم پیشنهادی با تصاویر گوناگون و بهینه‌سازی آن، می‌توان از این الگوریتم در

سامانه بینایی ماشین در مرحله پخت استفاده نمود. نهایتاً اینکه نصب سامانه‌های بینایی ماشین برای پایش لحظه‌ای اندازه کریستال‌ها در دیگ پخت به نظارت دقیق تر و خودکار بر اندازه ذرات شکر در حین پخت کمک شایانی نموده و منجر به تولید شکر با اندازه دلخواه و یکنواختی اندازه ذرات شکر تولیدی خواهند شد.

### سپاس‌گزاری

از حمایت مالی معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز از این پژوهش در قالب پژوهانه به شماره ۹۵/۳/۰۲/۳۱۴۰۰ تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین از مدیریت و کارکنان محترم شرکت کشت و صنعت نیشکر دجبل خزاعی که در انجام این پژوهش همکاری صمیمانه‌ای نمودند، سپاسگزاریم.

## References

1. Argaw, G.A., Alport, M.J., and Malinga, S.B. 2006. Automatic measurement of crystal size distribution using image processing. *Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association*, 80: 399-411.
2. Argaw, G.A. 2007. *Sugar Crystal Size Characterization Using Digital Image Processing*. Ph.D. thesis, School of Physics, University of KwaZulu-Natal, Durban, South Africa.
3. Asadi, S.M. 2017. *Presentation of a Machine Vision Algorithm for Size Determination of White Sugar and Masecuite Crystals*. M.Sc. thesis, Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (in Persian with English abstract)
4. Cardona, M. 2016. Sugar crystals characterization for quality control inspection using digital image processing. *IEEE 36th Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXVI)*, San Jose, Costa Rica, pp. 1-6.
5. Chayatummagoon, S. and Chongstitvatana, P. 2021. Image classification of sugar crystal with deep learning. *13th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST)*, Bangsaen, Chonburi, Thailand, pp. 118-122.
6. Faria, N., Pons, M.N., De Azevedo, S.F., Rocha, F.A., and Vivier, H. 2003. Quantification of the morphology of sucrose crystals by image analysis. *Powder Technology*, 133: 54-67.
7. Hayali, Z., and Akbarizadeh, G. 2022. Transfer Learning on Semantic Segmentation for Sugar Crystal Analysis. *International Conference on Machine Vision and Image Processing (MVIP)*, Ahvaz, Iran, pp. 1-6.
8. Klute, U. 2007. Microwave measuring technology for the sugar industry. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists*, 26.
9. Kohansal Makvandy, P., Rahnama, M., Memar Dastjerdy, R., and Shafeinia, A. 2019. Evaluation of some effective parameters in design of horizontal dilute phase pneumatic sugar conveyors. *Journal of Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization, (Scientific Journal of Agriculture)*, 42(2): 21-36. (in Persian with English abstract).
10. Larsen, P.A., and Rawlings, J.B. 2009. Assessing the reliability of particle number density measurements obtained by image analysis. *Particle and Particle Systems Characterization*, 25, 420-433.
11. Liao, C.W., Yu, J.H., and Tarng, Y.S. 2010. On-line full scan inspection of particle size and shape using digital image processing. *Particuology*, 8: 286-292.
12. Li, C., Gore, J.C., and Davatzikos, C. 2013. Multiplicative intrinsic component optimization (MICO) for MRI bias field estimation and tissue segmentation. *Magnetic Resonance Imaging*, 32(7): 913-923.
13. Masoudi, H., Asadi, S.M., and Akbarizadeh, G. 2020. Development and Evaluation of an Image Processing Algorithm for Gradation of White Sugar Crystals. *Innovative Food Technologies*, 8(1): 97-110. (in Persian with English abstract).
14. Meng, Y., Yu, Sh., Zhang, J., Qin, J., Dong, Zh., Lu, G., Pang, H. 2019. Hybrid modeling based on mechanistic and data-driven approaches for cane sugar crystallization. *Journal of Food Engineering*, 257: 44-55.
15. Mhlongo, A.Z. and Alport, M.J. 2002. Application of artificial neural network techniques for measuring grain sizes during sugar crystallization. *Proceedings for Congress of the South African Sugar Technologists Association*, 76: 460-468.
16. Miller, K.F., and Beath, A.C. 2000. The measurement of raw sugar crystal size by sieving and laser diffraction. *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technology*, 22: 393-398.



17. Olofsson, B.I., and Nilsson, H.I. 1992. Particle size measurement system by laser light diffraction. In Proceedings of the Sugar Processing Research Conference, 27-29 September, New Orleans, Louisiana, USA.
18. Pan, Z.K., Zhu, M.R., and Zhang, Z.S. 2010a. Design of image acquisition system for sucrose crystallization based on ARM9. *Application of Computer System*, 19: 15-18.
19. Pan, Z.K., Zhu, M.R., and Zhang, Z.S. 2010b. The research of image acquisition and control system based on crystallization process of sucrose. *Manufacturing Automation*, 32: 29-32.
20. Patricio, M.A., and Maravall, D. 2007. A novel generalization of the gray-scale histogram and its application to the automated visual measurement and inspection of wooden Pallets. *Image and Vision Computing*, 25: 805-816.
21. Scott, D.M. 2003, Characterizing particle characterization. *Particle and Particle Systems Characterization*, 20: 305-310.
22. Theisen, K.H., and Diring, T. 2000. Microwave concentration measurement for process control in the sugar industry. *Proceedings of the Sugar Industry Technologists*, 60: 79-92.
23. Wang, D., and Fan, L.S. 2013. Particle characterization and behavior relevant to fluidized bed combustion and gasification systems. Editor(s): Fabrizio Scala. In *Woodhead Publishing Series in Energy, Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification*, Woodhead Publishing, Pages 42-76.
24. Wang, L.M., Zhu, M.R., and Fan, C.L. 2009. Application of image recognition in sugar crystal size measurement. *Computer Simulation*, 26: 294-297.
25. Wu, X., Meng, Y., Zhang, J., Wei, J., Zhai, X. 2023. Amodal segmentation of cane sugar crystal via deep neural networks. *Journal of Food Engineering*, 348(6): 111435.
26. Zhang, Z.S., Zhu, M.R., and Pan, Z.K. 2010. A method to identify sucrose-crystallization particle based on image. *Computer System and Applications*, 19: 95-99.
27. Zhang, B., Abbas, A., and Romagnoli, J.A. 2011. Multi-resolution fuzzy clustering approach for image-based particle characterization for particle systems. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 107(1): 155-164.
28. Zhang, J., Meng, Y., Wu, J., Qin, J., Wang, H., Yao, T., Yu, Sh. 2020. Monitoring sugar crystallization with deep neural networks. *Journal of Food Engineering*, 280: 109965.
29. Zheng, Y., Wang, X., and Wu, Zh. 2022. Machine Learning Modeling and Predictive Control of the Batch Crystallization Process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(16): 5578–5592.