



عیارسنجی مس از روی کف فلوتاسیون با استفاده از آنالیز تصویر و بینایی ماشین

عبدالله سمیعی بیرق، مهدی ذاکری، زهرا بهری*

پژوهشکده فراوری مواد معدنی جهاد دانشگاهی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۱۹
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۳۰

کلمات کلیدی:

فلوتاسیون
تعیین عیار کف
ویژگی‌های رنگی و بافتی
عیار آنلاین کف

خلاصه: تعیین پارامترهای متالورژیکی فرایند فلوتاسیون (عیار و بازیابی) از طریق مشاهده سطح ظاهری کف و توسط اپراتور انجام می‌شود که با مشکلات زیادی مانند ناتوانی در نظارت مستمر و تفاوت چشم‌گیر در نتایج و مشاهدات توسط افراد همراه است. بنابراین اندازه‌گیری پیوسته عیار کف برای ایجاد یک مدار پایا ضروری است. در این تحقیق برای تعیین عیار کف فلوتاسیون کانه اکسیدیاکسیدی مس از ویژگی‌های فیزیکی و بافتی تصاویر (کف فلوتاسیون) استفاده شده است. پیش‌پردازش و پردازش در برنامه متلب و با استفاده از شبکه عصبی بر روی تصاویر انجام گرفت. برای بررسی آزمون صحت و دقت سیستم، عیار تخمینی با عیار واقعی مقایسه شدند. بررسی‌ها نشان می‌دهند که وقتی از سه ویژگی رنگی (رنگهای قرمز، سبز و آبی) تصاویر برای تعیین عیار استفاده می‌شود، این ویژگی‌ها به تنهایی برای تخمین عیار کافی نیستند و میزان خطای ایجاد شده به ۲۱/۷ درصد می‌رسد. میزان خطای ایجاد شده در هنگام استفاده از سه ویژگی رنگی و انحراف معیار آن‌ها به ۸/۷ درصد رسید که نشان می‌داد باید از پارامترهای بیشتری استفاده شود. در نهایت از ۱۱ ویژگی شامل کانال‌های رنگی و انحراف معیار آن‌ها و نیز از ویژگی‌های هارالیک (آنتروپی، کنتراست، انرژی، همبستگی و گرادیان-دانسیت) استفاده شده که نشان دهنده همسانی بسیار خوبی بین عیار واقعی با عیار پیش‌بینی شده آن‌ها است. میزان خطای محاسبه شده بسیار کاهش یافته و به ۲/۳ درصد رسیده است. روش کار سیستم تعیین عیار کف فلوتاسیون شامل عکس برداری از کف فلوتاسیون، پیش‌پردازش و پردازش تصاویر، استخراج ویژگی‌ها، آموزش سیستم، آزمون و اعتبارسنجی و ارائه آنلاین عیار است.

۱- مقدمه

فرایند فلوتاسیون یکی از پرکاربردترین روش‌های فراوری مواد معدنی در جدایش کانی‌های با ارزش از باطله بوده که از اختلاف ویژگی‌های آبرانی سطح کانی با ارزش و باطله استفاده می‌کند و از آنجا که این فرآیند یک روش جدایش فیزیکی-شیمیایی است به شدت متاثر از خصوصیات پالپ ورودی مانند عیار، توزیع ابعادی ذرات، درجه آزادی و خواص سطحی آن و متغیرهای فرآیندی مانند میزان مصرف مواد شیمیایی، pH و غیره است [۱]. عیار کف فلوتاسیون یک پارامتر متالورژیکی بوده و نشانگر برآیند فرایندهای عمل کننده در سیستم فلوتاسیون شامل نرخ هوادهی، میزان افزودنی‌ها، سطح پالپ، میزان و ابعاد خوراک ورودی و ... است. عیار کف به راحتی متغیرهای فرایند را کنترل کرده و علاوه بر داشتن یک سیستم پایا و ایجاد یک سیستم کاملاً بهینه، از نظر اقتصادی نیز مزایای فراوانی برای

کارخانه به همراه دارد [۲ و ۳].

اندازه‌گیری عیار کف با روش‌های جذب اتمی و تیتراسیون صورت می‌پذیرد که علاوه بر صرف زمان و هزینه به دلیل ناپیوسته بودن نمی‌تواند به ایجاد یک سیستم فلوتاسیون پایدار کمک کند. همچنین در بسیاری از واحدهای فلوتاسیون، متغیرهای عملیاتی از قبیل عیار کف، مواد شیمیایی، جریان هوا و سطح پالپ، اساساً از طریق مشاهدات کاربران با تجربه از ویژگی‌های سطحی کف تعیین می‌شود. مشاهدات کاربران از سطح کف، کیفی و فاقد اندازه‌گیری‌های کمی است و نمی‌تواند کل مدار را به دلیل پیوسته بودن پایش کنند [۳ و ۴].

از آنجایی که ویژگی‌های استاتیکی کف (شکل، اندازه و اطلاعات رنگ حباب و بافت کف) و نیز ویژگی‌های دینامیکی آن (سرعت حرکت کف و پایداری حباب) به عنوان پارامترهای کلیدی و مهم عملکرد فرایند فلوتاسیون

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: bahri.zahra@gmail.com



$$Energy = \sum_{i,j} p(i,j)^2 \quad (2)$$

ویژگی آنتروپی: آنتروپی یا بی‌نظمی تصویر میزان پیچیدگی یک تصویر را مشخص می‌کند. در واقع تصاویر با پیچیدگی‌های بیشتر از آنتروپی بالاتری برخوردار هستند. ویژگی آنتروپی از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۱۶].

$$Entropy = -\sum_{i,j} p(i,j) \log p(i,j) \quad (3)$$

آنتروپی مقداری بین صفر و یک دارد. بیشترین مقدار آنتروپی زمانی است که مقدار روشنایی تصویر با فرکانس آن برابر شود که در این حالت معمولاً هیستوگرام تصویر حالت هم شکل دارد و داده‌ها شبیه هم نیستند. کمترین مقدار آنتروپی نیز برابر صفر است و آن زمانی است که تمامی پیکسل‌های تصاویر دارای یک شدت روشنایی و به عبارتی داده‌ها یک دست باشند. اگر تصویر کف حاوی بافتی ناهموار باشد، مقدار آنتروپی زیاد می‌شود. در واقع آنتروپی برای تصاویر کف دارای طیف گسترده‌ای از اندازه، شکل و رنگ حباب‌ها زیاد است.

ویژگی همبستگی: همبستگی ابزاری برای تعیین نوع و درجه رابطه

یک متغیر کمی با متغیر کمی دیگر است. ضریب همبستگی شدت رابطه و همچنین نوع رابطه (مستقیم یا معکوس) را نشان می‌دهد. این ضریب بین ۱ تا -۱ است و در صورت عدم وجود رابطه بین دو متغیر برابر صفر است. همبستگی یکی از آماره‌های به دست آمده از ماتریس هم‌رخداد مقیاس خاکستر (GLCM) است. همبستگی برابر ۱ بیان‌کننده همگنی شدید تصویر است. همبستگی شاخصی است که نشان‌دهنده میزان همبستگی خطی بین دو پیکسل همسایه است که از رابطه (۴) محاسبه می‌شود که در آن μ_i ، μ_j ، σ_i و σ_j به ترتیب مقادیر میانگین و انحراف معیار سطرها و ستون‌های ماتریس است [۱۹ و ۱۶].

$$Correlation = \sum_{i,j} \frac{p(i,j)(i-\mu_i)(j-\mu_j)}{\sigma_i \sigma_j} \quad (4)$$

ویژگی وضوح تصویر (کنتراست): معیاری برای بیان میزان تنوع

و اختلاف مکانی یک تصویر که از رابطه (۵) به دست می‌آید:

هستند، محققان به این فکر افتادند که از روش‌های بینایی ماشین^۱ و آنالیز تصویری برای کنترل و نظارت فلوتاسیون در جهت بهبود فرایند جدایش استفاده کنند [۵].

در سال‌های اخیر مطالعات گسترده و تلاش‌های زیادی در توسعه الگوریتم‌ها برای اندازه‌گیری ویژگی‌های بصری کف (خصوصیات دینامیکی و استاتیکی کف) صورت پذیرفته است که منجر به تعیین پرامترهای متالورژیکی کف فلوتاسیون شده است [۱۳-۶].

ویژگی‌های قابل استخراج از تصویر کف فلوتاسیون شامل رنگ کف، توزیع اندازه حباب، سرعت کف، نرخ فروپاشی حباب، شکل حباب‌ها و پایداری کف هستند [۱۵ و ۱۲]. برای پردازش تصویر از ویژگی‌های بافتی تصویر استفاده می‌شود، این ویژگی‌ها دارای تعریف و فرمول‌های ماتریسی خاصی (ماتریس‌های هم‌رخداد^۲) هستند. این ماتریس‌ها توانایی استخراج ویژگی‌های بافتی در جهات و زوایای مختلف را دارند. اندازه این ماتریس‌ها بر اساس تعداد سطوح خاکستری در هر تصویر مشخص می‌شود. ماتریس هم‌رخداد یک ماتریس تصادفی از مرتبه $G \times G$ می‌باشد. عناصر آن برای یک بردار تغییر مکان $d = (d_x, d_y)$ مطابق با فرمول (۱) است.

$$P(i,j) = \{((r,s),(t,v)) : I(r,s) = I(t,v)\} \quad (1)$$

مهم‌ترین ویژگی‌های ماتریس هم‌رخداد شامل انرژی، آنتروپی، وضوح تصویر یا کنتراست، گشتاور دوم زاویه‌ای، ویژگی گرادیان - چگالی^۳ و همبستگی^۴ است [۱۶]. در ادامه به توصیف ویژگی‌های بافتی تصاویر پرداخته می‌شود. در کلیه فرمول‌ها P ماتریس تصادفی است و (i, j) و (\hat{i}, \hat{j}) احتمال داده‌ها با برچسب خروجی (i, j) در میان تمامی داده‌ها است و \hat{i} و \hat{j} پیکسل‌های تصاویر گرفته شده می‌باشد.

ویژگی انرژی: انرژی یک تصویر بیان‌کننده همگنی آن بوده و معیار

مناسبی برای تخمین آشفتگی تصویر است. هر چه قدر همگنی تصویر کمتر باشد انرژی تصویر نیز کاهش می‌یابد. ویژگی انرژی ماتریس هم‌رخداد شاخصی از یکنواختی تصویر کف بوده و از رابطه (۲) محاسبه می‌شود. مقدار انرژی بین [۱ و ۰] است. اگر تصویر یکنواخت باشد این شاخص به سمت یک میل می‌کند و بالعکس [۱۹ و ۱۶].

- 1 - Machine Vision-
- 2 - Gray level co-occurrence matrix (GLCM)
- 3 - Gradient Density
- 4 - Correlation

جدول ۱. توزیع مس در فازهای اکسیدی و سولفیدی (برحسب درصد)

Table 1. Distribution of copper in oxide and sulfide phases (%)

مس کل	مس سولفیدی	مس اکسیدی
۱/۳	۰/۰۷	۱/۲۳

جدول ۲. ترکیب شیمیایی کانه (برحسب درصد)

Table 2. Chemical composition of ore (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
۶۲/۲۶	۱۵/۴۴	۵/۳۳	۲/۶۸	۰/۳۹	۴/۷۳
MgO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	L.O.I
۱/۰۵	۰/۷۹۲	۰/۰۷۶	۰/۲۴۵	۰/۰۱	۵/۰۱

ثانیه) به پردازشگر کامپیوتری منتقل شده و پردازشگر بر اساس برنامه کامپیوتری از قبل طراحی و نوشته شده با نرم افزارهای مختلف مانند متلب و پایتون، پارامترهای مختلف مثل عیار و بازیابی را بر اساس ویژگی‌های بصری و بافتی استخراج شده از کف فلوتاسیون اندازه‌گیری می‌کند [۱۴ و ۳]. به طور کلی هدف از این تحقیق، تعیین عیار متالورژیکی کف فلوتاسیون کانه مس اکسیدی است که بر اساس ویژگی‌های تصویری کف مشخص می‌شود.

۲- مواد

۲-۱- تهیه نمونه معدنی مس

کانه مس مورد استفاده در این طرح از معدن مس رشیدآباد که در ۴۰ کیلومتری شمال غربی شهر زنجان واقع شده است و در شمال غربی ایران و در طول جغرافیایی ۴۸:۲۲ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷:۰۵ درجه شمالی در یک منطقه کاملاً کوهستانی قرار دارد تهیه گردید.

۲-۲- مشخصات شیمیایی و کانی‌شناسی نمونه

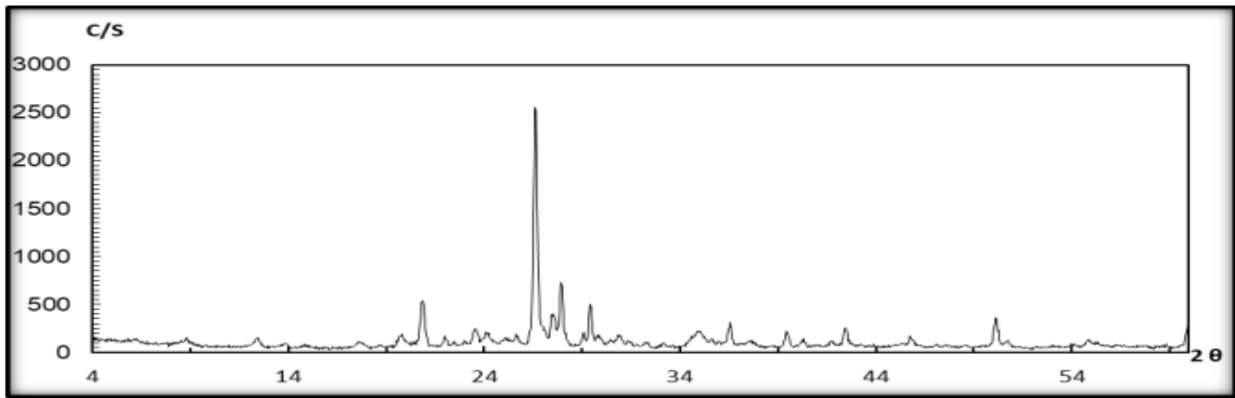
این کانه بر اساس آنالیز جذب اتمی، دارای ۱/۳ درصد مس است. از این مقدار، ۱/۲۳ درصد آن مس اکسیدی شناسایی شده است (جدول ۱). دیگر ترکیبات شیمیایی کانه نیز که به روش شیمی تر مشخص و اندازه‌گیری شده، در جدول ۲ نشان داده شده است.

$$Contrast = \sum_i \sum_j (i-j)^2 p_d(i,j) \quad (5)$$

ویژگی تغییرات چگالی: ویژگی گرادیان - چگالی یکی از

ویژگی‌های مهم در آنالیز تصاویر به وسیله ماشین بینایی است که لبه‌های یک تصویر را مشخص می‌کند. لبه‌یابی در واقع مجموعه عملیات ریاضی است که به کمک آن‌ها می‌توان نقاطی از تصویر که در آن‌ها روشنایی به طور شدید تغییر می‌کند و معمولاً نشانه رویدادی مهم یا تغییر در محیط است، را شناسایی کرد. همچنین می‌توان از لبه‌یابی در تشخیص اشیا و جداسازی عکس و تبدیل آن به چند عکس و بینایی ماشین استفاده کرد. لبه‌ها معمولاً به صورت خطوطی که دارای انحنا هستند مشخص می‌شوند. لبه‌یابی در تصاویر کف فرایند فلوتاسیون مواد معدنی از اهمیت بیشتری برخوردار است. از آنجا که تصاویر کف بیشتر با حباب سر و کار دارند. در حقیقت کناره‌های حباب‌ها همان لبه‌های تصاویر هستند که تعیین کننده ابعاد و شکل آن‌ها (حباب‌ها) هستند [۱۹ و ۱۶].

سامانه برخط تصویری یا سیستم پردازش تصویر شامل دوربین، سیستم روشنایی با نور مشخص و یک کامپیوتر است. در این سیستم، تصاویر گرفته شده به وسیله دوربین از روی کف فرایند فلوتاسیون (در مقیاس‌های آزمایشگاهی، پابوت و صنعتی) با سرعت‌های مختلف (مثلاً ۲۵ فریم بر



Sample:	Major Phase(s)	Major Phase(s)	Minor Phase(s)
F1	Quartz (33-1161)	Chlorite (29-0701)	Calcite (05-0586)
Az : 21768-11107	SiO ₂	(Mg,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	CaCO ₃
Date : 17/10/2019	Albite (09-0466)		Hematite (33-0664)
kV = 40	NaAlSi ₃ O ₈		Fe ₂ O ₃
mA = 30	Orthoclase (31-0966)		Malachite (41-1390)
Ka. = Cu	KAlSi ₃ O ₈		Cu ₂ (CO ₃)(OH) ₂
Fil. = Ni	Muscovite - illite (26-0911)		
	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂		

شکل ۱. نتایج آنالیز XRD

Fig. 1. XRD analysis results

۳-۲- آزمایش‌های فلواتسیون

آزمایش‌های فلواتسیون در یک سلول مکانیکی دنور با شرایط ذکر شده در جدول ۴ انجام گرفت. درصد مس در تمامی آزمایش‌ها با آنالیز جذب اتمی تعیین شد. زمان کف‌گیری ۱۳ دقیقه است. شرایط اولیه آزمایش‌های فلواتسیون در جدول ۴ ارائه شده است.

۳-۳- چیدمان تجهیزات

شکل ۳ چیدمان تجهیزات برای اندازه‌گیری عیار کف کنسانتره در مقیاس آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. برای سیستم تصویر برداری تجهیزات مورد نیاز شامل دوربین اتوماتیون رنگی سونی مدل آلفا ۲۰۰، سلول فلواتسیون مکانیکی آزمایشگاهی برای انجام آزمایش‌ها، سیستم‌های نورپردازی (لامپ هالوژنی ۵۰ وات برای تأمین روشنایی) و همچنین کابل‌های فایر وایر برای اطلاعات تصویر هستند. دوربین عکاسی به طور عمود و در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از لبه بالایی سلول و سطح کف قرار گرفت به طوری که دقیقاً مرکز لنز دوربین با سطح کف سلول مطابقت داشت. به منظور جلوگیری از تار شدن تصاویر در آزمایش‌ها عملیات زوم به صورت دستی کنترل شد. در

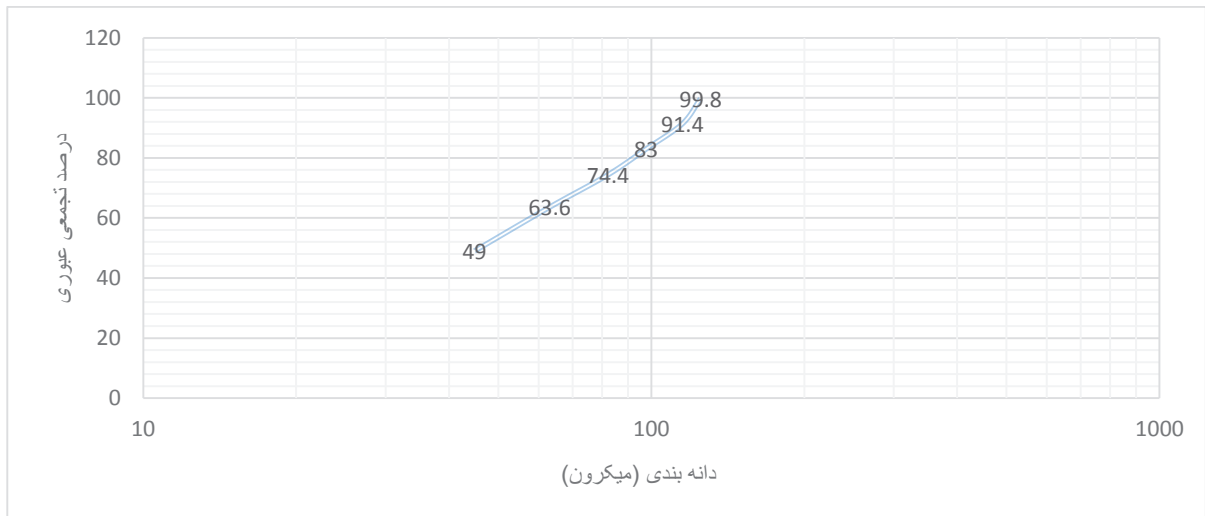
همچنین شناسایی ترکیب کانه به روش XRD، در شکل ۱ نشان می‌دهد که بیشترین مس موجود در کانه به صورت مالاکیت ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) حضور دارد. دیگر کانی‌های تشکیل دهنده شامل کوارتز (SiO_2)، آلبیت ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)، ارتوکلاز (KAlSi_3O_8)، موسکویت-ایلیت ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$)، کلریت ($(\text{Mg,Fe})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$)، کلسیت (CaCO_3) و هماتیت (Fe_2O_3) هستند.

۳- روش‌های انجام آزمایش

۳-۱- خردایش و نرمایش کانه

کانسنگ تهیه شده بعد از خردایش و نرمایش به وسیله سنگ‌شکن فکی، غلتکی و آسیای میله‌ای، آنالیز ابعادی شد (جدول ۳ و شکل ۲). بر اساس جدول ۳ و شکل ۲، اندازه ۸۰ درصد ذرات کمتر از ۹۰ میکرون (میکرون ۹۰ = d_{80}) است. پودر تهیه شده به عنوان خوراک در آزمایش‌های فلواتسیون استفاده شد.

وزن نمونه معرف: ۵۰ گرم



شکل ۲. نمودار آنالیز دانه‌بندی خوراک فلوتاسیون

Fig. 2. Graph of particle size distribution of flotation feed

جدول ۳. آنالیز دانه‌بندی خوراک فلوتاسیون

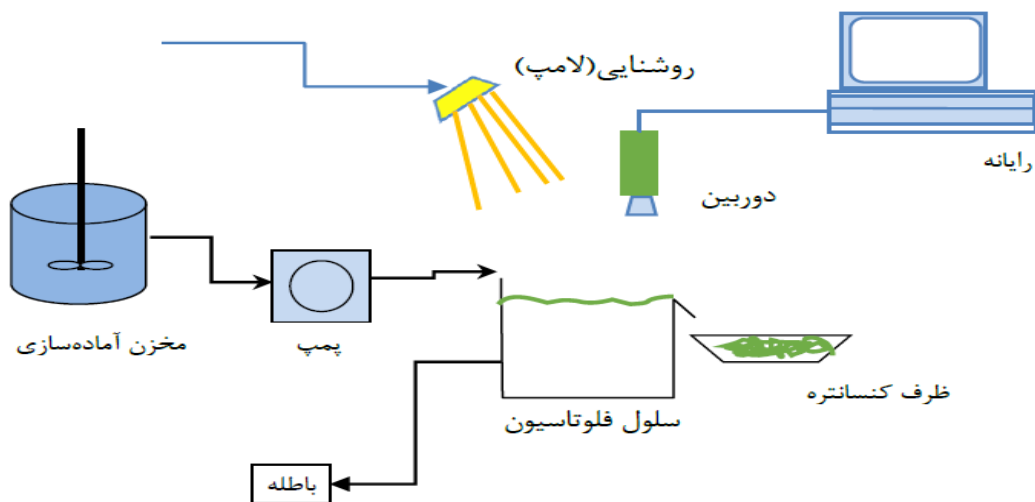
Table 3. Sieve analyses of flotation feed

درصد تجمعی عبوری	درصد تجمعی باقی مانده روی سرنده	درصد باقی مانده روی سرنده	وزن باقی مانده روی سرنده (گرم)	محدوده دانه‌بندی (میکرون)
۹۹/۸	۰/۲	۰/۲	۰/۱	+۱۲۵
۹۱/۴	۸/۶	۸/۴	۴/۲	+۱۲۵-۱۰۶
۸۳	۱۷	۸/۴	۴/۲	+۱۰۶-۹۰
۷۴/۴	۲۵/۶	۸/۶	۴/۳	+۹۰-۷۵
۶۳/۶	۳۶/۴	۱۰/۸	۵/۴	+۷۵-۵۳
۴۹	۵۱	۱۴/۶	۷/۳	+۵۳-۳۸
۰	۱۰۰	۴۹	۲۴/۵	۳۸-

جدول ۴. شرایط اولیه آزمایش فلوتاسیون [۱۹ و ۱]

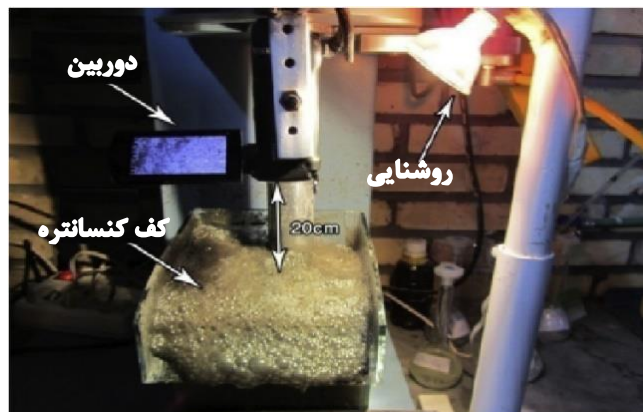
Table 4. Flotation test conditions

وزن خوراک (گرم)	حجم سلول (لیتر)	pH	دور همزنی (دور بر دقیقه)	درصد جامد
۳۰۰	۲	۱۰/۲	۱۰۰۰	۳۰
زمان آماده‌سازی برای رمق‌گیر (دقیقه)	زمان آماده‌سازی برای رافر (دقیقه)	میزان مصرف برای رمق‌گیر (g/t)	میزان مصرف برای رافر (g/t)	مواد شیمیایی
-	۴	-	۵۰۰	سیلیکات سدیم
-	۷	-	۱۰۰۰	سولفید سدیم
۲	۴	۴۵	۹۰	کلکتور (PAX)
۲	۴	MF11 SDS (3ml R, 1.5 ml Sc)	نانو ذره اکسید روی	
		MF11 SDS (1.5 ml R, 0.75 ml Sc)	نانو ذره اکسید روی	
		SDS 5% (1.7 ml R, 0.85 ml Sc)	سدیم دو دسیل سولفات	
۱	۱	۵۵	۱۱۰	کف‌ساز (MIBC)
-	-	مقدار مورد نیاز	مقدار مورد نیاز	تنظیم کننده pH (کلسیم هیدروکسید)



شکل ۳. چیدمان تجهیزات برای اندازه‌گیری عیار کف در مقیاس آزمایشگاهی

Fig. 3. Layout of equipment for measuring of flotation froth grade on a laboratory scale



شکل ۴. نصب سیستم تصویربرداری و منبع نور استفاده شده برای تأمین روشنایی

Fig. 4. Installation of imaging system and light source to provide lighting

تصاویر گرفته شده بعد از ضبط و ذخیره در حافظه جانبی دوربین به کامپیوتر منتقل گردید تا برای آنالیز تصاویر آماده شده و الگوریتم‌های پردازشی مورد نظر بر روی آن اعمال شود. پیش پردازش و پردازش‌های لازم در برنامه متلب بر روی تصاویر گرفته شده از آزمایش‌های فلوتاسیون کانی اکسیده مس رشیدآباد زنجان انجام گرفت.

الگوریتم پردازش تصاویر توسط سیستم کامپیوتری با برنامه متلب و با استفاده از شبکه‌های عصبی انجام می‌گیرد. شبکه عصبی به کار رفته در این تحقیق از نوع چند لایه MLP با ۵ لایه مخفی است. تعداد نرون‌های ورودی همان تعداد ویژگی‌های به کار رفته در هر روش است. تعداد نرون‌های مخفی به صورت تجربی ۵ عدد در نظر گرفته شده است، توجه شود که روش مشخصی جهت تعیین تعداد لایه‌های مخفی وجود ندارد و بیشتر یک کار تجربی است. تعداد نرون‌های لایه خروجی ۱ است. لایه خروجی در حقیقت همان درصد عیار تخمین زده شده کف فلوتاسیون کانه اکسیدی مس است که به صورت عددی عیار را نشان می‌دهد و معادل درصد عیار کف است [۱۹].

جهت پیاده‌سازی و اجرای الگوریتم پردازش تصویر بر روی تصاویر کف فلوتاسیون کانه اکسیدی مس، ابتدا تصاویر از محل ذخیره آن‌ها به محیط کار فراخوانده می‌شوند. سپس با حذف شافت همزن، دیواره و لبه سرریز سلول در صورت وجود از تصویر اصلی، یک ناحیه مورد نظر انتخاب می‌شود. این ناحیه یک سطح مستطیل شکلی است که قسمتی از تصویر را شامل می‌شود و الگوریتم آنالیز روی آن اعمال می‌شود. تصاویر اصلی رنگی و با

تعیین عیار کف با استفاده از آنالیز تصویری منبع نوری باید طوری انتخاب شود که تفاوت رنگ تصاویر کف در شرایط مختلف آزمایش‌ها به وضوح قابل مشاهده باشد. بدین منظور از یک لامپ هالوژن ۵۰ واتی نیز برای تأمین روشنایی تصویر که در بالای سلول فلوتاسیون و بر روی پایه‌ای سوار است استفاده گردید.

۳-۴- تصویربرداری از کف فلوتاسیون و آماده‌سازی و پردازش آن‌ها

در خلال انجام آزمایش‌های فلوتاسیون کانه‌های اکسیدی مس و تأثیر نانو ذره‌های مختلف در فرایند (فلوتاسیون)، علاوه بر جمع‌آوری اطلاعات عملیاتی و متالورژیکی، تصاویر کف نیز برای اندازه‌گیری ویژگی‌های ظاهری کف جهت تعیین عیار آن با دوربین گرفته و جمع‌آوری شد. در شکل ۴ نمایی از دوربین نصب شده و سیستم روشنایی بر بالای سلول فلوتاسیون آزمایشگاهی نشان داده شده است.

با توجه به شرایط آزمایش از آنجا که مدت زمان کف‌گیری حدود ۱۳ دقیقه بود در هر دقیقه با گرفتن یک عکس کف نیز جمع‌آوری و تعیین عیار شد. با توجه به تغییر ویژگی‌های ظاهری و متالورژیکی و نیز عملیاتی کف در طول دوره کف‌گیری تصمیم گرفته شد برای هر آزمایش رافر و اسکاونجر (مجموعاً دوتا آزمایش رافر و دو تا آزمایش اسکاونجر) عکس‌ها در دوره زمانی ۱ دقیقه گرفته شود که در مجموع برای ۴ آزمایش حدوداً ۱۰۰ تا عکس گرفته شد.



شکل ۵. ناحیه مورد نظر از یک نمونه تصویر

Fig. 5. The desired area of a sample of the froth image

آموزشی استخراج و سپس این داده‌ها به همراه عیار نمونه‌ها که قبلاً از طریق روش‌های آنالیز شیمیایی و غیره به دست آمده به سیستم وارد می‌شود [۱۹]. از میان نتایج به دست آمده از روش آنالیز تصویر کف و آنالیز عیار کنسانتره کانه اکسیدی مس، تقریباً ۱۰۰ نمونه عکس و آنالیز عیار آن‌ها برای آموزش شبکه انتخاب شدند. بقیه برای مرحله تعیین اعتبار و آزمون شبکه مورد استفاده قرار گرفتند. برای آموزش سیستم، تصاویر ۱۰۰ نمونه با عیار مشخص شده به آن وارد شد و پس از استخراج ویژگی‌های تصویر برای آموزش سیستم مورد استفاده قرار گرفت.

۴-۳- استفاده از ویژگی‌های رنگی در آموزش و صحت سیستم هوشمند

در این روش میانگین سه رنگ آبی، سبز و قرمز در هر پیکسل و در نهایت در کل تصویر برای ۶۴ نمونه محاسبه شده است. پس از آن که آموزش به سیستم با استفاده از ۶۴ نمونه در روش اول ذکر شده در بالا داده شد. برای اعتبارسنجی و آزمون سیستم و نیز مقایسه عیار واقعی با عیار پیش‌بینی شده باید تعدادی از اطلاعات تصاویر کف فلوتاسیون به سیستم داده شود که این فرایند انجام گرفت و در جدول ۶ میزان عیار پیش‌بینی شده و واقعی و نیز مقدار اختلاف آن‌ها که خروجی برنامه متلب و شبکه عصبی است (به عنوان نمونه برای ۱۰ تصویر) نشان داده شده است. نمودار شکل ۶

اندازه ۶۴۰×۴۸۰ پیکسل ضبط شده‌اند و عموماً آنالیز انتخاب و آماده‌سازی می‌شوند. یک ناحیه مورد نظر از یک نمونه تصویر در شکل ۵ نشان داده شده است.

۴-۲- بحث و نتایج

۴-۱- استخراج ویژگی‌ها

برای تعیین رفتار ظاهری سطح کف از اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی مانند رنگ و ابعاد حباب و ویژگی‌های بافتی مانند آنروپی، کنتراست، انرژی، همبستگی و گرادیان-دانسیتته تصاویر کف فلوتاسیون استفاده شده است [۱۱]. جدول ۵ برای تعداد ۱۰ تصویر (به عنوان نمونه)، ویژگی‌های استخراج شده از کف فلوتاسیون را نشان می‌دهد.

۴-۲- آزمون سیستم

مهم‌ترین ابزار برای آزمون صحت و دقت سیستم، مقایسه عیار مرتبط با عکس‌های داده شده در خروجی سیستم با عیار به دست آمده از آنالیز کنسانتره با روش‌های شیمیایی است. بنابراین باید تعداد قابل توجهی عکس به عنوان نمونه معرف و با عیار مشخص به سیستم داده شود و مشخصات آن‌ها ثبت شود. بدین منظور نخست ویژگی‌های بافتی و رنگ عکس‌های

جدول ۵. ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر آموزشی

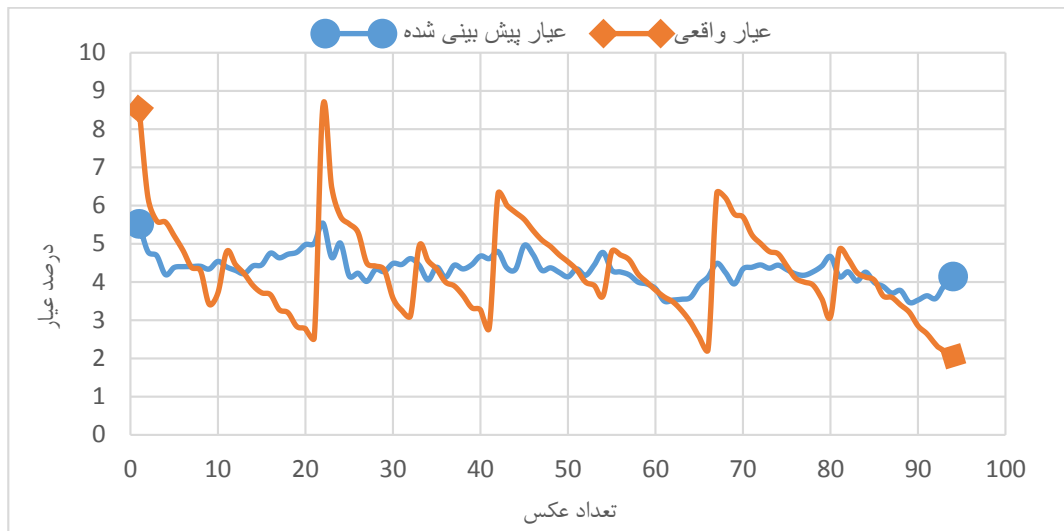
Table 5. Characteristics extracted from educational images

شماره عکس	کانال قرمز	کانال سبز	کانال آبی	آنتروپی	کنتراست	انرژی	همبستگی	گرادینان دانسیته	عیار ورودی (%)
4707	56.804	57.75	45.004	0.47085	0.34392	1.9978	3.4646	0.10248	8.52
4708	95.42	95.972	84.551	0.42276	0.33033	1.3946	3.655	0.16587	6.21
4709	102.85	101.86	88.218	0.57558	0.4847	1.1177	3.6707	0.13463	5.6
4710	128.96	127.72	115.28	0.83368	0.73608	0.80513	3.673	0.067433	5.57
4711	116.05	113.87	99.156	0.87376	0.75507	0.72155	3.7819	0.077358	5.21
4712	115.52	113.8	100.84	0.95727	0.82916	0.66973	3.7401	0.064553	4.83
4713	117.42	114.04	97.639	0.91991	0.72431	0.62773	3.8113	0.052862	4.38
4714	117.3	113.85	98.222	0.99996	1.0621	0.50179	3.761	0.06122	4.3
4715	123.06	118.81	104.78	0.99007	0.98235	0.53203	3.765	0.061201	3.42
4716	110.3	106.37	91.275	0.99999	1.0454	0.47484	3.7751	0.058701	3.72

جدول ۶. استخراج ویژگی میانگین سه رنگ اصلی (محاسبه شده) و نتایج پیش‌بینی عیار با استفاده از نرم افزار

Table 6. Characteristics of main colors (calculated), predicted and actual grade of flotation froth

عیار خروجی (%)	عیار واقعی (%)	رنگ آبی	رنگ سبز	رنگ قرمز
3.5467	3.25	156.86	166.33	166.64
3.5943	2.95	155.51	163.71	162.44
3.9289	2.56	139.34	143.82	140.32
4.1297	2.24	126.8	132.61	129.6
4.4853	6.33	93.841	111.93	120.74
4.242	6.2	108.17	125.38	133.49
3.947	5.78	133.69	143.33	142.18
4.3408	5.7	101.62	120.38	128.35
4.3811	5.24	100.53	118.05	125.38
4.4437	5.01	97.882	114.57	121.37



شکل ۶. نمودار مقایسه بین درصد عیار واقعی و پیش‌بینی شده در روش اول

Fig. 6. Diagram of comparison between actual and predicted grade in the first method

۴-۴- استفاده از ویژگی رنگی و انحراف معیار آن‌ها در آموزش و اعتبارسنجی

سیستم هوشمند

این ویژگی‌ها شامل میانگین سطح خاکستری هر ۳ کانال قرمز، سبز و آبی و نیز انحراف معیار آن‌ها است و بردار ویژگی با ۶ پارامتر تعیین شده است. در این روش میانگین سه رنگ آبی، سبز، قرمز و انحراف معیار آن‌ها در هر پیکسل و در نهایت در کل تصویر محاسبه شده است. پس از آموزش سیستم با ۶۴ نمونه در روش فوق، برای اعتبارسنجی و آزمون سیستم و مقایسه عیار واقعی با عیار پیش‌بینی شده حدود ۳۰ نمونه از اطلاعات رنگی و انحراف معیار تصاویر کف فلوتاسیون به سیستم داده شد که در جدول ۷ میزان عیار پیش‌بینی شده و واقعی و نیز مقدار اختلاف آن‌ها (به عنوان نمونه برای ۱۰ تصویر) نشان داده شده است. نمودار شکل ۷ مقایسه بین عیار واقعی و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۷ و نمودار شکل ۷ نشان می‌دهد که همسانی تقریباً مناسبی بین عیار واقعی با عیار پیش‌بینی شده وجود دارد. انطباق منحنی‌های دو عیار واقعی و خروجی از سیستم در خیلی جاها در نمودار شکل ۷ به وضوح مشخص است که نشان می‌دهد وقتی که از ۶ ویژگی تصاویر برای تعیین عیار کف استفاده می‌شود میزان انطباق منحنی‌ها بیشتر و به تبع آن عیار واقعی به عیار خروجی از سیستم نزدیک می‌شوند. محاسبه خطا نشان می‌دهد

مقایسه بین عیار واقعی و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۶ و نمودار شکل ۶ نشان می‌دهد که همسانی مناسبی بین عیار واقعی کف‌های فلوتاسیون با عیار پیش‌بینی شده آن‌ها وجود ندارد. عدم انطباق منحنی‌های دو تا عیار واقعی و پیش‌بینی شده توسط برنامه در خیلی از نقاط در نمودار شکل ۶ به وضوح مشخص است که نشان می‌دهد وقتی که از سه ویژگی تصاویر برای تعیین عیار کف استفاده می‌شود این سه ویژگی به تنهایی برای تخمین عیار کافی نیستند و باید از تعداد ویژگی بیشتری برای ارزیابی این سیستم جهت تعیین عیار استفاده شود. برای محاسبه خطای ایجاد شده از فرمول ۶ استفاده می‌شود:

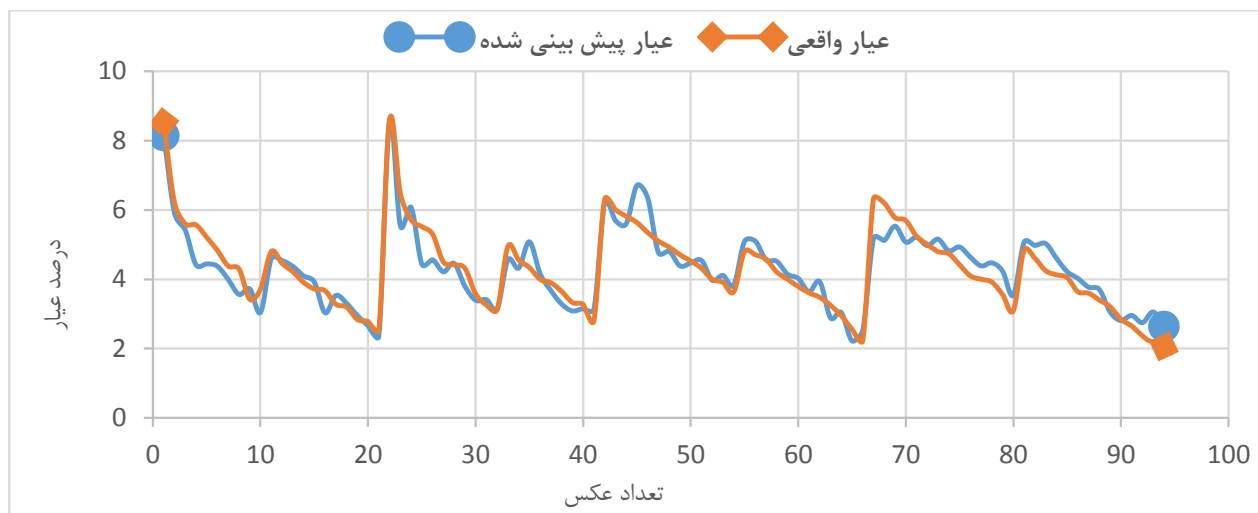
$$Error = \frac{|g_r - g_p|}{g_r} \times 100 \quad (6)$$

که در آن g_r عیار واقعی و g_p عیار پیش‌بینی شده بر اساس اجرای الگوریتم و برنامه هوشمند است. میانگین خطا با استفاده از این فرمول عدد ۲۱/۷ درصد آمده است که میزان بالایی است و تاکید کننده آن است که باید از ویژگی‌های دیگر تصویر مانند انرژی، کنتراست، آنتروپی و غیره در تعیین عیار کف استفاده شود.

جدول ۷. استخراج ویژگی میانگین سه رنگ اصلی، انحراف معیار و نتایج پیش‌بینی عیار با استفاده از نرم‌افزار

Table 7. Characteristics of main colors (calculated), standard deviation of colors, predicted and actual grade of flotation froth

انحراف معیار رنگ قرمز	انحراف معیار رنگ سبز	انحراف معیار رنگ آبی	رنگ قرمز	رنگ سبز	رنگ آبی	عیار واقعی (%)	عیار پیش بینی شده (%)
8.0019	8.6957	9.3126	56.53	57.692	45.065	8.52	8.1548
8.6428	9.1236	9.6887	95.29	95.821	84.43	6.21	5.9105
10.898	12.575	14.158	103.61	102.53	88.805	5.6	5.4233
13.866	15.769	17.346	130.9	129.79	117.28	5.57	4.4159
16.569	18.842	20.865	115.91	113.41	98.171	5.21	4.4467
16.749	18.801	20.555	116.12	114.2	100.83	4.83	4.3743
19.641	21.507	22.757	118.11	114.45	97.456	4.38	3.9928
22.323	23.783	24.028	117.89	114.21	98.127	4.3	3.5625
21.812	22.821	22.622	124.71	120.28	105.93	3.42	3.7218
24.478	24.644	23.45	110.71	106.73	91.494	3.72	3.0472



شکل ۷. نمودار مقایسه بین درصد عیار واقعی و پیش‌بینی شده در روش دوم

Fig. 7. Diagram of comparison between actual and predicted grade in the second method

جدول ۸. استخراج ویژگی‌های رنگی و بافتی و عیار خروجی با ۱۱ ویژگی رنگی و بافتی و نتایج پیش‌بینی عیار با استفاده از نرم‌افزار

Table 8. Color and texture characteristics (11 characteristics), predicted and real flotation froth grade

انحراف معیار قرمز	انحراف معیار سبز	انحراف معیار آبی	رنگ قرمز	رنگ سبز	رنگ آبی	آنتروپی	کنتراست	انرژی	گرادیان - دانسیته	عیار واقعی (%)	عیار پیش‌بینی شده (%)
7.8346	8.5929	9.1376	56.763	57.957	45.161	0.34109	0.35674	1.9973	0.10624	8.52	7.92
8.0446	8.7644	9.5501	97.373	97.989	86.661	0.33729	0.34248	1.4979	0.16829	6.21	5.94
10.673	12.682	14.587	105.48	104.5	90.786	0.46776	0.50288	1.1878	0.12978	5.6	5.76
24.654	25.012	23.867	111.72	107.4	91.779	0.99967	1.0803	0.46033	0.060444	3.72	3.426
9.6518	11.259	12.86	127.99	117.38	98.113	0.42276	0.45181	1.3153	0.078391	4.8	4.76
16.318	18.763	21.785	132.38	127.76	112.92	0.70845	0.5287	0.80781	0.058245	4.46	4.58
17.626	18.191	17.415	85.284	82.969	69.726	0.93459	0.8005	0.6786	0.043503	2.78	2.83
18.252	18.518	17.504	83.581	81.396	68.464	0.83512	0.77632	0.65988	0.065971	2.54	2.55
5.8307	6.9041	7.3226	51.924	57.413	47.313	0.28971	0.24847	2.3619	0.15867	8.6	8.7896
14.479	16.975	19.597	134.83	135.28	125.29	0.5651	0.64032	0.84149	0.14697	5.52	5.30

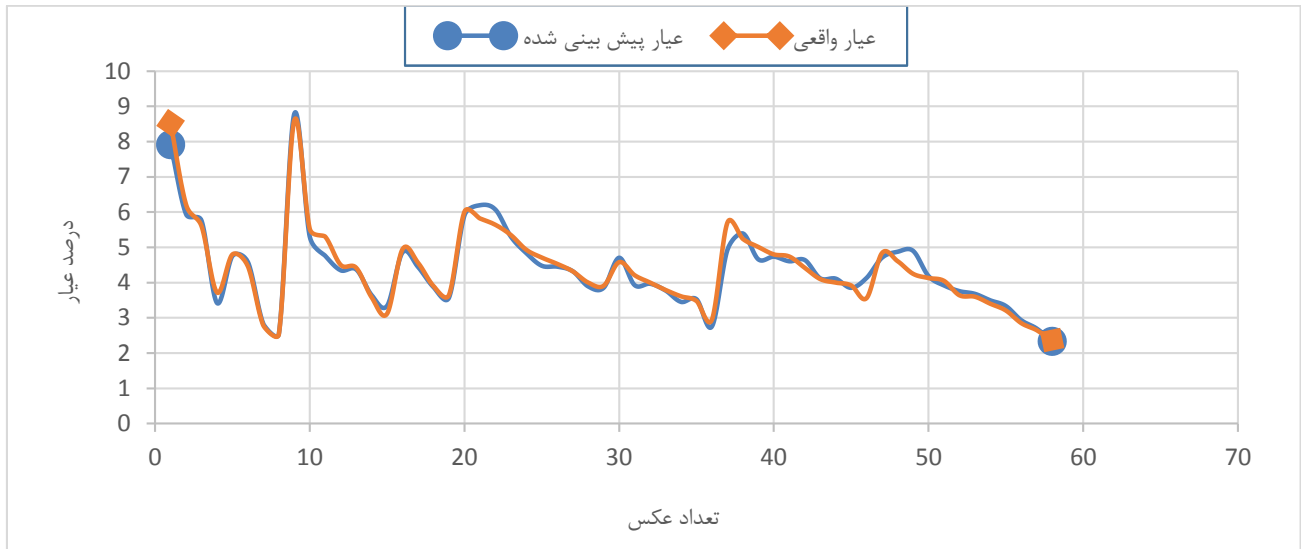
میزان عیار پیش‌بینی شده و واقعی و نیز مقدار اختلاف آن‌ها نشان داده شده است. نمودار شکل ۸ مقایسه بین عیار واقعی و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۸ و نمودار شکل ۸ نشان می‌دهد که همسانی بسیار خوبی بین عیار واقعی کف‌های فلوتاسیون با عیار پیش‌بینی شده آن‌ها نسبت به روش قبلی وجود دارد و انطباق منحنی‌های دو عیار واقعی و خروجی از سیستم هوشمند در اکثریت نقاط در نمودار شکل ۱۰ با همدیگر منطبق هستند که نشان می‌دهد وقتی که از ۱۱ ویژگی تصاویر برای تعیین عیار کف استفاده می‌شود میزان انطباق منحنی‌ها بیشتر و به تبع آن عیار واقعی به عیار خروجی از سیستم نزدیک می‌شوند. چنانچه محاسبه خطای سیستم نیز نشان می‌دهد که میزان آن ۳/۲ درصد بوده که نسبت به روش‌های قبلی خیلی کمتر شده و عیار خروجی از برنامه هوشمند به عیار واقعی بسیار نزدیک‌تر است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که هر چه از تعداد ویژگی‌های بافتی و تصویری بیشتری از تصاویر در تخمین عیار آن‌ها با استفاده از شبکه عصبی بیشتر استفاده شود به همان اندازه میزان خطای موجود در بین عیار واقعی و عیار پیش‌بینی شده توسط سیستم کمتر شده به طوری که در روش‌های دوم و سوم خطا بین دو

که میزان آن ۸/۷ درصد بوده که تا حدودی نیز زیاد است و بایستی میزان خطا به حداقل مقدار خود برسد و لذا لازم است که از تعداد ویژگی بیشتری برای ارزیابی این سیستم جهت تعیین عیار استفاده شود. با کاهش عیار واقعی کانه اکسیدی مس در تصاویر کف فلوتاسیون میزان کانال‌های رنگی تصاویر افزایش پیدا می‌کند و این روند برای هر سه کانال رنگی و حتی میانگین مقادیر کانال‌های رنگ‌های قرمز، سبز و آبی (RGB) یکسان است.

۴-۵- استفاده از ۱۱ ویژگی (رنگی و بافتی) در آموزش و اعتبارسنجی سیستم هوشمند

در این روش از ویژگی‌های رنگی (رنگ قرمز، سبز و آبی و انحراف معیار آن‌ها) و ویژگی‌های بافتی یا هارالیک (آنتروپی، کنتراست، انرژی، همبستگی و گرادیان-دانسیته) استفاده شده است. در این حالت طول بردار ویژگی حاصله ۱۱ یا تعداد داده‌های اولیه به سیستم ۱۱ تا خواهد بود. پس از آموزش سیستم با حدود ۶۰ نمونه در روش فوق، برای اعتبارسنجی و آزمون سیستم و نیز مقایسه عیار واقعی با عیار پیش‌بینی شده حدود ۳۰ نمونه از اطلاعات رنگی و بافتی تصاویر کف فلوتاسیون به سیستم داده شد که در جدول ۸



شکل ۸. نمودار مقایسه بین درصد عیار واقعی و پیش‌بینی شده با ۱۱ ویژگی رنگی و بافتی

Fig. 8. Diagram of comparison between actual and predicted grade in the third method

۵- روش کار برنامه تعیین عیار کف

۱- ابتدا تصاویر از کف فلوتاسیون تهیه می‌شود.

۲- تصاویر توسط کابل یا وای فای به رایانه یا سیستم پردازش (تصاویر) انتقال داده می‌شود.

۳- عکس‌ها از نظر کیفیت، وضوح، میزان روشنایی و غیره توسط نرم‌افزار با انجام اصلاحات ارتقاء پیدا می‌کنند و نویزها و سایر نواقص تصاویر در این مرحله حذف می‌شود.

۴- ویژگی‌های تصاویر عکس‌های کف فلوتاسیون (ویژگی‌های بافتی و بصری) استخراج می‌گردد.

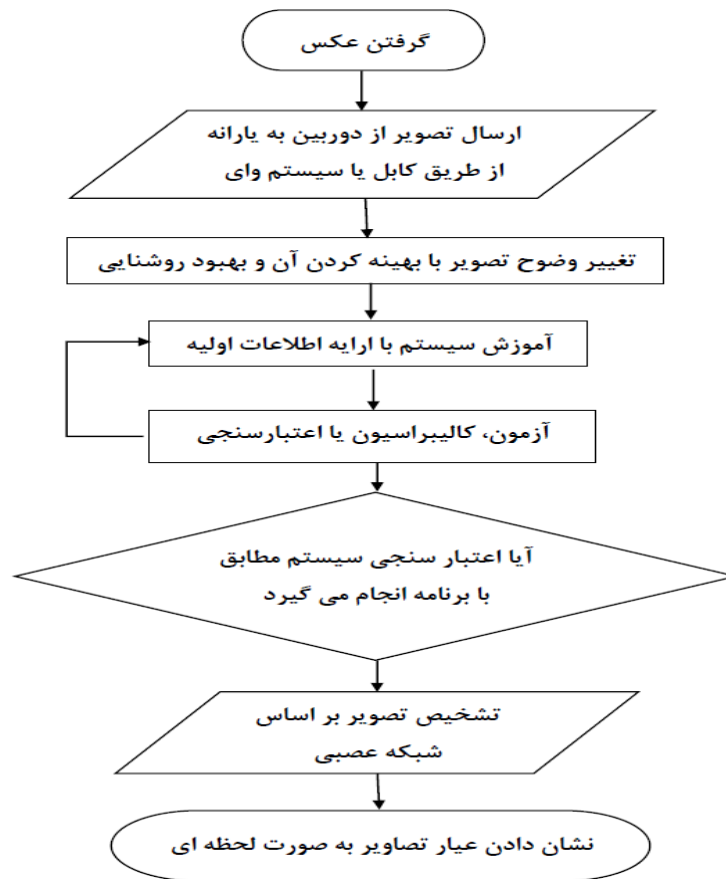
۵- عیار واقعی کف فلوتاسیون مرتبط با ویژگی‌های استخراجی عکس‌ها به سیستم وارد شده و آموزش‌های لازم توسط شبکه عصبی داده می‌شود که مثلاً عکس X با ویژگی‌های بافتی و رنگی مذکور دارای عیار Y است.

۶- پس از آموزش به سیستم تصاویر دیگری به آن وارد می‌شود و در این مرحله نوبت آزمون و اعتبار سنجی و مقایسه عیار خروجی و عیار واقعی صورت می‌گیرد. در حالت کلی در این مرحله می‌توان گفت با داده‌های جدید کالیبراسیون سیستم صورت می‌گیرد.

عیار واقعی و پیش‌بینی شده کمتر و دقت آن زیادتر است. هر چقدر میزان گرادیان دانسیته بالا باشد عیار کف فلوتاسیون نیز تا حدودی زیاد شده که ناشی از تجمع زیاد حباب‌ها و بیشتر بودن ماده معدنی فلوته شونده است که در تصویر کف نیز میزان تجمع حباب‌ها در واحد سطح تصویر افزایش پیدا می‌کند.

با کاهش عیار مس در کنسانتره مرحله رافر، میزان کنتراست تصاویر در حالت کلی با افزایش همراه است که این امر ناشی از روشن شدن تصویر و کاهش اتصال کانه‌ها به حباب و کاهش میزان کانی فلوته شونده در پالپ است. بررسی‌ها حاکی از آن است که با افزایش آنتروپی، عیار کف فلوتاسیون روند کاهشی را نشان می‌داد. در کف‌های با عیار بالاتر مقدار انرژی زیادتر است و رابطه مستقیمی بین عیار مس در نمونه کف‌ها و انرژی تصویر وجود دارد. با کاهش عیار میزان همسانی تصاویر حالت کاهش را نشان می‌دهد.

میزان همبستگی نتایج روش‌های آنالیز تصویری و آنالیز واقعی عددی بسیار نزدیک به یک (۰.۹۷۹۱۶۸۱۷) به دست آمد که نشان می‌دهد موقعی که از پارامترهای زیادی در آنالیز تصویری عیار کف استفاده می‌شود، همسانی بسیار نزدیکی بین این دو آنالیز وجود دارد.



شکل ۹. نمودار نحوه عملکرد و فرایند کار نرم‌افزار

Fig. 9. Diagram of performance and process software

۶- نتیجه‌گیری

- با کاهش عیار واقعی کانه اکسیدی مس در تصاویر کف فلوتاسیون میزان کانال‌های رنگی تصاویر افزایش پیدا می‌کند و این روند برای هر سه کانال رنگی و حتی میانگین مقادیر کانال‌های رنگ‌های قرمز، سبز و آبی (RGB) یکسان است.

- با کاهش عیار مس در کنسانتره مرحله راف، میزان کنتراست تصاویر در حالت کلی با افزایش همراه است که این امر ناشی از روشن شدن تصویر و کاهش اتصال کانه‌ها به حباب و کاهش میزان کانی فلوته شونده در پالپ است.

- بررسی‌ها حاکی از آن است که با افزایش آنترپی، عیار کف فلوتاسیون روند کاهشی را نشان می‌داد. در کف‌های با عیار بالاتر مقدار انرژی زیادتر است و رابطه مستقیمی بین عیار مس در نمونه کف‌ها و انرژی تصویر وجود

۷- بعد از اعتبارسنجی و رسیدن به اختلاف و خطای کمتر با اعمال تمام ویژگی‌های بافتی و رنگی تصویر نوبت به آنالیز تصویر و ارائه آنالیز عیار کف می‌رسد. در این مرحله دوربین هر لحظه از کف عکسی گرفته و پیش پردازش و پردازش آن در سیستم هوشمند عیار آن به صورت آنالیز انجام می‌گیرد.

۸- همزمان با گرفت عکس و آنالیز تصویر نرم‌افزار تعیین عیار اجرا شده و همزمان با شروع ضبط تصاویر، عیار به صورت لحظه‌ای در اختیار قرار می‌گیرد.

۹- همچنین قابلیت دریافت گزارش در بازه‌های زمانی قبلی (مثلا اطلاعات ۳ ماه پیش) نیز در سیستم با تاریخ و زمان معین جهت دسترسی در این سیستم در یک جدول یا فایل اکسل وجود دارد.

در فلوشیت شکل ۹ نحوه عملکرد نرم‌افزار تعیین عیار کف فلوتاسیون ارائه شده است.

- machine vision control, International Journal of Mineral Processing, 48(3-4) (1996) 135-158.
- [5] X.-M. Mu, J.-P. Liu, W.-H. Gui, Z.-H. Tang, C.-H. Yang, J.-Q. Li, Machine vision based flotation froth mobility analysis, in: Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, IEEE, 2010, pp. 3012-3017.
- [6] A. Mehrabi, N. Mehrshad, M. Massinaei, Machine vision based monitoring of an industrial flotation cell in an iron flotation plant, International Journal of Mineral Processing, 133 (2014) 60-66.
- [7] K. Jani, H. Jari, L. Martti, H. Heikki, J. Miettunen, Image Analysis Based Control of Copper Flotation, IFAC Proceedings Volumes, 38(1) (2005) 229-234.
- [8] J. Liu, W. Gui, Z. Tang, H. Hu, J. Zhu, Machine vision based production condition classification and recognition for mineral flotation process monitoring, International Journal of Computational Intelligence Systems, 6(5) (2013) 969-986.
- [9] J. Kaartinen, J. Hätönen, H. Hyötyniemi, J. Miettunen, Machine-vision-based control of zinc flotation—a case study, Control Engineering Practice, 14(12) (2006) 1455-1466.
- [10] L. Jinping, G. Weihua, T. Zhaohui, Flow velocity measurement and analysis based on froth image SIFT features and Kalman filter for froth flotation, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 21(Sup. 2) (2013) 2378-2396.
- [11] Bai Y, J. Wang, and X. Hu, Froth Recognition Based on Machine Vision for Monitoring Coal Flotation Process, Journal of Residuals Science & Technology(2016).
- [12] J. Kaartinen, H. Hyötyniemi, Determination of ore size distribution with image analysis, in: IASTED International Conference on Intelligent Systems and Control, Salzburg, Austria, June 25-27, 2003, IASTED, ACTA Press, 2003, pp. 406-411.
- [13] A. Jahedsaravani, M. Marhaban, M. Massinaei, Prediction of the metallurgical performances of a batch flotation system by image analysis and neural networks, Minerals Engineering, 69 (2014) 137-145.
- دارد. با کاهش عیار میزان همبستگی تصاویر حالت کاهش را نشان می‌دهد.
- هر چقدر میزان گرادیان – دانسیته بالا باشد عیار کف فلوتاسیون نیز تا حدودی زیاد شده که ناشی از تجمع زیاد حباب‌ها و بیشتر بودن ماده معدنی فلوته شونده است که در تصویر کف نیز میزان تجمع حباب‌ها در واحد سطح تصویر افزایش پیدا می‌کند.
 - بررسی‌ها نشان می‌دهد که هر چه از تعداد ویژگی‌های بافتی و تصویری بیشتری از تصاویر در تخمین عیار آن‌ها با استفاده از شبکه عصبی بیشتر استفاده شود به همان اندازه میزان خطای موجود در بین عیار واقعی و عیار پیش‌بینی شده توسط سیستم کمتر شده به طوری که در روش‌های دوم و سوم خطا بین دو عیار واقعی و پیش‌بینی شده کمتر و دقت آن زیادتر است.
 - بررسی‌ها نشان می‌دهند که وقتی از سه ویژگی رنگی (رنگ‌های قرمز، سبز و آبی) تصاویر برای تعیین عیار استفاده می‌شود، این ویژگی‌ها به تنهایی برای تخمین عیار کافی نیستند و میزان خطای ایجاد شده به ۲۱/۷ درصد می‌رسد.
 - میزان خطای ایجاد شده در هنگام استفاده از سه ویژگی رنگی و انحراف معیار آن‌ها به ۸/۷ درصد رسید که نشان می‌داد باید از پارامترهای بیشتری استفاده شود.
 - وقتی که از ۱۱ ویژگی شامل کانال‌های رنگی و انحراف معیار آن‌ها و نیز از ویژگی‌های هارالیک (آنتروپی، کنتراست، انرژی، همبستگی و گرادیان-دانسیته) استفاده شد که نشان دهنده همسانی بسیار خوبی بین عیار واقعی با عیار پیش‌بینی شده آن‌ها است. میزان خطای محاسبه شده بسیار کاهش یافته و به ۲/۳ درصد رسیده است.

منابع

- [1] B. Shean, J. Cilliers, A review of froth flotation control, International Journal of Mineral Processing, 100(3-4) (2011) 57-71.
- [2] G. Bonifazi, S. Serranti, F. Volpe, R. Zuco, Characterisation of flotation froth colour and structure by machine vision, Computers & Geosciences, 27(9) (2001) 1111-1117.
- [3] M. Massinaei, Estimation of metallurgical parameters of flotation process from froth visual features, International Journal of Mining and Geo-Engineering, 49(1) (2015) 75-81.
- [4] D. Moolman, J. Eksteen, C. Aldrich, J. Van Deventer, The significance of flotation froth appearance for

- [17] C.-H. Yang, C.-H. Xu, X.-m. Mu, K.-J. Zhou, Bubble size estimation using interfacial morphological information for mineral flotation process monitoring, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 19(3) (2009) 694-699.
- [18] P. Holtham, K. Nguyen, On-line analysis of froth surface in coal and mineral flotation using JK FrothCam, International Journal of Mineral Processing, 64(2-3) (2002) 163-180.
- [19] Determination of mineral grade using MLP neural network and image processing technique, Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME), 3 (6) (2008) 67-73 (in Persian).
- [14] C. Marais, C. Aldrich, The estimation of platinum flotation grade from froth image features by using artificial neural networks, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 111(2) (2011) 81-85.
- [15] J. Kaartinen, A. Tolonen, Utilizing 3D height measurement in particle size analysis, IFAC Proceedings Volumes, 41(2) (2008) 3292-3297.
- [16] Saeedzadeh Fatemeh, Mohammadnejad Niazi Saeed, Sahib Mahmoud Reza, Ebadi Hamid, Mokhtarzadeh Mehdi, Extracting, optimizing and investigating the effect of different image texture information on large-scale image classification, NATIONAL GEOMATICS CONFERENCE, Volume 22, (2015) (in Persian)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Samiee Bayragh, M. Zakeri, Z. Bahri, Estimation of copper grade from the flotation froth using image analysis and machine vision, Amirkabir J. Civil Eng., 54(3) (2022) 869-884.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19100.7076

