

مقاله پژوهشی

پایش لحظه‌ای ساختار کف در سلول فلوتاسیون صنعتی مس سونگون

سروش نامداری^۱، مهدی محسنی^{۲*}، رضا پورصالحی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، S.namdari@modares.ac.ir

۲. استادیار فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، mmohseni@modares.ac.ir

۳. دانشیار نانومواد، دانشگاه تربیت مدرس تهران، poursesalehi@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۸/۶ - پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۹

چکیده

شناخت ناحیه کف به عنوان خروجی فرآیند فلوتاسیون می‌تواند در کنترل هرچه بهتر این فرآیند موثر واقع شود. از آنجایی که ساختار فیزیکی کف نشان‌دهنده شرایط کارکردی سلول فلوتاسیون است بنابراین می‌توان با توجه به ویژگی‌های آن، کیفیت عملیات جدایش را تخمین زد. با پیشرفت فناوری عملیات پایش و کنترل با استفاده از سیستم‌های برخط انجام می‌پذیرد. روش مبتنی بر آنالیز تصویر یکی از روش‌های رو به رشد در این زمینه است. استفاده از دستگاهی که بتواند به صورت برخط وضعیت و کیفیت کف را سنجیده و مرتب آن را گزارش دهد می‌تواند علاوه بر کنترل تغییرات ساختاری کنسانتره، میزان مواد شیمیایی مصرفی در سلول را در سطوح بهینه نگه دارد و در عمل ثبات در کارایی جدایش واحد فلوتاسیون را فراهم آورد. در این مقاله تغییرات ساختار کف در سلول کلینر کارخانه فرآوری مس سونگون مورد بررسی قرار گرفت. مساحت، محیط، کشیدگی و قطر فرت حباب‌ها و توزیع آن‌ها که از ویژگی‌های ساختاری کف محسوب می‌شوند برای کنترل تغییرات سلول فلوتاسیون به صورت برخط محاسبه و برای کلاس‌بندی کف استفاده شد. تصاویر کف با استفاده از الگوریتم کامینز و دو ویژگی مساحت و قطر فرت حباب در سه کلاس کف خشک، کف تر و کف سخت خوشه‌بندی شد. نتایج نشان داد در کف خشک، حباب‌های سطح کف در بازه ابعادی وسیع تری قرار دارند. این نوع کف از نظر بار، تحرک، پایداری و ساختار در حالت ایده‌آل قرار دارد، همچنین عیار این نوع کف در بازه ۲۵ تا ۲۹ قرار می‌گیرد اما کف تر و کف سخت برخلاف کف خشک به دلیل استفاده کم و یا بیش از حد برخی از افزودنی‌های شیمیایی از نظر بار، تحرک، پایداری و ساختار کف در حالت بهینه قرار ندارند؛ همچنین عیار کف تر و سخت به ترتیب در بازه ۲۲ تا ۲۷ و ۲۰ تا ۲۴ است.

کلمات کلیدی

فلوتاسیون، آنالیز تصویر، ساختار کف، استخراج و ویژگی، طبقه‌بندی.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

۱- مقدمه

فرآیند فلوتاسیون بیش از یک قرن است که برای جدایش کانی‌های با ارزش از کانی‌های باطله بر اساس اختلاف در خاصیت آب‌گریزی طبیعی یا القایی استفاده می‌شود. این فرآیند به دلیل عوامل مختلفی که در آن دخالت دارد یکی از پیچیده‌ترین فرآیندهای فرآوری مواد معدنی است [۱]. شناخت ناحیه کف به عنوان خروجی فرآیند فلوتاسیون می‌تواند در کنترل این فرآیند و عوامل تاثیرگذار بر آن موثر واقع شود. روش مبتنی بر آنالیز تصویر یکی از روش‌های رو به رشد در این زمینه است. ساختار کف یکی از مشخصات ناحیه کف است که با دستگاه آنالیز تصویری قابل اندازه‌گیری است.

استفاده از سیستم‌های آنالیز تصویر برای نظارت و کنترل فرآیند فلوتاسیون ابتدا توسط کوردک^۱ و لئکوزسکی^۲ در سال ۱۹۸۸ مورد بررسی قرار گرفت [۲]. بعد از آن پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه آنالیز تصویر انجام گرفته که این پژوهش‌ها، همواره در جهت افزایش قابلیت‌های این روش‌اند. از روش آنالیز تصویر بیشتر در تخمین عیار کف با استفاده از الگوریتم‌های مختلف استفاده شده است.

سیستم‌های آنالیز تصویر برای فلوتاسیون به طور معمول شامل دوربین، سیستم روشنایی و یک رایانه است. پس از تصویربرداری، تصاویر به وسیله نرم‌افزار با الگوریتم‌های تقسیم‌بندی طراحی شده برای تعیین و محاسبه ویژگی‌های بصری کف تحلیل می‌شوند تا با کنترل عوامل شیمیایی (غلظت کف‌ساز، غلظت کلکتور و نظایر آن) و عملیاتی (شدت جریان هوا، شدت جریان بار ورودی و ظایر آن) عملکرد فرآیند فلوتاسیون در سطح مطلوب حفظ شود [۳-۷].

در این زمینه بزویدنهوت^۳ و همکاران سطح کف سلول‌های رافر یک کارخانه فلوتاسیون روی در استرالیا را به صورت برخط با استفاده از تحلیل تصویر بافتی اندازه‌گیری کردند. ویژگی‌های بافتی کف با استفاده از روش ماتریس وابستگی سطح خاکستری مشخص شد اما همبستگی ضعیف بین تصویر و عیار روی در میان‌مدت و بلندمدت مشاهده شد [۸].

سپس وانگ^۴ و همکاران مجموعه‌ای از الگوریتم‌های تقسیم‌بندی تصویر را برای تصاویر کف فلوتاسیون، بر اساس تشخیص فرورفتگی در مقیاس خاکستری شرح دادند.

الگوریتم‌های تقسیم‌بندی و الگوریتم‌های طبقه‌بندی هم در آزمایشگاه و هم در سیستم‌های صنعتی بر روی تصاویر کف آزمایش شدند. نتایج آزمایش نشان داد که الگوریتم‌ها به طور رضایت‌بخش کار می‌کنند [۹].

همچنین ژائو^۵ و همکاران یک تقسیم‌بندی تصویر از کف فلوتاسیون بر اساس روش تنظیم سطح آستانه^۶ ارایه کردند. در مرحله اول، برای بهبود کنتراست تصویر، معادل‌سازی هیستوگرام اتخاذ شد، سپس آستانه بالا و آستانه پایین با هیستوگرام ارزش خاکستری تصویر معادل‌سازی شده و تقسیم‌بندی کامل تصویر با استفاده از روش تنظیم سطح انتخاب شد. در این پژوهش، از مدل تلفیقی لبه با مدل تنظیم سطح استفاده شده است. نتایج تجربی نشان داد که روش ارایه شده دارای نتایج تقسیم‌بندی مناسب و راندمان تقسیم‌بندی بالا است [۱۰].

در زمینه آنالیز تصویر هوش مصنوعی نیز مورد استفاده قرار گرفت. هورن^۷ و همکاران برای استخراج ویژگی تصاویر کف فلوتاسیون پلاتین، روش شبکه عصبی کانولوشنی را با سایر استخراج‌کنندگان ویژگی سنتی مقایسه کردند. آن‌ها بیان کردند که شبکه عصبی کانولوشنی عملکردی مشابه با سایر استخراج‌کنندگان ویژگی‌های بافت دارد اما نتایج جمع‌آوری شده اطلاعات کافی برای تمایز بین انواع ویژگی‌های شناسایی شده با شبکه عصبی کانولوشنی ارایه نمی‌دهد و تحقیقات بیشتری لازم است [۱۱].

همچنین لیانگ^۸ و همکاران برای تقسیم‌بندی دقیق تصاویر کف ابتدا از فیلتر همومورفیک برای بهبود روشنایی و سایه ناهمواری تصاویر استفاده کردند. سپس از خوشه‌بندی فازی c-means برای طبقه‌بندی استفاده شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی برای تقسیم‌بندی تصاویر کف مناسب است [۱۲].

در ادامه هوجیان^۹ و همکاران از یک شبکه عصبی کانولوشن عمیق برای طراحی یک سیستم شناسایی فرآیند فلوتاسیون آنتیموان استفاده کردند. نتایج نشان داد که میزان دقت تشخیص حالت کف در شبکه عصبی کانولوشن عمیق به ۹۹٫۱۷ درصد می‌رسد که بالاتر از میزان دقت طبقه‌بندی انسانی است [۱۳].

وضعیت کارکردی سلول‌های فلوتاسیون معدن سونگون اغلب بر اساس ظاهر کف تعیین می‌شود که تا حد زیادی به

⁵ Ji Zhao

⁶ Threshold Level

⁷ Horn

⁸ Liang

⁹ Hu Jian

¹ Kordek

² Lenczowski

³ Bezuidenhout

⁴ Wang

دستگاه ساخته شده مطابق شکل ۱ (الف و ب) بر روی سلول اول مرحله شستشو اولیه نصب شد. برای نورپردازی از ۱۸ ال‌ای‌دی پاور ۳ وات برند سئول کره استفاده شد. عمل تصویربرداری با دوربین سونی IMX219 در بازه زمانی ۱۰ دقیقه‌ای و هر ۳۰ ثانیه یک بار، با فاصله ۵۰ سانتی‌متری نسبت به سطح کف انجام شد؛ بنابراین تعداد ۱۰،۴۳۰ تصویر برای آموزش مدل پردازش تصویر انتخاب شد. تصاویر در با رزولوشن ۸ مگا پیکسل و نرخ فریم ۳۰ فریم بر ثانیه گرفته شد.

با توجه به گزارش‌های مهندسان فرآیند، در بازه زمانی تصویربرداری عوامل موثر بر فلوتاسیون ثابت و نوسانات عیاری ناچیز بود.

در این مقاله مساحت (پیکسل مربع)، محیط (پیکسل)، کشیدگی^۲ (بدون بعد) و قطر فرت^۳ (پیکسل) حباب‌ها و توزیع هر کدام در نرم‌افزار آناکوندا و با استفاده از برنامه‌نویسی پایتون به صورت برخط محاسبه و در بانک اطلاعات ثبت شد. مطابق شکل ۲ ابتدا تصاویر خام به صورت تصاویر صفر و یک (باینری) ناحیه‌بندی شد؛ سپس با توجه به این ناحیه‌بندی، ویژگی‌های ساختاری تصاویر استخراج شد. تصاویر ناحیه‌بندی شده از ادغام دو تصویر خام و باینری به دست می‌آید.

تجربه و توانایی یک اپراتور بستگی دارد. در نتیجه کارایی این واحد به علت گردش بالای کارکنان، عدم صحت یا عدم اطمینان به سیستم‌های کنترل دستی، تغییر در وضعیت بار وارد شده به کارخانه و نظایر آن پایدار نیست. هدف از انجام این پژوهش تعیین برخط ساختار و کلاس‌بندی کف سلول کلینر اولیه فاز دو معدن سونگون برای جدایش بهینه در فرآیند فلوتاسیون است.

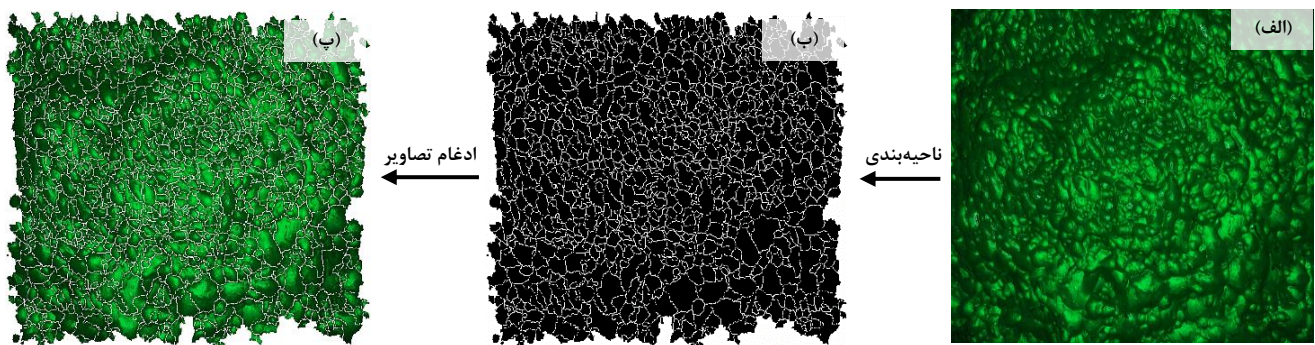
۲- مواد، روش و تجهیزات

ظرفیت تولید کارخانه تغلیظ مجتمع مس سونگون در دو فاز با ظرفیت تولید سالانه ۳۰۰ هزار تن کنسانتره مس با عیار ۳۰ درصد احداث شده است. مرحله شستشو اولیه این کارخانه از چهار سلول فلوتاسیون دراولیور^۱ که به صورت سری قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. دستگاه آنالیز تصویری بر روی اولین سلول مرحله شستشو اولیه کارخانه فاز دو نصب شد که عیار کف در این مکان از ۲۰ تا ۲۹ درصد متغیر است. عمل نمونه‌برداری در مدت ۳۶ روز انجام شد که در هر روز به طور میانگین ۱۵ نمونه با اختلاف زمانی یک ساعت نسبت به هم گرفته شد.

برای تصویربرداری از سطح کف فلوتاسیون در مقیاس صنعتی دستگاه آنالیز تصویر برخط طراحی و ساخته شد.



شکل ۱- نمایی از الف- دستگاه آنالیز تصویر و ب- مکان نصب آن در فاز دو معدن سونگون



شکل ۲- مراحل ناحیه‌بندی کف فلوتاسیون، الف- تصویر خام، ب- تصویر باینری و پ- تصویر ناحیه‌بندی شده

² Elongation

³ Feret

¹ Dorr Oliver

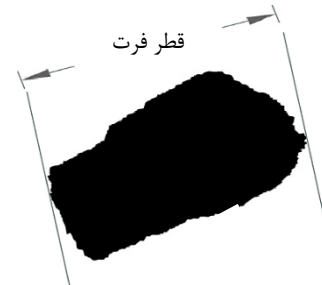
تعداد کلاس‌ها از اینرسی کلاس‌ها بهره گرفته شد. اینرسی مجموع مربعات خطا برای هر کلاس است که همبستگی درونی کلاس‌ها را نشان می‌دهد.

در این مقاله ویژگی‌های پایداری و تحرک کف به صورت چشمی و کیفی؛ همچنین بار کف از طریق محاسبه جرم جامد پالپ نمونه‌برداری شده توسط نویسندگان تهیه و ثبت شد. عیار مس کف نیز به روش جذب اتمی تعیین شد.

۳- نتایج و بحث

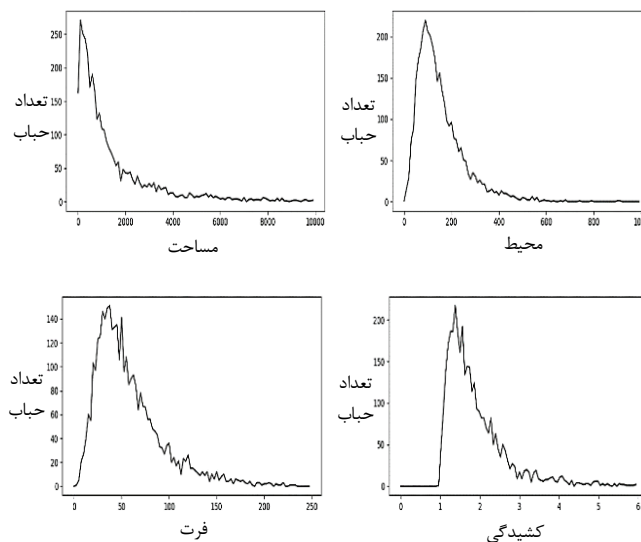
توزیع ویژگی‌های مساحت، محیط، فرت و کشیدگی حباب‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. این نمودارها برای دادن دیدی بهتر به اپراتور ارایه می‌شود.

پارامتر قطر فرت که در این مقاله استفاده شده عبارت است از فاصله قطری دورترین نقاط روی ذره از یکدیگر، این نقاط باید مطابق شکل ۳ روی نقاط محدب سطح ذره قرار داشته باشند. قطر فرت را در اصطلاح فرت ذره می‌نامند [۱۴].



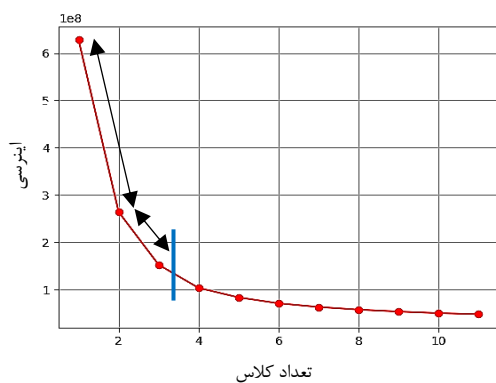
شکل ۳- قطر فرت

پس از استخراج ویژگی‌های ساختاری برای کلاس‌بندی کف از الگوریتم کامینز استفاده شد؛ همچنین برای تعیین



شکل ۴- منحنی‌های توزیع فراوانی مشخصه‌های تصویری حباب‌ها

کلاس برای خوشه‌بندی کف سه کلاس تعیین شد.



شکل ۵- نمودار تعیین تعداد خوشه مورد نیاز برای کلاس‌بندی

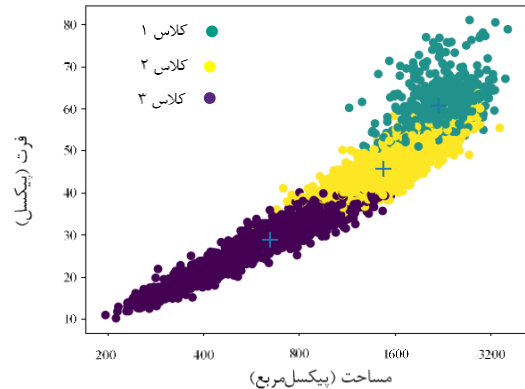
سپس کلاس‌بندی کف با استفاده از ویژگی‌های ساختاری کف انجام شد. نتایج نشان داد مساحت به تنهایی نمی‌تواند تفکیک مناسبی بین داده‌ها ایجاد کند زیرا امکان این وجود دارد که یک حباب دایره‌ای شکل کوچک و یک حباب بیضی شکل که از نظر قطر فرت بزرگ‌تر محسوب می‌شود هم مساحت باشند؛ همچنین از دو ویژگی محیط و کشیدگی حباب به دلیل ایجاد کاهش دقت در الگوریتم کامینز صرف‌نظر شد. در نهایت با استفاده از دو ویژگی مساحت و فرت حباب کلاس‌بندی کف انجام گرفت. مطابق شکل ۵ تعداد بهینه کلاس‌ها در حالتی است که شیب بین نقاط منحنی بیشتر باشد؛ بنابراین با توجه به اینرسی کلاس‌ها، بهترین تعداد

خلاف حالت کف تر باشد یعنی میزان برخی فعال کننده‌ها یا کلکتورها زیاد باشد یا میزان کف‌سازها خیلی پایین باشد. در این حالت حباب‌ها بر روی سطح به صورت ساختار به نسبت صاف درآمده و بسیار باردار خواهند شد؛ همچنین این نوع کف دارای تحرک کم و پایداری زیادی است. عیار در کف تر و سخت به ترتیب در بازه ۲۲ تا ۲۷ و ۲۰ تا ۲۴ قرار می‌گیرد.

در نهایت پس از آموزش الگوریتم برای پیش‌بینی ساختار کف، تصویربرداری و آنالیز تصاویر به صورت همزمان و برخط انجام می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله ساختار کف در سلول اول کلینر فاز دو کارخانه مس سونگون با استفاده از ساخت دستگاه آنالیز تصویر به منظور جدایش بهینه به صورت برخط محاسبه شد. برای کلاس‌بندی کف از دو ویژگی مساحت و فرت حباب استفاده شد. الگوریتم کامینز با استفاده از این ویژگی‌ها تصاویر کف را در سه کلاس که بیانگر کف خشک، کف تر و کف سخته‌اند، دسته‌بندی می‌کند. نتایج نشان داد در حالت کف خشک حباب‌های سطح کف در بازه ابعادی وسیع‌تری قرار دارند و با هم زاویه می‌سازند. این نوع کف از لحاظ بار، تحرک، پایداری و مساحت در حالت ایده‌آل قرار دارد، همچنین عیار در بازه ۲۵ تا ۲۹ است اما در حالت کف تر بازه ابعادی حباب‌ها کوچک‌تر و تا حدودی گرد است. کف سخت نیز زمانی تشکیل می‌شود که شرایط خلاف حالت کف تر باشد. در این حالت حباب‌ها بر روی سطح به صورت ساختار به نسبت صاف درآمده و بسیار باردار خواهند شد؛ همچنین این نوع کف دارای تحرک کم و پایداری زیادی است. عیار در کف تر و سخت به ترتیب در بازه ۲۲ تا ۲۷ و ۲۰ تا ۲۴ قرار می‌گیرد. برای بهبود جدایش فرآیند فلوتاسیون در مطالعات بعدی بررسی رنگ کف به منظور اندازه‌گیری برخط عیار کف پیشنهاد می‌شود.



شکل ۶- خوشه‌بندی کف در سه کلاس

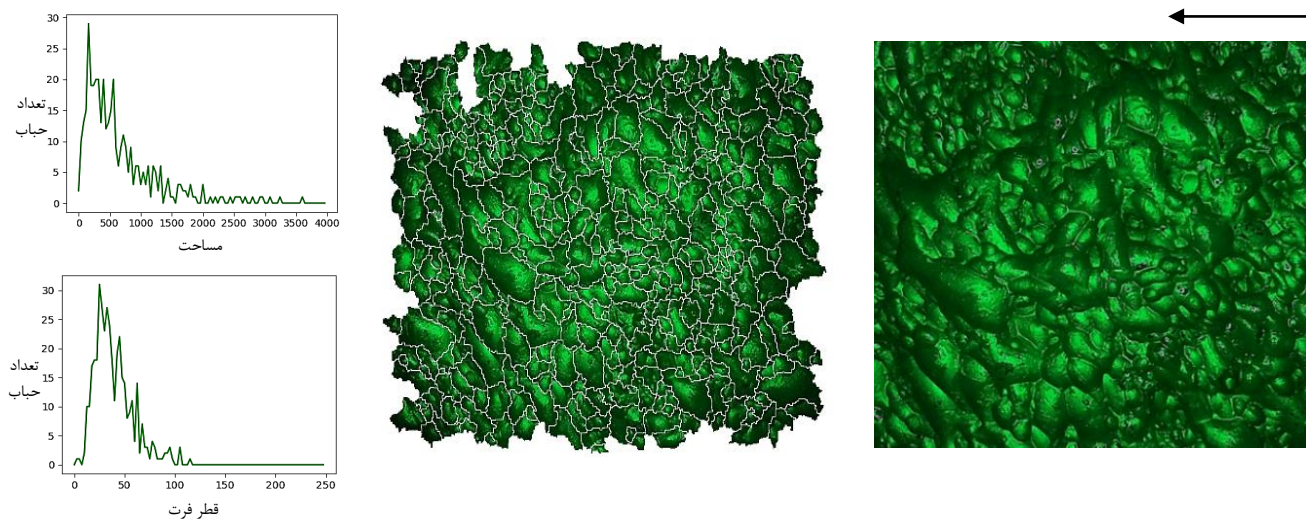
الگوریتم کامینز مطابق شکل ۶، تصاویر کف را در سه کلاس خوشه‌بندی می‌کند. ویژگی‌های مساحت و فرت در کلاس ۱ به طور کلی دارای بیشترین مقدار است. این مشخصه‌ها در کلاس‌های ۲ و ۳ به ترتیب نسبت به کلاس ۱ دارای روند کاهشی‌اند. در کلاس ۱ تغییرات فرت نسبت به مساحت نیز بیشتر از دو کلاس دیگر است؛ بنابراین کلاس‌های ۲ و ۳ دارای گردشگری بیشتری‌اند.

شکل ۷ نمونه‌ای از تصاویر سه کلاس ناحیه‌بندی شده به همراه مساحت و توزیع قطر فرت هرکدام را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود ویژگی‌های ظاهری و فیزیکی ثبت شده در کلاس ۱، ۲ و ۳ به ترتیب بیانگر ساختار کف خشک، کف تر و کف سخت است. ویژگی‌های عملیاتی سه کلاس کف شناسایی شده در جدول ۱ آمده است. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در حالت کف خشک (کلاس ۱) حباب‌های سطح کف از لحاظ مساحت و قطر فرت بازه وسیع‌تری قرار دارند. این نوع کف از نظر بار، تحرک، پایداری و مساحت ایده‌آل است، همچنین عیار در بازه ۲۵ تا ۲۹ قرار می‌گیرد. در حالت کف تر (کلاس ۲) بازه مساحت و قطر فرت حباب‌ها کوچک‌تر است. این حالت زمانی رخ می‌دهد که کلکتور و فعال کننده کم و یا میزان کف‌ساز بیش از حد بوده است. این نوع کف دارای تحرک زیاد و پایداری کم است. کف سخت (کلاس ۳) نیز زمانی تشکیل می‌شود که شرایط کاملا

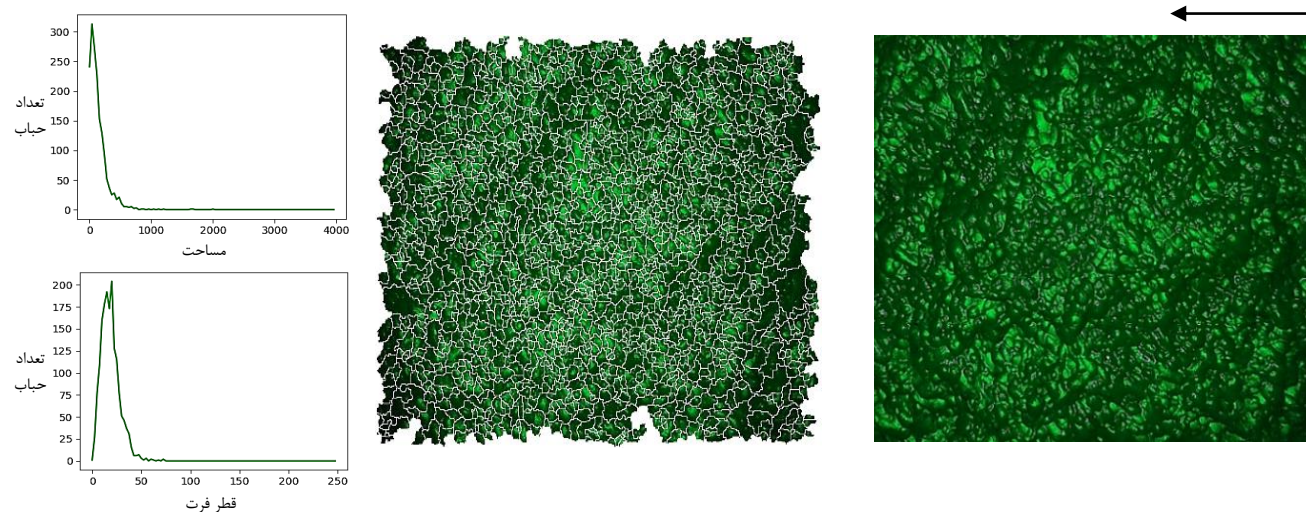
جدول ۱- ویژگی‌های سه کلاس کف شناسایی شده

نوع کف	متوسط مساحت حباب (سانتی‌متر مربع)	متوسط فرت حباب (سانتی‌متر)	تحرک کف	پایداری کف	بار کف	عیار (درصد)
کلاس ۱ (کف خشک)	۷	۳٫۴	متوسط	متوسط	متوسط	۲۹ تا ۲۵
کلاس ۲ (کف تر)	۴	۲٫۴	زیاد	کم	کم	۲۷ تا ۲۲
کلاس ۳ (کف سخت)	۱٫۹	۱٫۳	کم	زیاد	زیاد	۲۴ تا ۲۰

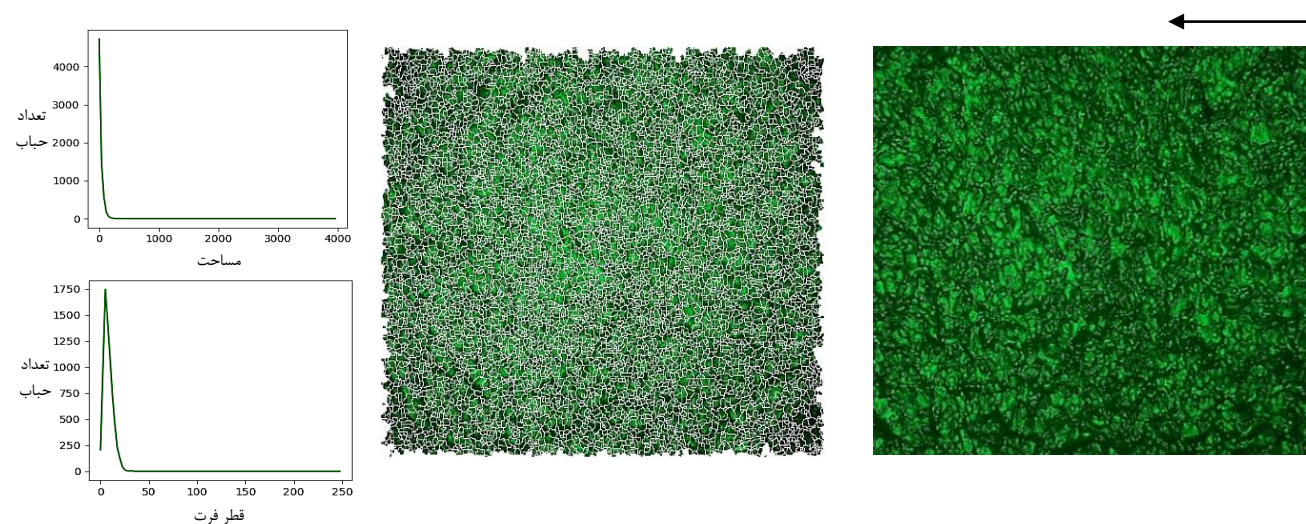
کلاس ۱ (کف خشک)



کلاس ۲ (کف تر)



کلاس ۳ (کف سخت)



شکل ۷- تصاویر اولیه و ناحیه‌بندی شده به همراه منحنی‌های توزیع قطر و مساحت حباب‌ها در کلاس‌های مختلف

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از مجموعه مس سونگون و جناب مهندس اصغر باقریان مدیر امور کارخانجات تغلیظ این مجتمع برای همکاری و فراهم کردن شرایط و امکانات برای پیشبرد پژوهش، تشکر می کنند.

منابع

7. Romachev, A., Kuznetsov, V., Ivanov, E. and Jorg, B.; 2020, "Flotation froth feature analysis using computer vision technology" .In E3S Web of Conferences, Vol. 192, p. 02022. EDP Sciences.
8. Bezuidenhout, M., Van Deventer, J.S.J. and Moolman, D.W.; 1997, "The identification of perturbations in a base metal flotation plant using computer vision of the froth surface" .Minerals engineering, 10(10), pp.1057-1073.
9. Wang, W., Bergholm, F. and Yang, B.; 2003, "Froth delineation based on image classification" .Minerals Engineering, 16(11), pp.1183-1192.
10. Zhao, J., Wang, H., Zhang, L. and Wang, C.; 2015, "The method of flotation froth image segmentation based on threshold level set" .Advances in Molecular Imaging, 5(02), p.38.
11. Horn, Z.C., Auret, L., McCoy, J.T., Aldrich, C. and Herbst, B.M.; 2017, "Performance of convolutional neural networks for feature extraction in froth flotation sensing" .IFAC-PapersOnLine, 50(2), pp.13-18.
12. Liang, X.M., Tian, T., Liu, W.T. and Niu, F.S.; 2020, "Flotation Froth Image Segmentation Based on Highlight Correction and Parameter Adaptation" .Mining, Metallurgy & Exploration, 37(2), pp.467-474.
13. Jian, H., Lihui, C. and Yongfang, X.; 2020, August, "Design of Soft Sensor for Industrial Antimony Flotation Based on Deep CNN" .In 2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), pp. 2492-2496.
14. Image J software, Documents, available from: <http://rsbweb.nih.gov/ij/>, 2021.
1. Fuerstenau, M. C., Jameson, G. J., & Yoon, R. H.; 2007, "Froth flotation: a century of innovation" , SME.
2. Kordek, J. and Lenczowski, S.; 1988, "The Evaluation of flotation froth images by the optical method" .In Proc. Of XVJ International Mineraiprocessing Congress, Stockholm, Vol. 86, pp. 481-486.
3. Kaartinen, J., Haavisto, O. and Hyotyniemi, H.; 2006, "On-line colour measurement of flotation froth" .Spectrum, 400, p.1000nm.
4. Wang, J. S., Han, S. and Shen, N. N.; 2014, "Improved GSO optimized ESN soft-sensor model of flotation process based on multisource heterogeneous information fusion" .The Scientific World Journal.
5. Massinaei, M.; 2015, "Estimation of metallurgical parameters of flotation process from froth visual features" .International Journal of Mining and Geo-Engineering, 49(1), pp.75-81.
6. Zhang, J., Tang, Z., Liu, J., Tan, Z. and Xu, P.; 2016, "Recognition of flotation working conditions through froth image statistical modeling for performance monitoring" .Minerals Engineering, 86, pp.116-129.