

طراحی و پیاده‌سازی دستگاه تعیین دانه‌بندی مواد معدنی در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی

مهدی ذاکری خطیر^{*1}، محمد جواد اسماعیلی²، مصطفی عنابستانی³

1- مربی پژوهشی جهاد دانشگاهی واحد تربیت مدرس، گروه فرآوری مواد معدنی، E-mail: M.zakeri@acecr.ac.ir

2- عضو پژوهشی گروه فرآوری مواد معدنی جهاد دانشگاهی تربیت مدرس

3- عضو هیات علمی دانشگاه شاهرود، دانشکده فیزیک

(دریافت 12 آبان 1389، پذیرش 21 اردیبهشت 1390)

چکیده

آگاهی از میزان دانه‌بندی مواد معدنی در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی یکی از پارامترهای مهم در سنجش عملکرد سیستم‌های خردایش است. امروزه این امر در کارخانه‌های فرآوری با روش دستی و با سرنده کردن انجام می‌شود که به طور قطع دارای خطای نمونه برداری و آنالیز همراه بوده و مستلزم صرف هزینه و زمان نیز خواهد بود. در این مقاله، سیستمی طراحی شده است که قادر خواهد بود میزان دانه‌بندی مواد معدنی در کارخانه‌های فرآوری را بصورت لحظه‌ای، پیوسته و با دقت قابل قبول در اختیار کاربر قرار دهد. نمونه‌های مورد بررسی از بخش خوراک آسیای خودشکن معدن سنگ آهن چغارت تهیه شد و اندازه واقعی آنها نیز از طریق سرنده کردن بدست آمد. نرم‌افزار طراحی شده قابلیت اندازه‌گیری ابعاد ذرات را در دو حالت آبشاری (ریزش از روی نوار نقاله) و روی نوار نقاله را دارد. پس از کالیبراسیون نرم افزار، و بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی چون نور و سرعت نوار نقاله در مقیاس آزمایشگاهی، آزمایش‌های صنعتی انجام شد. همچنین به منظور افزایش دقت نرم‌افزار، چگونگی کاهش هر چه بیشتر میزان خطای حاصل از همپوشانی ذرات، گرد و غبار و گم شدن ذرات ریز در زیر ذرات درشت در حالت عکسبرداری از ذرات روی نوار نقاله، به صورت نرم‌افزاری و سخت‌افزاری بررسی شد و در نهایت مشخص شد که نرم‌افزار در حالت آبشاری دارای حداقل دقت 97 و در روی نوار داراری دقت 96/2 درصد در تخمین دانه‌بندی است.

واژه‌های کلیدی

تعیین دانه‌بندی لحظه‌ای مواد معدنی، پردازش تصویر، اتوماسیون صنعتی.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از سیستم‌های تعیین دانه‌بندی مواد بر پایه پردازش تصویر به خاطر علاقه مندی کارخانه‌ها برای اطلاع از میزان لحظه ای دانه‌بندی مواد گسترش یافته است [1]. نتیجه تحقیقات نشان‌دهنده برتری‌های این سیستم نسبت به آنالیزهای است که عبارتند از:

1- تعیین دانه‌بندی بر پایه پردازش تصاویر بسیار سریعتر از روش سنتی می باشد.

2- در این روش هزینه و خطای آنالیز بسیار پایین‌تر از روش سنتی است.

3- در روش‌های دستی چنانچه اندازه نمونه‌ها خیلی بزرگ باشند (به طور مثال اندازه مواد معدنی پس از آتشباری) تعیین دانه‌بندی بسیار سخت و اغلب غیرعملی است ولی در این روش حجم و اندازه نمونه‌ها محدودیتی برای تعیین دانه‌بندی ایجاد نمی‌کند.

4- تعیین دانه‌بندی بر اساس پردازش تصویر تأثیر تخریبی بر روی مواد معدنی با سختی کم ندارد در حالی‌که اینگونه مواد در روش سرند کردن دستی اغلب خرد می‌شوند.

5- در بعضی از کارخانه‌ها برای تهیه نمونه و تعیین دانه‌بندی مجبور به توقف خط تولید و یا سیستم‌های خردایش است که این نرم‌افزار از این کار پرهزینه و پرخطر جلوگیری می‌کند.

همچنین تحقیقات مختلف و متعددی روی روش‌های محاسباتی و آماری این فن انجام شده است. آشکارترین این تحقیقات توسط AI-Thyabat و همکارانش انجام شد. آن‌ها مدل‌های متفاوت آماری و الگوریتم‌های متنوعی را برای محاسبه دانه‌بندی مواد در مقیاس آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی ارائه کردند [1]. همچنین Tessier و همکاران نیز الگوریتم دیگری را برای طبقه‌بندی مواد بر اساس دانه‌بندی ارائه کردند. آن‌ها در این تحقیق مواد را به دو دسته خشک و تر تقسیم کرده و از ویژگی بافتی و رنگ مواد معدنی برای این تقسیم‌بندی استفاده کردند. از دیگر تحقیقات صورت گرفته در

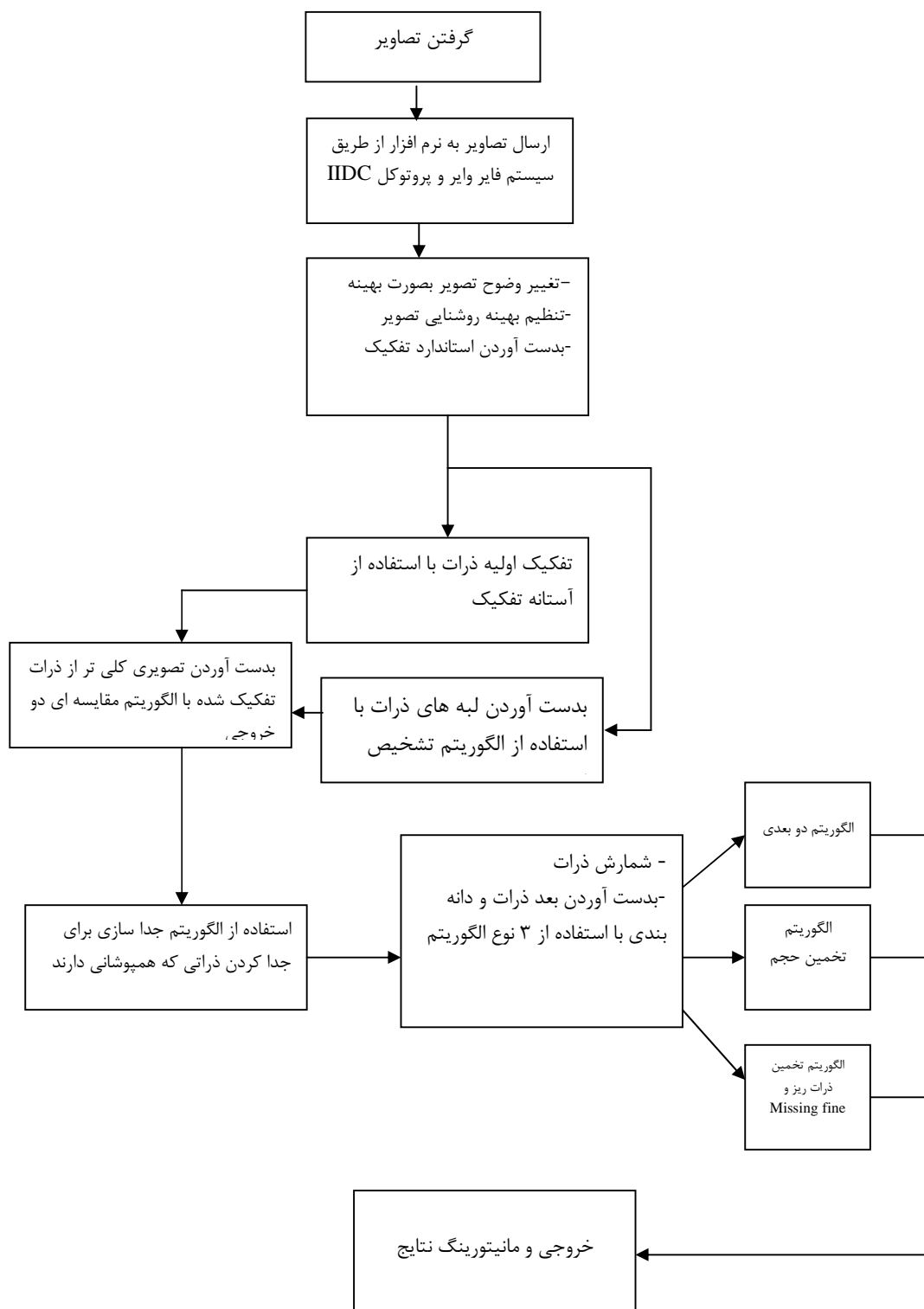
این زمینه می‌توان به تحقیقات Herbtس و همکاران [2]

guyot و همکاران [3] allebuona و همکاران [4]، Yen و همکاران [5] و King [6] اشاره کرد که همگی به ارائه روش‌ها و الگوریتم‌های مختلف برای تعیین دانه‌بندی مواد پرداخته‌اند. امروزه شرکت‌های متعددی در زمینه ارائه سیستم‌های تعیین دانه‌بندی مواد معدنی به صورت پیوسته در سطح دنیا فعالیت می‌کنند. این سیستم در معادن مختلف دنیا همچون

معدن Minntac و Hibtac [7] در آمریکا، Hamersly در استرالیا [1]، [8] Southern Peru، LTV [9] در آمریکا، معادن elbaie، INCO Coleman، Highland Valley، Copper، Lafarge Canada [10] در کانادا نصب و راه‌اندازی شده است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که با نصب این سیستم مصرف انرژی سیستم‌های خردایش در آسیاهای نیمه-خودشکن و خودشکن کاهش می‌یابد.

2- طراحی نرم‌افزار

مهم‌ترین مرحله طراحی نرم‌افزار، تدوین الگوریتمی است که بتواند ذرات مواد معدنی را تشخیص و تفکیک کند. این توانایی، زمانی که مواد بر روی نوار نقاله قرار دارند و به‌طور کامل به یکدیگر چسبیده‌اند، اهمیت بیشتری دارد. عدم تفکیک ذرات به‌هم چسبیده باعث بزرگتر شدن d_{80} نسبت به مقدار واقعی خواهد بود. البته زمانی که مواد در حالت آبخاری قرار دارند به خاطر تفاوت در وزنشان اتصال ذرات به یکدیگر کمتر اتفاق می‌فتد. تصاویری که از طریق درگاه فایر وایر 1 به کامپیوتر منتقل می‌شود، توسط نرم‌افزار خاکستری شده و بر اساس میزان درجه خاکستری بودن تصویر، پارامتری را به عنوان آستانه تفکیک مشخص می‌کند. بر اساس این آستانه تفکیک تصویر به صورت دو دویی (باینری) تولید می‌شود که نمایی کلی از ذرات را به صورت تفکیک شده ارائه می‌کند. اما در این تصویر اکثر ذرات بدلیل همگنی رنگ‌ها به هم چسبیده و تفکیک نشده‌اند. برای رفع این مشکل با استفاده از الگوریتم تشخیص لبه بر اساس عملگر Sobel لبه‌های ذرات از تصویر خاکستری اولیه بدست می‌آید. با تبدیل تصویر لبه بصورت دو دویی، آن را از خروجی آستانه تفکیک، کم کرده و تصویر بهتری از ذرات تفکیک شده حاصل می‌شود. در این مرحله با استفاده از الگوریتمی، فواصل در مختصات کارتری برای ذرات تشخیص داده شده محاسبه می‌شود



شکل ۱. الگوریتم استفاده شده در حالت آبخاری

3- مواد، تجهیزات و روش تحقیق

3-1- تهیه نمونه

برای انجام دادن آزمایش‌ها نمونه‌هایی از کاخانه فرآوری سنگ آهن چغارت تهیه شد. پس از خردایش و دانه‌بندی دوباره لا هم ترکیب شدند تا مجموعه گسترده‌ای از ابعاد ذرات به دست آید. آزمایش‌ها در مقیاس نیمه‌صنعتی در حالت آبشاری (عکسبرداری از ذرات در حال ریزش از روی نوار نقاله) و روی نوار نقاله انجام شد و آزمایش‌های صنعتی نیز با عکس- برداری از ذرات روی نوار نقاله خروجی از سنگ‌شکنی اولیه و منتهی به آسیای نیمه خود شکن انجام شد (شکل 2).



شکل 2. موقعیت دوربین عکاسی در حالت عمود بر سطح نوار

3-2- تجهیزات

برای انجام آزمایش‌ها از نوار نقاله نیمه صنعتی با طول نوار 1/5 متر، ضخامت 0/5 و ارتفاع 1/5 متر با سرعت متغیر استفاده گردید. همچنین در حالت آبشاری از صفحه‌ای نورانی و کاملاً صاف در پشت ذرات در حال ریزش به منظور جلوگیری از ایجاد سایه استفاده شد. از 4 منبع نورانی (پروژکتور) نیز در دو حالت روی نوار و آبشاری برای نورپردازی مناسب و ایجاد تصویری قابل پردازش استفاده شد. همچنین برای عکسبرداری از دوربین سونی مدل 200DSLR-A استفاده شد.

4-4- ارائه نتایج و تحلیل یافته‌ها

4-1- کالیبراسیون صنعتی

نصب و راه اندازی تجهیزات مورد نیاز برای تعیین دانه بندی ذرات بر پایه فن پردازش تصویر در واحدهای صنعتی مختلف و یا نقاط گوناگونی از مدار هر یک از واحدهای صنعتی، مستلزم انجام عمل کالیبراسیون و در واقع داشتن روشی مناسب برای کالیبره کردن نرم افزار است. از این رو چگونگی انجام کالیبراسیون صنعتی بررسی شد.

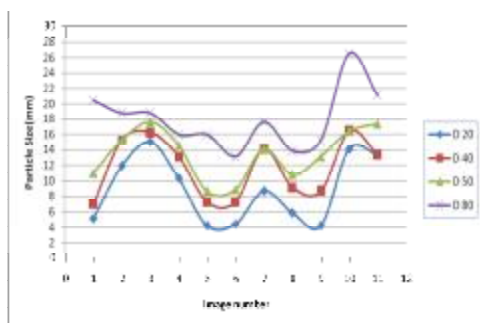
کالیبراسیون به این شکل انجام می‌گیرد که دوربین در فاصله‌ای مشخص از محل عکسبرداری (مواد روی نوار و یا در

حالت ریزش آبشاری هستند) قرار می‌گیرد و یک گوی کاملاً کرووی روی نوار نقاله متحرک قرار می‌گیرد. نکته حائز اهمیت در کالیبره نمودن آن است که دوربین در حالت کاملاً مشابه با عکسبرداری ذرات، تصویر گوی در روی نوار نقاله و یا در حالت ریزش آبشاری را ثبت و آنالیز کند. در این حالت نرم افزار، گوی را بصورت دایره‌ای تشخیص داده و پس از گرفتن اندازه آن از کاربر، ضریب کالیبراسیون را ارائه می‌دهد. این ضریب در تمامی محاسبات بعدی در تخمین اندازه ذرات اعمال می‌شود. از این رو در انجام کالیبراسیون صنعتی نکته مهم، فاصله قرارگیری دوربین از محل عکسبرداری استو با تغییر آن نیاز است تا کالیبراسیون مجدد صورت گیرد زیرا در غیر این صورت ضریب کالیبراسیون قبلی در نتایج نرم‌افزار دخالت داده می‌شود و در نهایت موجب خطا می‌شود.

4-2- تعیین دانه‌بندی مواد در حالت آبشاری در مقیاس نیمه

صنعتی

پس از تهیه نمونه و تعیین دانه‌بندی آنها با استفاده از سرنده کردن، مواد بر روی نوار نقاله قرار داده شده و در زمان ریزش از نوار نقاله عکسبرداری انجام شده است. عکس‌های تهیه شده با استفاده از نرم‌افزار آنالیز و میزان دانه‌بندی آنها بصورت d_{80} ، d_{40} و d_{20} ارائه شده است



شکل 3. آنالیز ابعادی ذرات موجود در تصاویر ثبت شده از ذرات در حالت آبشاری

دقت نرم‌افزار در آنالیز دانه‌بندی ذرات بر پایه تصاویر ضبط شده در آزمایش، در مقایسه با نتیجه حاصل از آنالیز سرنده، 98/3 درصد به دست آمد.

4-3- تعیین دانه‌بندی مواد در حالت روی نوار در مقیاس صنعتی

آزمایش‌های این مرحله در کارخانه فرآوری سنگ آهن چغارت انجام شد. آزمایش‌ها بر روی مواد موجود در نوار نقاله متحرک

شود، انجام شود. روش‌های مختلفی برای کالیبره کردن نرم-افزار در حذف خطای حاصل از گم شدن ذرات ریز در زیر ذرات درشت وجود دارد که از مناسب‌ترین روش‌ها، کالیبراسیون تجربی Rosin-Rammler است. در این روش، کالیبراسیون با تطبیق دادن منحنی Rosin-Rammler به داده‌های اندازه‌گیری شده انجام می‌شود. رابطه (1) معادله Rosin-Rammler را نشان می‌دهد. توزیع Rosin-Rammler در واقع بر این حقیقت استوار است که توزیع‌های جرمی و اندازه‌ای نسبی ذرات از ابتدا تا انتهای خط بر اساس رابطه (1) باقی می‌ماند و فقط اندازه آنها متفاوت است به عبارت دیگر درصد ذرات بزرگ و کوچک در تمام قسمت‌های سیستم‌های خردایش بر اساس رابطه (1) خواهد بود.

در رابطه (1):

$$y = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{x_c}\right)^n\right]$$

y = درصد تجمعی عبوری ذرات

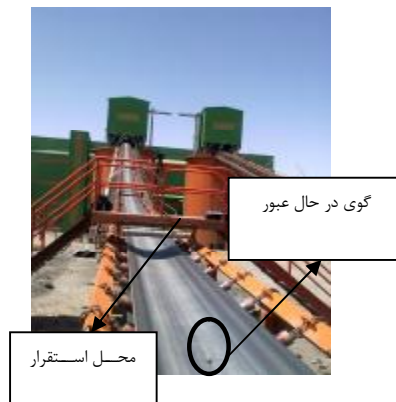
x = اندازه ذرات

x_c = اندازه شاخص توزیع (63/2 % عبوری)

n = دامنه تغییرات توزیع

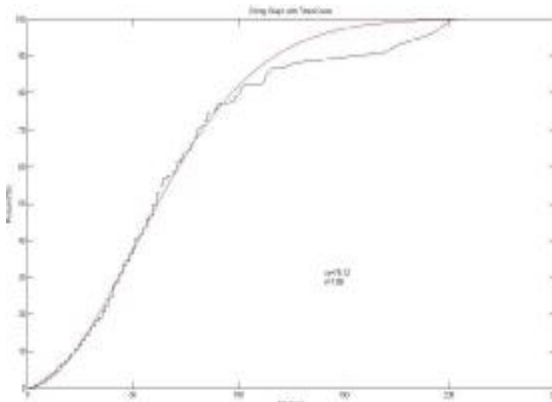
فاکتور دامنه تغییرات توزیع (n)، فاکتوری تجربی است که بر اساس گستردگی ابعاد ذرات در یک نمونه مشخص، تعیین می‌شود و به‌عنوان مثال مقادیر آن برای نمونه‌های مختلف، 0/5، 0/75، 1، 1/25، 1/5، 2 و 3 می‌تواند انتخاب شود. شکل 5 نشان‌دهنده یکی از تصاویر ضبط شده از ذرات روی نوار نقاله متحرک کارخانه فرآوری چغارت و شکل 6 نتیجه آنالیز دانه‌بندی واقعی و کالیبره شده آن را نشان می‌دهد.

خروجی از سنگ‌شکنی اولیه و منتهی به آسیای خود شکن انجام شد. شکل 4 مربوط به انجام آزمایش‌های مذکور را نشان می‌دهد. پس از نصب سیستم در مکان تعیین‌شده و به‌منظور راه‌اندازی سیستم، ابتدا کالیبراسیون انجام شد. پس از کالیبره کردن، به‌منظور ارزیابی کارایی سیستم، عکسبرداری از ذرات روی نوار نقاله آغاز شد. در مدت زمان 30 دقیقه، 130 عکس از ذرات روی نوار ضبط شد. همچنین برای تعیین خطای سیستم نمونه‌برداری لازم از ذرات عکسبرداری شده انجام شد تا بر اساس آنالیزسرنندی دانه‌بندی آنها مشخص و سپس با خروجی سیستم مقایسه شود.



شکل 4. انجام کالیبراسیون سیستم نصب شده در مجتمع چغارت

4-4- کالیبره کردن صنعتی نرم‌افزار در حذف خطای حاصل از گم شدن ذرات ریز در زیر ذرات درشت (Missing fine)
وقتی ذرات بر روی نوار نقاله قرار می‌گیرند، با توجه میزان جرمشان تحت عملیات طبقه‌بندی قرار گرفته به گونه‌ای که ذرات ریز در زیر ذرات درشت پنهان می‌شوند. همچنین بخشی از ذرات به علت ریزی بیش از حد به طور مجزا قابل رویت نیستند. این مسئله سبب ایجاد خطا در پردازش تصاویر می‌شود و تغییرات دانه‌بندی را کمتر از آنچه که هست برآورد می‌کند. از این‌رو برای کاهش خطای ایجاد شده، لازم است کالیبراسیون دیگری به‌گونه‌ای که در ادامه توضیح داده می-



شکل 6. منحنی توزیع دانه بندی واقعی و کالیبره شده ذرات موجود در تصویر 5

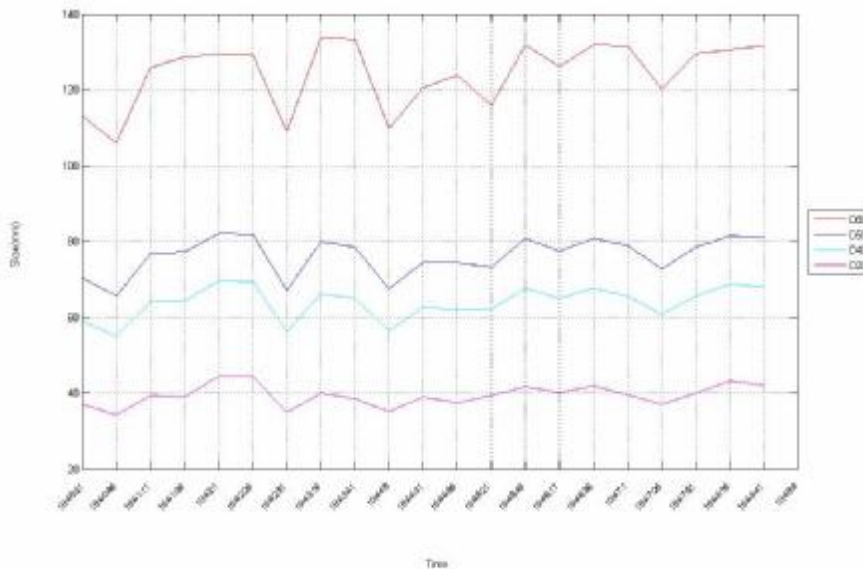


شکل 5. تصویر ضبط شده سنگ آهن

شکل 7 مشاهده می‌شود، بر اساس پردازش نرم افزار D_{50} ، D_{80} ، D_{20} ، D_{40} تعیین شدند. مقایسه مقادیر به دست آمده از پردازش نرم افزار و آنالیز سرندی نشان می‌دهد که حداکثر خطای نرم افزار 3/8% است.

4-5- تحلیل نتایج آزمون های انجام شده در مقیاس صنعتی (مجتمع معدنی چغارت)

پس از مرحله تصویربرداری از ذرات، تصاویر ضبط شده در نرم افزار پردازش شدند. شکل 7 نتیجه آنالیز تصاویر ضبط شده از مجتمع معدنی چغارت را نشان می‌دهد. همان گونه که در



شکل 7. نتیجه آنالیز تصاویر ضبط شده از مجتمع معدنی چغارت

5- نتیجه‌گیری

3- در پردازش تصاویر ضبط شده از روی نوار نقاله، به منظور کاهش خطای حاصل از پنهان شدن ذرات ریز در بین ذرات درشت، عمل کالیبراسیون صنعتی. بر اساس روش تجربی Rosin-Rammler انجام شد.

4- روش Rosin-Rammler در نرم افزار حاضر به صورت برازش بهترین منحنی Rosin-Rammler بر توزیع دانه‌بندی ذرات موجود در تصویر نمایش داده شد.

5- حداکثر خطای سیستم در آنالیز دانه بندی ذرات موجود در نوار نقاله خروجی از سنگ شکن چغارت، 3/8% تعیین شد.

1- با توجه به شرایط خاص برخی از مدارهای فرآوری مواد معدنی و عدم امکان عکسبرداری از ذرات در حالت آبشاری، ارتقاء سخت افزاری و نرم افزاری سیستم آنالیز دانه بندی به منظور نصب و استفاده از آن بر روی نوار نقاله ضرورت یافت. دستیابی به دانش فنی طراحی الگوریتم که بتواند مواد متحرک روی نوار نقاله را از هم تفکیک کند از دستاوردهای بسیار مهم این مرحله بود.

2- در این طرح سیستمی برای تعیین دانه‌بندی مواد معدنی در دو حالت آبشاری و روی نوار با دقت قابل قبول طراحی و آزمایش شد.

مراجع

- [5]-Yen, Y.K., Lin, C.L., Miller, J.D., 1998. Particle overlap and segregation problems in on-line coarse particle size measurement. Powder Technology, 98, 1-120
- [6] R.P. King, Measurement of particle size distribution by image analyser, Powder Technology 39 (1984) 279–289.
- [7] Leslie Gertsch, Total Ore Processing Integration and Management, Final Technical Report, University of Missouri-Rolla, 2007.
- [8] Palangio, Maerz, Advanced automatic optical blast fragmentation sizing and tracking, Brighton Conference Proceedings, 2005.
- [9] Jack Eloranta, Thomas Palangio, Size Matters on the Mesabi Range, Technical Report, WipWare, Inc, 2004.
- [10] Palangio, T. C. and Maerz, N. H., 1999. Case studies using the WipFrag image analysis system. FRAGBLAST 6, Sixth International Symposium For Rock Fragmentation By Blasting, Johannesburg, South Africa, Aug. 8-12 1999, pp. 117-120.
- [1] George M. Potter, Samuel Oti-Atakorah, Development in Gravity Concentration Circuit in Ashanti Goldfields Company Obuasi, Annual report of company Obuasi, 2000.
- [2] Herbst, J.A., Pate, W.T., 1999. Object components for comminution system softsensor design. Powder Technology 105, 424–429.
- [3] Guyot, O., Monredon, T., LaRosa, D., Broussaud, A., 2004. VisioRock, an integrated vision technology for advanced control of comminution circuits. Minerals Engineering 17, 1227–1235.
- [4] Vallebuona, G., Arbore, K., Casali, A., 2003. A procedure to estimate particle distributions from area measurements. Powder Technology 16, 323–329.