

ارزیابی خطای اعوجاج در روش پردازش تصویری برای تعیین توزیع دانه بندی

سنگ خرد شده ناشی از انفجار

هادی یعقوبی^۱، حمید منصوری^۲، محمد علی ابراهیمی فرسنگی^{۳*}، حسین نظام آبادی پور^۴

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی استخراج معدن، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران hadi_miner@yahoo.com

^۲ دانشیار بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران hmansouri@uk.ac.ir

^۳ دانشیار بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران maebrahimi@uk.ac.ir

^۴ استاد بخش مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران nezam@uk.ac.ir

(دریافت ۰۱ تیر ۱۳۹۶، پذیرش ۲۰ اسفند ۱۳۹۶)

چکیده

دستیابی به توزیع ابعادی و خردایش بهینه قطعات سنگ خرد شده حاصل از انفجار، نقش مهمی در کنترل فرآیندهای استخراج و فرآوری و به حداقل رساندن هزینه‌های تولید دارد. برای بهینه‌سازی فرآیند تولید و ارزیابی سریع و قابل اعتماد نتایج حاصل از انفجار، یکی از روش‌های نوین و متداول در تعیین دانه‌بندی و توزیع خردشدگی سنگ، روش پردازش تصویری است که با وجود مزایای فراوان، این روش با محدودیت‌های ذاتی و خطاهایی نیز همراه است که دقت، صحت و تکرارپذیری نتایج را تحت تاثیر قرار می‌دهد. شناخت این خطاها و کاهش آن‌ها موجب بهبود نتایج حاصل از پردازش تصاویر می‌شود. بر همین اساس، در این تحقیق ضمن معرفی انواع خطاهای روش پردازش تصویری، خطای زاویه تصویربرداری نامناسب (اعوجاج) مورد تحلیل قرار گرفته و روش‌هایی برای کاهش آن پیشنهاد شده است. نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده بر روی تعداد ۲۴۰ تصویر قطعات سنگ خرد شده حاصل از انفجار، بیانگر میانگین دقت ۹۷ درصد و انحراف معیار ۴/۵ درصد در رفع خطای اعوجاج تصاویر است. همچنین هرگاه فاکتور فاصله بین ۰/۸ تا ۱/۵ باشد، نتایج به دست آمده قابلیت اطمینان بیش تری دارند و با کوچک‌تر شدن ابعاد ذرات، هنگامی می‌توان به نتایج بهینه دست یافت که فاکتور فاصله کاهش یابد (حدود ۰/۲ تا ۰/۴). همچنین فراوانی فاکتور فاصله در حالت توزیع لاگ‌نرمال داده‌ها، در بازه ۰/۵ تا ۱/۵ با میانگین ۱/۴۸ دارای فراوانی خطای با میانگین ۳ درصد است. مقایسه منحنی دانه‌بندی سرنبدی توده سنگ خرد شده، با منحنی دانه‌بندی حاصل از تصاویر گرفته شده از آن، قبل از رفع خطای اعوجاج و پس از آن، با نرم‌افزار Split Desktop در حالت خودکار نیز نشان داد که میانگین خطای تخمین توزیع دانه‌بندی، پس از رفع خطای اعوجاج، بسته به مقدار خطای اعوجاج، از ۵ تا ۲۵ درصد کاهش یافته است.

کلمات کلیدی

پردازش تصویری دیجیتال، توزیع ابعادی قطعات سنگ خرد شده، خطای اعوجاج

۱-مقدمه

آگاهی از توزیع ابعادی قطعات سنگ خرد شده در فرآیند استخراج و خردایش مواد معدنی، تاثیر به سزایی در بهبود راندمان عملیات معدنی و به حداقل رساندن هزینه‌های تولید از جمله باربری، بارگیری، خردایش و آسیاکنی دارد. روش پردازش تصویری دیجیتال به عنوان یک روش غیرمستقیم، سریع و قابل اعتماد برای ارزیابی نتایج حاصل از انفجار و تعیین دانه‌بندی و توزیع خردشدگی سنگ شناخته می‌شود [۱ و ۲]. در این روش تصویری از سطح سنگ‌هایی که آشکاری شده‌اند، برداشت شده و سپس با پردازش تصاویر و با استفاده از کامپیوتر توزیع خردشدگی سنگ تعیین می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به استفاده آسان، سریع بودن اندازه‌گیری‌ها در محل، مناسب بودن قیمت تجهیزات، نبود وقفه در امر تولید، صرفه‌جویی در زمان و هزینه (به‌ویژه در توده‌های بزرگ)، ثبت تصاویر تهیه شده و فراهم کردن سابقه مناسبی از انفجارها و خردایش‌های مختلف و غیر مخرب بودن برای سنگ‌ها و کانه‌های ضعیف اشاره کرد [۱ و ۲].

با وجود مزایای بیان شده، این روش محدودیت‌های ذاتی نیز دارد که دقت، صحت و تکرارپذیری نتایج اندازه‌گیری را تحت تاثیر قرار می‌دهد. محدودیت‌ها و خطاها با تصویربرداری آغاز می‌شود. خطاهایی از قبیل در دسترس بودن تنها اطلاعاتی از سطح توده سنگ خرد شده [۳]، نبود روشنایی یکنواخت، زوایا یا فواصل نادرست [۴]، وجود سایه و شلوغی، گرد و غبار و ذرات معلق ممکن است سبب ایجاد خطا در فرآیند تصویربرداری شود. خطاهای دیگری در مرحله بعدی یعنی پردازش تصاویر ایجاد می‌شوند، در جایی که ممکن است قطعات سنگی به خوبی دیده نشوند. مدلسازی بعد سوم از یک تصویر دوبعدی نیز می‌تواند خطاهایی را در حین پردازش ایجاد کند [۱]. شناخت این محدودیت‌ها و راه کارهای کاهش تاثیرگذاری آن‌ها موجب بهبود نتایج حاصل از پردازش تصاویر خواهد شد. با توجه به تنوع خطاهای موجود و استفاده روزافزون از روش پردازش تصویر، باید ضمن شناخت کامل خطاها از عوامل ایجادکننده آن‌ها کاست تا اطلاعات به دست آمده از روش پردازش تصویری به واقعیت نزدیک‌تر شود. بر همین اساس، در این تحقیق ضمن مروری بر روش‌های پیش‌پردازش و ارتقای کیفیت تصویر، خطاهای پردازش تصویری معرفی و خطای اعوجاج، به عنوان یکی از مهم‌ترین خطاها، بررسی و روش‌هایی برای کاهش آن پیشنهاد می‌شود. تحقیقات وسیعی در این زمینه انجام شده است که در این پژوهش به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است.

مرزا^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۸ از نرم‌افزار WipFrag برای دوران و تبدیل هندسی روی تصاویر مورب که با لنزهای با فاصله کانونی کوتاه گرفته شده بودند، استفاده کردند [۵]. وانگ^۲ در سال ۲۰۰۵ مطالعاتی بر روی رفع اعوجاجات هندسی تصاویر MRI انجام داد [۶]. تورلی^۳ در سال ۲۰۰۸ از یک فرآیند نرمال‌سازی در دو جهت x و y و سپس عمودسازی میانگین فضای بین نقاط در دسته‌های مختلف در تصاویر توده سنگ‌ها در معادن روباز استفاده کرد [۳]. گل‌پرداز و همکاران در سال ۱۳۸۹ روشی برای رفع اعوجاجات هندسی در تصاویر متون فارسی دوربینی ارائه کردند که شامل رفع انحنای حذف کجی و اعوجاج در این تصاویر بود [۷]. کیومرثی و همکاران در سال ۱۳۹۱ یک روش برای رفع اعوجاجات هندسی متون فارسی ارائه دادند که شامل چهار مرحله کلی پیش‌پردازش، رفع اعوجاج کلی، تصحیح اندازه و رفع اعوجاج جزئی بود [۸]. طلوع در سال ۱۳۹۳ برای تصحیح اعوجاج فتومتریکی تصاویر از روش درون‌نگاری هارمونیک استفاده کرد، همچنین برای افزایش دقت این روش، از همسایه‌های قطری هر پیکسل نیز استفاده کرد [۹]. اسماعیل‌زاده و همکاران نیز در سال ۱۳۹۵ روشی برای تصحیح اعوجاج هندسی تصاویر با استفاده از معادلات اساسی برد و داپلر ارائه دادند [۱۰]. برناردو^۴ در سال ۲۰۰۸ از نگاشت چهار نقطه‌ای و خطوط موازی و عمودی برای تصاویر دارای نشانگر استفاده کرد [۱۱]. باومن^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۲ هفت مرحله را برای تصحیح خطای اعوجاج پیشنهاد کردند. این مراحل به ترتیب شامل قطعه‌بندی پس و پیش‌زمینه تصویر، اعمال لبه‌یاب Canny روی تصویر، اعمال تشخیص‌گر خطوط Hough برای تشخیص خطوط، دسته بندی خطوط به عنوان خطوط لبه بالا و پایین اشیا تصویر، میانگین‌گیری از خطوط، محاسبه هوموگرافی^۶ برای تبدیل خطوط به خط مستقیم و در نهایت اصلاح اعوجاج است [۱۲]. در سال ۲۰۱۵ یک روش برای مدل کردن اعوجاج هندسی به عنوان خانواده تک پارامتری از توابع انحراف توسط والنتی^۷ و همکاران ارائه شد [۱۳]. در سال ۲۰۱۶ یک الگوریتم برای تصحیح خطای ایجاد شده به علت اعوجاج هندسی توسط کونوف^۸ و همکاران ارائه شد. آن‌ها از تشخیص نشانگرهای دایره‌ای در تصویر استفاده کردند. همچنین بیان کردند که سیستم‌های اندازه‌گیری و شناسایی نشانگرهای قابل رویت، در قالب تقارن مرکزی پردازش تصویر که یافتن مرکز آن‌ها ساده است (مانند دایره، حلقه و دایره هم‌مرکز)، استفاده می‌شوند [۱۴].

۲- روش کار

۲-۱- پیش پردازش و ارتقای کیفیت تصویر

ممکن است حین تصویربرداری به دلایلی همچون وجود گرد و غبار، آلوده بودن محیط، عدم تنظیم روشنایی و شدت نور، زاویه نامناسب تصویربرداری و ایجاد سایه، خطاهایی در تصویربرداری ایجاد شود [۱ و ۲]، بنابراین باید یک مرحله پیش پردازش بر روی تصاویر انجام شود. از جمله روش‌های پیش پردازش و ارتقا کیفیت تصویر که عمدتاً برای رفع مشکلاتی از قبیل وجود نویز روی تصویر، وضوح پایین، حرکت جزئی و نامناسب نشان دادن جزئیات تصویر است، می‌توان به فیلترهای رفع نویز، هموارکننده و نرم‌کننده جزئیات تصویر، ارتقا جزئیات و افزایش وضوح تصویر اشاره کرد. از مهم‌ترین این فیلترها می‌توان به فیلترهای میانگین‌گیر، فیلترهای مرتبه آماری، فیلترهای هموژن، یکسان‌سازی هیستوگرام و فیلترهای ارتقا جزئیات اشاره کرد [۱۵]. با توجه به اینکه در تصاویر سنگ‌های معدنی خرد شده که عمدتاً در سر معدن نمونه‌برداری و گرفته شده و به لحاظ الزامات ایمنی و تصویربرداری و عدم دخالت در سیکل تولید، محدودیت‌هایی وجود دارد، از این‌رو خطاهای پیش گفته وجود داشته و برای پیشگیری از وقوع خطاهای بعدی در الگوریتم، لازم است در مرحله اول این خطاها رفع و یا به حداقل ممکن کاهش یابند. به عنوان مثال در شکل ۱ نمونه‌ای از یک تصویر قطعات سنگ که با نویز از نوع فلفل و نمک آلوده شده و سپس فیلترهای رفع نویز بر روی آن‌ها اعمال شده، نشان داده شده است که از بین فیلترهای اعمال شده، فیلتر میانه کارآیی مناسب‌تری نسبت به سایر فیلترها داشته است.

۲-۲- خطاهای پردازش تصویری برای اندازه‌گیری خردایش

توده سنگ

خطا در اندازه‌گیری با اشتباه در اندازه‌گیری متفاوت است. خطا به عنوان متغیری بین نتایج اندازه‌گیری انجام شده و مقدار صحیح پارامترهای اندازه‌گیری شده است. در استفاده از هر سیستم پردازش تصویری ممکن است مقادیری از خطا رخ دهد. البته تعیین مقدار صحیح هر پارامتر نیز دشواری‌های خاص خود را دارد. به ویژه اگر توده سنگ خرد شده بزرگ باشد [۱۶ و ۱۷]. یکی از محدودیت‌های تصویربرداری این است که تنها می‌توان آنچه را که دیده می‌شود اندازه‌گیری کرد. در نتیجه هنگامی می‌توان به نتایج بهتری دست یافت که تصاویری درست با مقیاس

مناسب تهیه شود. تصویربرداری غیرفنی در حالتی که تجهیزات تصویربرداری مناسب نیست، وجود نور نامناسب و بی‌توجهی به مقیاس مناسب از عواملی است که موجب عدم دستیابی به نتایج صحیح می‌شود. از این‌رو تا زمانی که تصاویری مناسب از توده سنگ تهیه نشود نمی‌توان انتظار نتایج صحیح را داشت. خطاهایی که ممکن است در روند پردازش تصویر ایجاد شوند را می‌توان در چهار دسته قرار داد [۲، ۳، ۴]:

الف) خطاهای وابسته به روش پردازش تصاویر

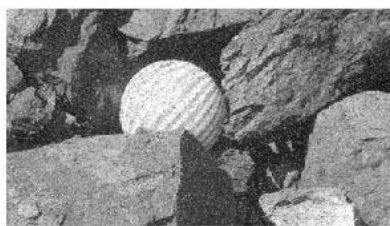
ب) خطاهای وابسته به خصوصیات ظاهری نمونه

ج) خطاهای وابسته به نمونه‌گیری

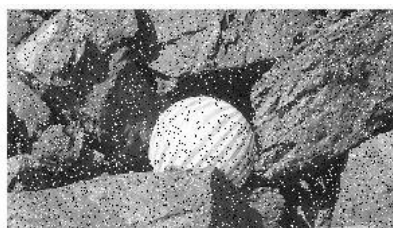
د) خطاهای وابسته به فرآیند تصویربرداری

نوع اول بیشتر مربوط به الگوریتم‌های پردازش تصویر و شیوه تشخیص مرز در آن‌ها است. از جمله پارامترهای تاثیرگذار در این نوع، الگوریتم پردازش تصویر، رنگ و بافت تصویر، سایه‌های تشکیل شده بین قطعات خرد شده، وجود گرد و خاک و ذرات معلق، مدلسازی بعد سوم قطعات و خطای مرزیابی دستی و خودکار قطعات توسط کاربرهای مختلف است [۱ و ۱۴، ۳].

از مهم‌ترین خطاهای وابسته به خصوصیات ظاهری نمونه، خطای اندازه‌گیری ابعاد قطعات (به علت ناهمسانگردی) و هم‌پوشانی قطعات است. یکی دیگر از مهم‌ترین خطاهایی که در فرآیند پردازش تصویر وارد می‌شوند، مربوط به نحوه نمونه‌گیری است. در تمامی روش‌های اندازه‌گیری، حتی پردازش سرنندی نیز به نوعی این خطا وجود دارد. اگر قطعات مورد بررسی یکنواخت باشند، مشکل کمتری وجود دارد و اگر غیر یکنواخت باشد، خطای ایجاد شده تا حد زیادی به نحوه نمونه‌گیری وابسته است. از جمله این خطاها، خطای ناشی از جدانشینی قطعات^۱ است که موجب تفکیک قطعات شده و ممکن است به علت جابه‌جایی قطعات به وسیله کامیون یا نوار نقاله ایجاد شوند. خطای جدانشینی این‌گونه توصیف می‌شود که سنگ‌ها این ویژگی را دارند که در صورت حرکت و لرزش به گروه‌هایی با اندازه‌های یکسان تبدیل شوند. به عنوان مثال لرزش تعدادی کره در دو اندازه مختلف در یک ظرف باعث تفکیک کره‌ها بر اساس اندازه آن‌ها می‌شود (شکل ۲). در این حالت هیچ تحلیل سطحی توانایی تشخیص کره‌های کوچکتر را ندارد. به عبارتی به علت ابعاد متفاوت ذرات، فضاهای خالی بین آن‌ها پر شده و نوعی دانه‌بندی در توده رخ می‌دهد [۳].



تصویر اصلی



اعمال فیلتر میانگین گیر روی تصویر نویزی



تصویر نویزی (فلفل و نمک)



اعمال فیلتر میانگین گیر روی تصویر نویزی



اعمال فیلتر وینر روی تصویر نویزی



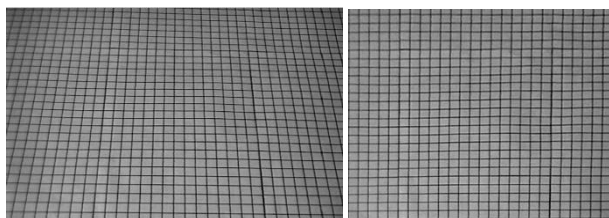
اعمال فیلتر میانه روی تصویر نویزی

شکل ۱- یک نمونه از اعمال فیلترهای میانگین، میانه، گاوسی و وینر بر روی تصویر نویزی شده با نویز فلفل و نمک

۲-۳- خطای اعوجاج تصاویر دیجیتال گرفته شده از توده سنگ خرد شده حاصل از انفجار

تاثیر خطای اعوجاج هنگامی پدیدار می شود که دید دوربین با سطح توده زاویه قائم نداشته و یا در صورتی که مواد به صورت کپه ای باشند، ممکن است حتی با وجود عمود بودن دوربین بر سطح توده، اجسام فاصله ثابتی نسبت به دوربین نداشته باشند. در این صورت اندازه قطعات ثبت شده در تصویر با واقعیت متفاوت است و قطعات دورتر نسبت به دوربین، کوچک تر از حالت واقعی خود نشان داده می شوند. از مهم ترین عوامل موثر در خطای اعوجاج می توان به زاویه تصویربرداری و زاویه ای که شی در آن قرار دارد و یا از آن زاویه دیده می شود اشاره کرد. شکل ۳- الف حالتی را نشان می دهد که دوربین عمود بر سطح است

و شکل ۳- ب همان سطح در حالتی که دوربین با زاویه نسبت به سطح قرار گرفته است [۱].



ب

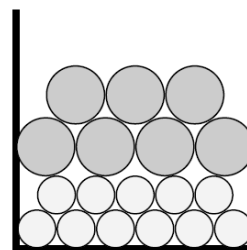
الف

شکل ۳- (الف): استقرار دوربین عمود بر سطح تصویربرداری (ب):

استقرار دوربین با زاویه نسبت به سطح تصویربرداری [۱]

این خطا از آنجا ناشی می شود که در تصویر گرفته شده از توده خرد شده، کاربر قادر است تنها سطح آن را مشاهده کند. اگر جدایش اتفاق افتاده باشد، به عنوان مثال ذرات دانه ریز پشت ذرات درشت تر قرار گیرند، پردازش تصویر نتایج مناسبی ندارد. خطاهای وابسته به فرآیند تصویربرداری ناشی از تصویربرداری نادرست، ضعیف و غیرحرفه ای است و با تصحیح پارامترهای مربوطه از قبیل نورپردازی و کنتراست تا حد زیادی برطرف می شود [۱۷].

از مهم ترین این خطاها می توان خطای انتخاب محدوده تصویربرداری (عدم رعایت گستره ابعادی قطعات)، نوع دوربین مورد استفاده، شدت نور محیط، لرزش تصویر و زاویه تصویربرداری نسبت به سطح نمونه (اعوجاج) اشاره کرد [۱].



شکل ۲- اثر جدانشینی و گروه بندی برای کره هایی با اندازه های متفاوت [۲]

یک مدل رنگ، مدلی ریاضی است که هر رنگ را بر اساس مختصاتش در سه بعد یا سه محور در این فضا تعریف می‌کند. در حالت کلی دو نوع سیستم رنگ وجود دارد [۱۶، ۱۵]:

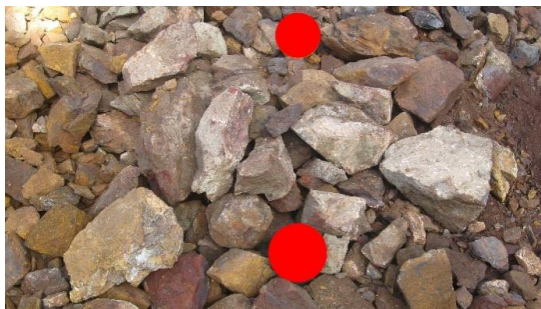


شکل ۴- مراحل پیش‌پردازش و رفع خطای اعوجاج تصویر دیجیتال قطعات سنگ خرد شده

الف- سیستم رنگ افزایشی^{۱۶}

این سیستم مربوط به رنگ منابع نوری است. در فرآیند رنگ‌های افزایشی، معمولاً از رنگ‌های قرمز، سبز و آبی (RGB) برای تولید سایر رنگ‌ها استفاده می‌شود.

ترکیب هر سه رنگ اصلی با شدت یکسان، سفید را ایجاد می‌کند. به طوری که رنگ سفید از ترکیب تمام رنگ‌ها تولید می‌شود و رنگ سیاه هیچ یک از رنگ‌های اصلی را ندارد [۱۶، ۱۵].



شکل ۵- نمونه‌ای از تصویر قطعات سنگ خرد شده و نشانگرها

ب- سیستم رنگ کاهشی^{۱۷}

ترکیب رنگ‌دانه‌ها یا رنگ‌های غیر نوری را سیستم رنگ کاهشی می‌گویند. اساس سیستم کاهشی را رنگ‌های فیروزه‌ای، بنفش و زرد (CMY^{۱۸}) تشکیل می‌دهد. ترکیب هر سه رنگ با شدت یکسان، سیاه را ایجاد می‌کند، به طوری که رنگ سیاه از ترکیب تمام رنگ‌ها تولید می‌شود و رنگ سفید هیچ یک از رنگ‌های اصلی را ندارد. ترکیب رنگی سیستم‌های رنگی افزایشی و کاهشی در شکل ۶ نشان داده شده است [۱۶، ۱۵].

۲-۴- کاهش خطای اعوجاج تصاویر دیجیتال گرفته شده از توده سنگ خرد شده حاصل از انفجار

روش مورد نظر در این تحقیق به این صورت است که ابتدا دوشی هم‌شکل و هم‌اندازه (مانند توپ) را به عنوان مقیاس بر روی توده خرد شده و در مکان‌های مناسبی قرار می‌دهند و تصویربرداری انجام می‌شود، سپس یک مرحله پیش‌پردازش انجام شده و دوشی مقیاس، استخراج، جداسازی و قطر و مساحت آن‌ها محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از یک تبدیل هندسی اقدام به کاهش و یا رفع خطای اعوجاج می‌شود (شکل ۴). در ادامه، گام‌های این روند به ترتیب تشریح می‌شوند.

۲-۴-۱- استخراج نشانگرها و تعیین اندازه آن‌ها

برای رفع خطای اعوجاج، نرمال‌سازی تصاویر و تعیین اندازه قطعات سنگ خرد شده، نیاز به وجود دو نشانگر با اندازه یکسان و ترجیحاً با رنگ‌هایی که در محیط HSV^{۱۰} اشباع‌اند (مانند قرمز و نارنجی) در تصویر است. در این تحقیق از دو توپ فوتبال با اندازه یکسان و قطر ۲۰ سانتی‌متر استفاده شده است. در این مرحله نشانگرها از تصویر استخراج شده و سپس نسبت اندازه آن‌ها به اندازه واقعی تعیین و کل تصویر با توجه به اندازه نشانگر و نسبت به دست آمده (پس از اصلاح خطای زاویه تصویربرداری) نرمالیزه می‌شود.

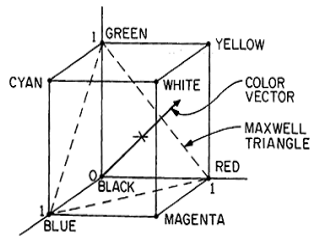
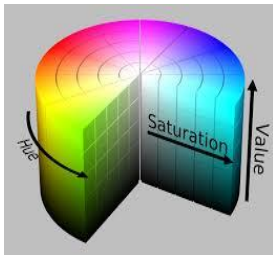
نمونه‌ای از تصویر قطعات سنگ خرد شده و نشانگرها در شکل ۵ نشان داده شده است. روند استخراج این نشانگرها در تصویر، طبق مراحل زیر است:

- ۱- تبدیل تصویر از فضای RGB^{۱۱} به فضای HSV
- ۲- استخراج مولفه S (اشباع) تصویر
- ۳- تبدیل تصویر به حالت دودویی (باینری)
- ۴- اعمال عملگر ریخت‌شناسی باز کردن روی تصویر حاصل از مرحله قبلی
- ۵- محاسبه مساحت نشانگرهای استخراج شده هر یک از این مراحل در ادامه توضیح داده می‌شود.

۲-۴-۱-۱- تبدیل تصویر از فضای RGB به فضای HSV

فضای رنگ^{۱۲} روشی است که با آن می‌توان رنگ‌ها را مشخص، ایجاد و تجسم کرد. انسان رنگ‌ها را بر اساس سه متغیر روشنایی^{۱۳}، رنگ مایه^{۱۴} و اشباع^{۱۵} تشخیص می‌دهد که بر این مبنا می‌توان مدلی ریاضی برای رنگ ایجاد کرد. برای چنین مدلی که سه متغیر دارد به فضایی با سه بعد نیاز است.

یک و سایر پیکسل‌ها تبدیل به صفر می‌شوند. به این ترتیب تمامی پیکسل‌های تصویر فقط دو حالت صفر و یک را دارند [۱۶، ۱۵].



ب

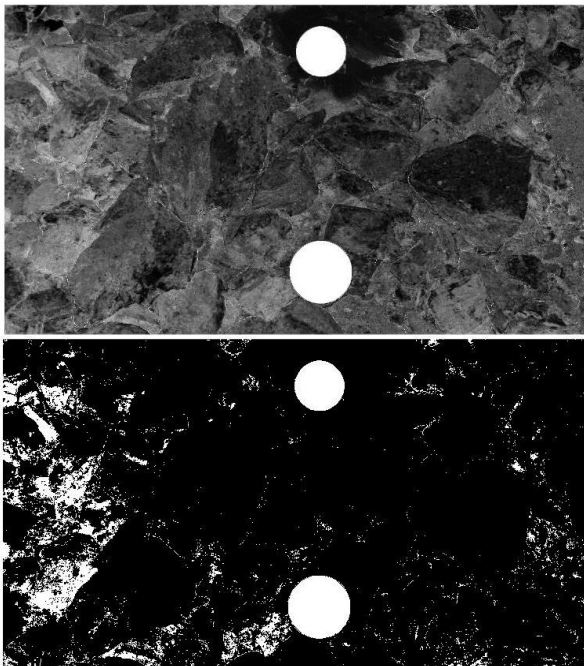
الف

شکل ۷- فضای رنگ الف: RGB ب: HSV [۱۶]

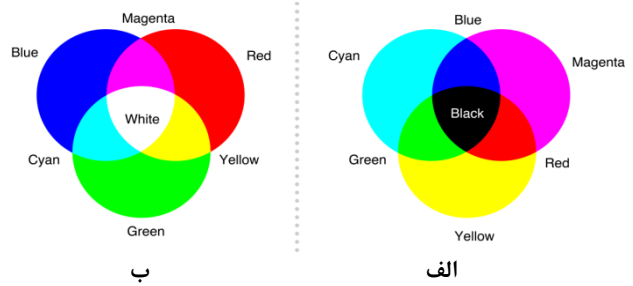
شکل ۸- ب تبدیل تصویر شکل الف به حالت دودویی با حد آستانه ۰٫۵ (حد آستانه خودکار) را نشان می‌دهد. برای تعیین حد آستانه می‌توان از روش‌هایی همچون آستانه‌یابی اوتسو^{۲۲} نیز استفاده کرد که در این مورد، تصویر نتیجه مناسبی نداشت.

۲-۴-۱-۳- اعمال عملگرهای مجموعه‌ای ریخت‌شناسی^{۲۳}

یکی از مهم‌ترین مراحل در پیش‌پردازش تصویر، پردازش ریخت‌شناسی است. در این بخش تنها به بررسی ریخت‌شناسی برای تصاویر دودویی پرداخته می‌شود. ریخت‌شناسی عموماً از عملگرهای مجموعه‌ای استفاده می‌کند و از آن بیشتر برای استخراج نقاط کلیدی تصویر، حذف نقاط غیر مفید تصویر و موارد مشابه دیگر استفاده می‌شود.



شکل ۸- الف (شکل بالا): مولفه اشباع از فضای رنگ HSV ب (شکل پایین): تبدیل تصویر الف به حالت دودویی



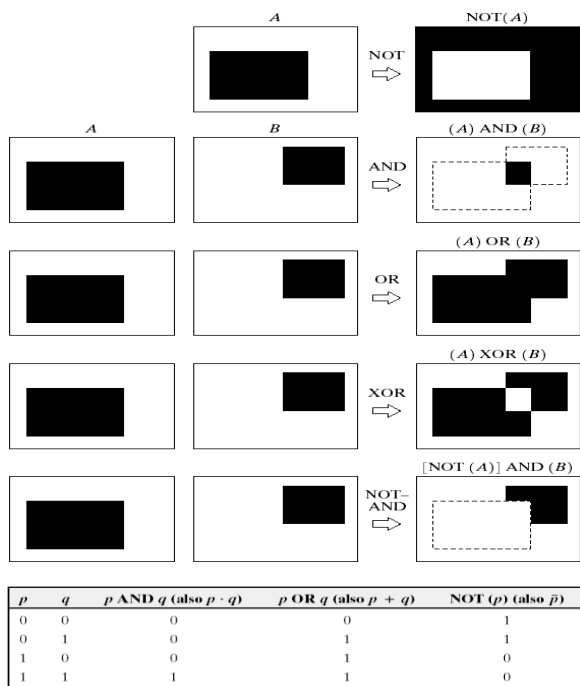
شکل ۶- ترکیب سیستم‌ای رنگی الف: کاهش، ب: افزایش [۱۶]

مدل رنگ RGB یک مدل با سیستم افزایشی است که در صفحات نمایش الکترونیکی، مانیتورها و گوشی‌های هوشمند استفاده می‌شود. در RGB رنگ‌ها با ترکیب کردن نورهای آبی، سبز و قرمز ایجاد می‌شوند. این مدل به شکل مکعبی تجسم می‌گیرد که راسی که بر نقطه صفر قرار دارد، مکان رنگ سیاه و راس مقابل سفید است (شکل ۷- الف). سه راس مکان رنگ‌های قرمز، سبز و آبی و سه راس باقیمانده، مکان ترکیب‌های دوتایی از این سه رنگ است. اگر هر محور از صفر تا ۲۵۵ درجه‌بندی شود، هر رنگ در این مکعب، نقطه‌ای است که با مختصاتش نسبت به سه محور تعریف می‌شود [۱۶، ۱۵].

فضای رنگ HSV یک مدل رنگ با سیستم کاهشی است. این فضای رنگ شبیه‌ترین فضا به سیستم بینایی انسان است و در پردازش تصویر نیز کاربردهای بسیاری دارد. در این فضاها «شدت نوری که از فیلتر چشم می‌گذرد»^{۱۹}، از رنگ جدا می‌شود. در این فضای رنگ، رنگ مایه توصیف‌کننده رنگ خالص است که رنگ را بر اساس درجه در دایره رنگ مشخص می‌کند. اشباع نشان می‌دهد که یک رنگ خالص تا چه اندازه رقیق یا غلیظ است و مقدار^{۲۰} نیز شدت روشنایی را مشخص می‌کند. این مدل به شکل استوانه‌ای است که از پایین به بالا، روشنایی را و از داخل به بیرون، شدت رنگ را نشان می‌دهد، چرخش به دور آن نیز، نمایش رنگ مایه است. فضای HSV دارای خاصیت یکنواختی ادراکی است، به همین دلیل از آن در سیستم‌های بازیابی تصویر به طور معمول استفاده می‌شود. شکل ۷- ب فضای رنگ HSV را نشان می‌دهد. مولفه اشباع از فضای رنگ HSV مربوط به تصویر شکل ۵، در شکل ۸- الف آورده شده است [۱۶، ۱۵].

۲-۴-۱-۲- تبدیل تصویر از فضای HSV به حالت دودویی^{۲۱}

منظور از تصاویر دودویی، تصاویر با دو سطح روشنایی صفر یا یک است که در آن، صفر رنگ سیاه و یک رنگ سفید است. روند تبدیل تصاویر به حالت دودویی به این صورت است که ابتدا یک حد آستانه بین صفر و یک تعیین می‌شود. پیکسل‌هایی از تصویر که سطح روشنایی بیشتر از حد آستانه دارند، تبدیل به



شکل ۹- عملگرهای مجموعه‌ای پایه در ریخت‌شناسی (نواحی سیاه نشانه یک و نواحی سفید صفر) [۱۶]

ج- عملگر بستن و بازکردن دودویی

اعمال عملگر بستن بر روی تصویر دودویی، حفره‌های کوچک تصویر را پر می‌کند. بستن تصویر از ترکیب عملگر فرسایش و گسترش است (رابطه ۳) [۱۶، ۱۵، ۱۸].

$$A \bullet B = (A \oplus B) \oplus B \quad (3)$$

اعمال عملگر باز کردن بر روی تصویر دودویی موجب حذف اتصالات باریک تصویر می‌شود و تصویری آرام‌تر به دست می‌آید. بازکردن تصویر از ترکیب عملگر سایش و گسترش به صورت رابطه ۴ به دست می‌آید [۱۶، ۱۵].

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (4)$$

شکل و اندازه عنصر ساختاری نقش موثری در اعمال عملگرها دارد و می‌تواند نتایج را به صورت چشم‌گیری تغییر دهد [۳].

در این تحقیق روش‌های مختلف بررسی و در نهایت از عملگر بازکردن برای حذف نویزهای موجود در تصویر و اشیای اضافه کوچک‌تر از یک تعداد پیکسل معین (حد آستانه)، استفاده شده است. برای محاسبه حد آستانه تعداد پیکسل‌ها، ابتدا با استفاده از عملگرهای محاسبه ویژگی‌های نواحی (این عملگرها ویژگی‌هایی از قبیل مساحت و محیط را محاسبه می‌کنند)، مساحت اشیای موجود در تصویر را محاسبه می‌کنند و سپس انحراف معیار آن‌ها را به دست می‌آید. این حد آستانه را با سعی و خطا تا جایی می‌توان تنظیم کرد که تمامی اشیای کوچک‌تر

عملگرهای مجموعه‌ای پایه شامل عملگر اجتماع، اشتراک و تفاضل دو مجموعه است. برای مثال اگر هر تصویر دودویی یک مجموعه در نظر گرفته شود، اجتماع دو تصویر هم‌اندازه، تصویری است که در آن هر پیکسلی که در تصویر اول یا دوم مقدار یک داشته باشد، مقدار یک خواهد داشت [۱۶، ۱۵]. شکل ۹ عملگرهای مجموعه‌ای پایه در ریخت‌شناسی را نشان می‌دهد. در ادامه این بخش عملگرهای گسترش^{۲۴}، فرسایش^{۲۵}، بازکردن^{۲۶} و بستن^{۲۷} توضیح داده می‌شوند.

الف- عملگر گسترش دودویی

این عملگر باعث گسترش نقاط یک در تصویر می‌شود. در عملگر گسترش نیز از یک نقاب یا پنجره مانند تعریف «عمل فیلتر کردن»، استفاده می‌شود. در اینجا به جای نقاب به آن عنصر ساختاری^{۲۸} گفته می‌شود که مقادیر آن می‌تواند یک یا صفر باشد. گسترش تصویر A با عنصر ساختاری B به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود [۱۶، ۱۵].

$$A \oplus B = \{w \mid \text{reflection}(B) \cap A \neq \text{NULL}, w \in A\} \quad (1)$$

که در اینجا انعکاس^{۲۹}، عنصر ساختاری B را حول مرکز خود قرینه می‌کند. به عبارت دیگر گسترش A با عنصر ساختاری B بدین معنی است که در هر بار حرکت عنصر ساختاری B بر روی پیکسل‌های A، اشتراک عنصر ساختاری با محدوده زیر عنصر ساختاری در تصویر A تهی نباشد، مقدار پیکسل مرکزی که عنصر ساختاری بر روی آن قرار گرفته است، برابر یک است [۱۶، ۱۵].

ب- عملگر فرسایش دودویی

این عملگر باعث فرسایش نقاط یک در تصویر می‌شود. همانند گسترش، در فرسایش نیز از یک عنصر ساختاری استفاده می‌شود که مقادیر عنصر ساختمانی یک یا صفر می‌تواند باشد. به ازای هر پیکسل، مرکز عنصر ساختاری روی پیکسل قرار می‌گیرد و عملگر سایش با توجه به مقادیر عنصر ساختاری در مورد آن پیکسل اعمال می‌شود. فرسایش تصویر A با عنصر ساختاری B مطابق رابطه ۲ است [۱۶، ۱۵].

$$A \ominus B = \{w \mid (B) \subseteq A, w \in A\} \quad (2)$$

به عبارت دیگر فرسایش A با عنصر ساختاری B بدین معنی است که اگر عنصر ساختاری B بر روی پیکسل‌های A حرکت داده شده و در هر بار حرکت همه نقاطی که در زیر مقادیر یک از عنصر ساختاری قرار گرفته‌اند نیز مقدار یک داشته باشند، مقدار پیکسل حاصل نیز یک خواهد بود.

شده، از تبدیل پراجکتیو دو بعدی استفاده شده است. با این تبدیل، خطوط موازی دیگر موازی باقی نمانده، اما خطوط مستقیم حفظ شده و دچار اعوجاج نمی‌شوند [۲۱ و ۸]. با اعمال این تبدیل هندسی، هر ردیف از U به ردیف متناظر آن در X نگاشت می‌شود. بردارهای U و X به صورت 4×2 عضوی است و مختصات گوشه‌های چهار ضلعی اولیه و اصلاح شده را تعریف می‌کند [۲۱].

برای افزایش دقت اصلاح این خطا، بهتر است نشانگرها کاملاً هم‌شکل و هم‌اندازه و در یک راستا (راستای خط دید دوربین) باشند. فرآیند اصلاح خطای زاویه تصویربرداری مطابق تبدیل هندسی شکل ۱۱ است. هرچه دقت استخراج نشانگرها و تعیین اندازه آن‌ها در مرحله قبلی بیشتر باشد، رفع خطا بهتر انجام می‌شود. در شکل ۱۲ پارامترهای تبدیل هندسی و در شکل ۱۳ تصویر شکل ۵ را پس از رفع خطای زاویه تصویربرداری (اعوجاج) نشان داده شده است.

علاوه بر این روش‌ها، یکی دیگر از راه‌های موثر برای کاهش اعوجاج، استفاده از لنز تله‌فتو^{۳۳} است [۵ و ۱۹]. ویژگی بارز این لنزها فاصله کانونی بسیار بلند آن‌ها است، به گونه‌ای که مرکز اپتیکی آن‌ها خارج از ساختار فیزیکی لنز واقع شده است [۲۲]. این لنزها قابلیت عکس‌برداری از نمونه در فاصله دور را دارند، در تصاویر عکس‌برداری شده به وسیله دوربین‌های مجهز به لنزهای تله‌فتو فاصله اجسام فشرده‌تر به نظر می‌آید، بنابراین اعوجاج ناشی از پدیده اعوجاج در این لنزها کاهش یافته و در مرحله پردازش تصویر نیز الگوریتم پردازش دچار خطای کمتری می‌شود [۱۷، ۱۳].

۲-۵- تشکیل پایگاه داده تصاویر

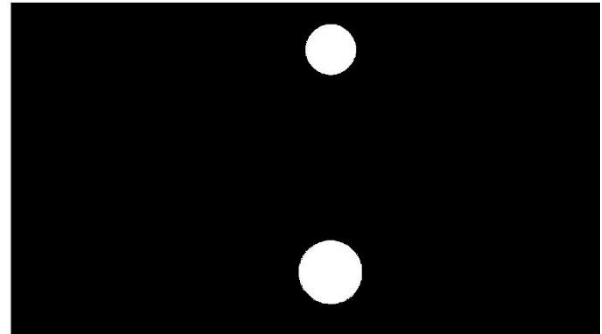
برای تشکیل پایگاه داده تصاویر، تعداد ۲۴۰ تصویر قطعات سنگ خرد شده حاصل از انفجارهای متعدد و در زمان‌های مختلف در معدن سنگ آهن گل‌گهر که نوع سنگ آن‌ها و تعداد تصاویر مربوط به هر نوع سنگ در ۳-نتایج و بحث

در این تحقیق مراحل مختلف روش پیشنهادی، بر روی تصاویر پایگاه داده انجام شد و نسبت مساحت نشانگرها در حالت قبل و بعد از رفع اعوجاج به دست آمد، سپس برای بررسی دقت روش پیشنهادی، از معیار ارزیابی میانگین خطای نسبی^{۳۴} مطابق رابطه ۵ استفاده شده است [۲۳].

$$MRE = \left(\frac{100}{n} \right) \sum_{t=1}^n \left(\frac{A_t - F_t}{A_t} \right) \quad (5)$$

که در آن:

از عملگر کوچک حذف شود. اندازه نشانگرها یکسان است، اما ممکن است به علت خطای زاویه تصویربرداری، اندازه آن‌ها متفاوت از هم به نظر برسد. نتیجه اعمال عملگر باز کردن بر روی تصویر شکل ۸: ب در شکل ۱۰ نشان داده شده است. حد آستانه مناسب برای حذف اشیای کوچک‌تر از نشانگر کوچک، ۴۳ برابر انحراف معیار تصویر بوده است که در تصاویر مختلف این حد آستانه متفاوت است.



شکل ۱۰- تصویر حاصل از اعمال عملگر باز کردن بر روی تصویر شکل

۸- ب

۲-۴-۱-۴- محاسبه مساحت و قطر نشانگرهای استخراج شده

در مرحله قبل دو نشانگر موجود در تصویر شناسایی شده و

باقی تصویر فاقد هر گونه شی است. در این مرحله مجدداً با استفاده از عملگرهای محاسبه ویژگی‌های نواحی، مساحت نشانگرهای موجود در تصویر محاسبه شده و با توجه به اینکه نشانگرها توپ کروی بوده و در تصویر دوبعدی به شکل دایره‌ای اند، قطر آن‌ها محاسبه می‌شود. در صورت وجود خطای زاویه تصویربرداری، دو قطر مختلف به دست آمده و لازم است در مرحله بعد به رفع این خطا پرداخت.

۲-۴-۲- اعمال تبدیل هندسی اعوجاج روی تصویر

با توجه به اینکه زاویه تصویربرداری تصاویری که گرفته می‌شود، در خیلی از موارد به علت محدودیت‌هایی که در بخش قبل اشاره شد عمود بر سطح توده سنگ نیست و موجب ایجاد خطای اعوجاج می‌شود، بنابراین ضروری است یک مرحله اصلاح زاویه تصویربرداری (رفع خطای اعوجاج) انجام شود.

در حالت کلی برای رفع این نوع خطاها تبدیل‌های هندسی مختلفی وجود دارد که هر یک کاربرد خاصی دارد. از جمله انواع این تبدیل‌ها می‌توان به تبدیل‌های انتقالی، اقلیدسی، همسان یا ایزوتروپیک، آفین^{۳۰}، پرسپکتیو^{۳۱} و پراجکتیو^{۳۳} اشاره کرد [۸، ۱۹، ۲۰]. در این تحقیق با توجه به ویژگی‌های هر یک از این تبدیل‌های هندسی و تناسب آن‌ها با تصاویر توده سنگ خرد

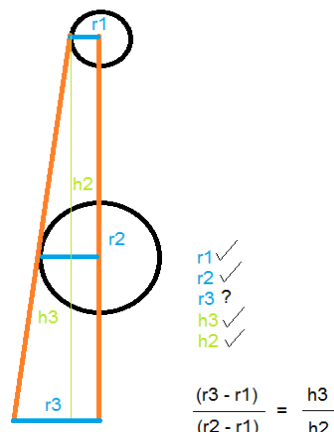
n تعداد تصاویر

At اندازه شی مقیاس در حالت واقعی

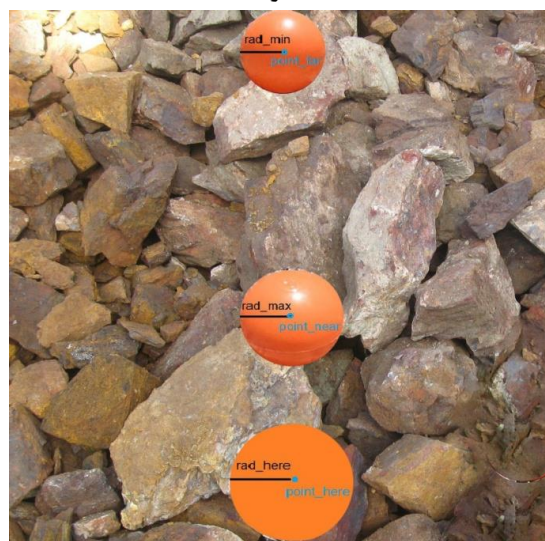
Ft اندازه شی مقیاس پس از اصلاح اعوجاج

جدول ۱ آمده است، گردآوری شده و مراحل پیش گفته بر روی آن‌ها اعمال شد.

در جدول ۲ نیز پارامترهای آماری پایگاه داده تصاویر قطعات سنگ خرد شده ناشی از انفجار آمده است.



شکل ۱۱- تبدیل هندسی برای رفع خطای اعوجاج تصویر توده سنگ خرد شده



شکل ۱۲- پارامترهای تبدیل هندسی رفع خطای اعوجاج بر روی یک نمونه تصویر توده سنگ خرد شده



شکل ۱۳- تصویر شکل ۵ پس از رفع خطای زاویه تصویربرداری

۳- نتایج و بحث

در این تحقیق مراحل مختلف روش پیشنهادی، بر روی تصاویر پایگاه داده انجام شد و نسبت مساحت نشانگرها در حالت قبل و بعد از رفع اعوجاج به دست آمد، سپس برای بررسی دقت روش پیشنهادی، از معیار ارزیابی میانگین خطای نسبی^{۳۴} مطابق رابطه ۵ استفاده شده است [۲۳].

$$MRE = \left(\frac{100}{n} \right) \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i - F_i}{A_i} \right) \quad (5)$$

که در آن:

n تعداد تصاویر

At اندازه شی مقیاس در حالت واقعی

Ft اندازه شی مقیاس پس از اصلاح اعوجاج

جدول ۱- نوع قطعات سنگ خرد شده و تعداد تصاویر مربوطه

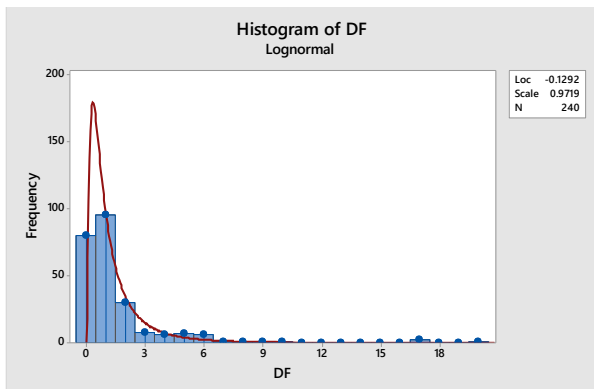
نوع سنگ	تعداد تصاویر مربوطه
هماتیت	۷۵
هماتیت و مگنتیت	۱۰
مگنتیت	۶۵
آمفیبول	۱۰
کوارتز شیست	۵۰
گنایس	۲۰
شن و ماسه	۱۰

جدول ۲- پارامترهای آماری پایگاه داده تصاویر قطعات سنگ خرد شده ناشی از انفجار

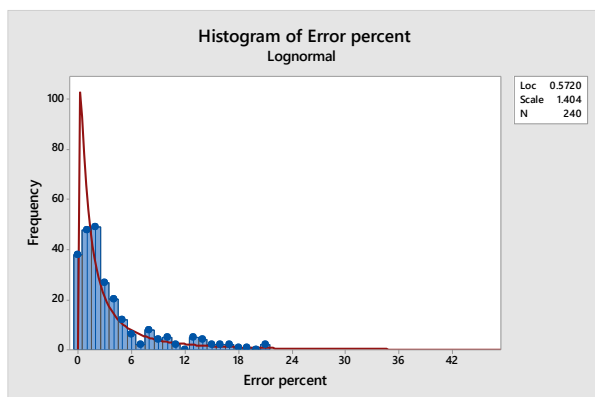
درصد عبور	حداقل (اینچ)	حداکثر (اینچ)	میانگین (اینچ)	واریانس (اینچ)	میان (اینچ)
F10	۰.۰۱	۱۹.۷	۲	۷.۱	۱.۲
F20	۰.۰۱	۳۲.۳	۴.۲	۲۶.۶	۲.۳
F30	۰.۰۱	۵۸.۱	۶.۱	۵۳.۸	۳.۷
F40	۰.۰۲	۶۵.۶	۸	۷۶.۶	۵.۳
F50	۰.۰۲	۷۱.۷	۹.۸	۱۰۱.۱	۷
F60	۰.۰۳	۷۷.۲	۱۱.۷	۱۳۱.۱	۸.۷
F70	۰.۲	۸۲.۴	۱۳.۶	۱۶۴.۷	۱۰.۳
F80	۰.۹	۸۷.۷	۱۵.۹	۲۰۶.۳	۱۱.۸
F90	۲.۵	۹۳	۱۸.۹	۲۶۱.۸	۱۴.۲
F100	۵.۱	۱۰۳.۶	۲۴.۵	۳۵۰.۶	۱۹.۱

نتایج حاصل بیانگر میانگین دقت ۹۷ درصد و انحراف معیار ۴.۵ درصد در هم‌اندازه کردن اندازه نشانگرها و رفع خطای اعوجاج

خطای اعوجاج را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میانگین خطای تخمین توزیع دانه‌بندی، پس از رفع خطای اعوجاج، بسته به مقدار خطای اعوجاج، از ۵ تا ۲۵ درصد کاهش یافته است.



شکل ۱۴- فراوانی وقوع DF در حالت توزیع لاگ‌نرمال داده‌ها



شکل ۱۵- فراوانی وقوع خطای اعوجاج در حالت توزیع لاگ‌نرمال

تصاویر است، همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که برای به دست آوردن نتایج بهتر، باید به نکات زیر توجه کرد:

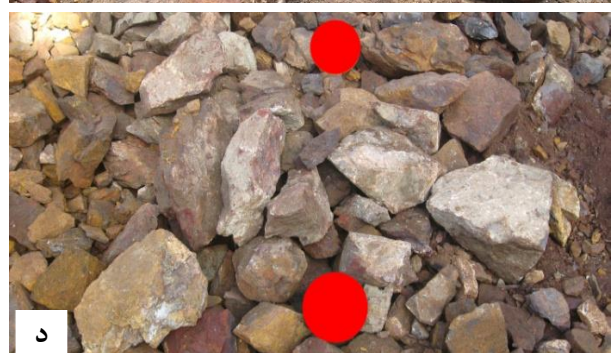
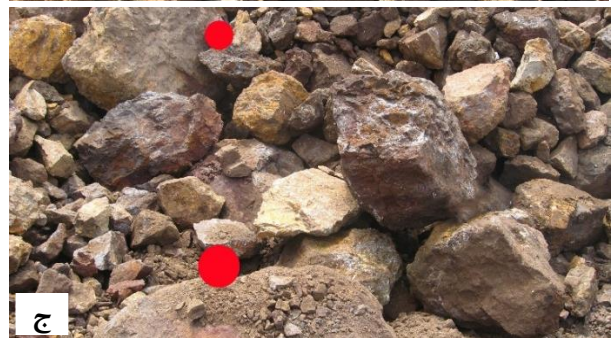
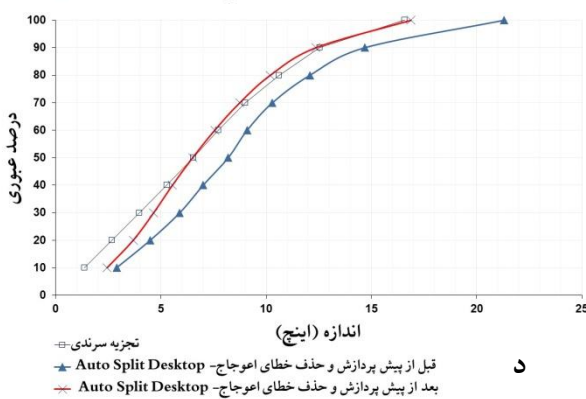
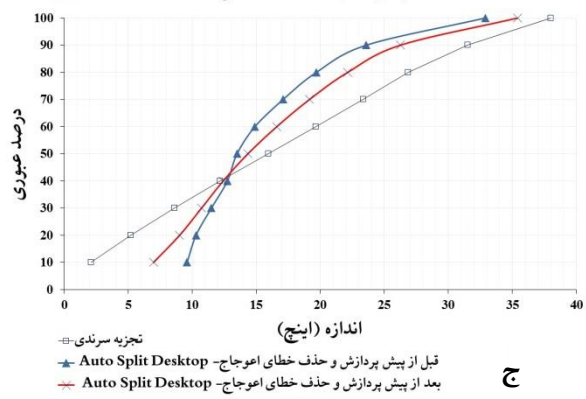
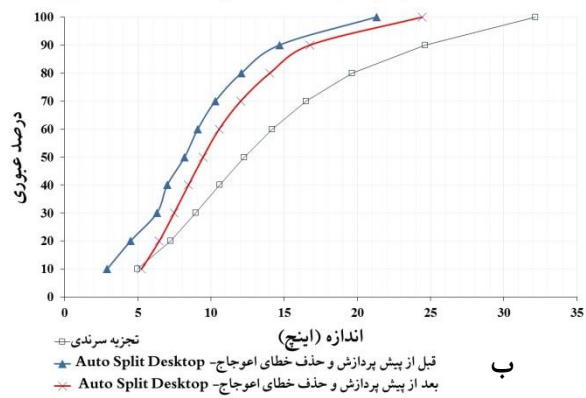
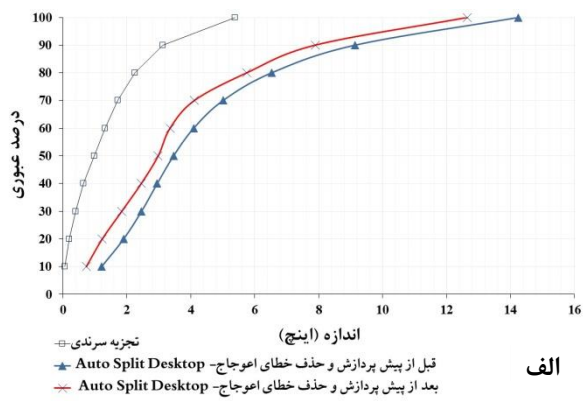
۱- برای تفکیک و استخراج مناسب‌تر دو شی مقیاس در تصویر، بهتر است دو شی مقیاس هم‌رنگ و تکرنگ بوده و همچنین در محیط HSV قابل تفکیک باشد. به عنوان مثال رنگ‌های اشباع و غلیظ از قبیل قرمز، زرد، نارنجی، بنفش و آبی مناسب‌اند.

۲- نتایج نشان می‌دهد در صورتی که دو شی مقیاس به گونه ای از یکدیگر و همچنین از دوربین فاصله داشته باشند که نسبت قطر محاسبه شده آن‌ها به همدیگر، کمتر از ۰/۵۳ باشد، دقت رفع خطای اعوجاج به طور میانگین ۱۳ درصد نسبت به حالت اول کاهش می‌یابد.

۳- با توجه به اینکه در کارهای معدنی به دلیل شرایط خاص کاری نمی‌توان فاصله بین دوربین و سطح توده را به صورت دقیق اندازه‌گیری کرد، بنابراین فاکتور فاصله به جای فاصله به کار گرفته شد. طبق تعریف فاکتور فاصله^{۳۵} (DF) برابر با نسبت اندازه واقعی شی مقیاس به اندازه آن در تصویر است. به طور کلی فواصل خیلی دور یا نزدیک نتایج مطلوبی را در بر ندارد، با توجه به نتایج حاصل، هرگاه فاکتور فاصله بین ۰/۸ تا ۱/۵ قرار گیرد، نتایج به دست آمده قابلیت اطمینان بیشتری دارند. همان‌گونه که نمودارهای شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نیز نشان می‌دهند، فراوانی وقوع DF در حالت توزیع لاگ‌نرمال داده‌ها، در بازه ۰/۵ تا ۱/۵ با میانگین ۱/۴۸ دارای فراوانی وقوع خطای با میانگین ۳ درصد است. باید توجه داشت تنها عامل اثرگذار فاکتور فاصله نیست و در موارد مختلف باید ابعاد ذرات نیز مورد توجه قرار گیرد تا با در نظر گرفتن این ابعاد، فاصله بهینه دوربین تا سطح نمونه به دست آید.

به همین دلیل با کوچک‌تر شدن ابعاد ذرات، هنگامی می‌توان به فاصله بهینه دست یافت که فاکتور فاصله کاهش یابد (حدود ۰/۲ تا ۰/۴). با کاهش فاکتور فاصله قطعات دانه‌ریز بیشتری در تصاویر مشخص می‌شوند.

۴- همچنین مقایسه منحنی دانه‌بندی سرندی ۱۰ نمونه توده سنگ خرد شده، با منحنی دانه‌بندی حاصل از تصویر گرفته شده از آن قبل و پس از رفع خطای اعوجاج به عمل آمد که به عنوان نمونه، شکل ۱۶ چهار مورد از تصاویر توده سنگ خرد شده حاصل از انفجار و شکل ۱۷ مقایسه منحنی توزیع دانه‌بندی هر یک از این تصاویر را در سه حالت توزیع سرندی، توزیع به دست آمده از حالت خودکار نرم‌افزار Split Desktop قبل و پس از رفع



شکل ۱۶- نمونه تصاویر توده سنگ خرد شده

شکل ۱۷- منحنی توزیع دانه بندی توده سنگ خرد شده تصاویر شکل ۱۶، در حالت سرندي و خودکار نرم افزار Split-Desktop قبل و بعد از رفع خطای اعوجاج

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق روشی برای کاهش خطاهای زاویه تصویربرداری نامناسب (اعوجاج) پیشنهاد شد. نتایج به دست آمده بیانگر میانگین دقت ۹۷ درصد در رفع خطای اعوجاج تصاویر است. همچنین بررسی‌ها نشان دادند که میانگین خطای تخمین توزیع دانه‌بندی قطعات سنگ خرد شده، پس از رفع خطای اعوجاج، بسته به مقدار خطای اعوجاج، از ۵ در تا ۲۵ درصد کاهش یافته است.

منابع و مراجع

- [۸] کیومرثی، احسان؛ ۱۳۹۱؛ «رفع اعوجاج هندسی، اعوجاج و کجی تصاویر متن دوربینی فارسی»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.
- [۹] طلوع، محمد امین؛ ۱۳۹۳؛ «رفع اعوجاج‌های فتومتریک و هندسی در تصاویر به کمک اطلاعات روشنایی پس زمینه و اطلاعات هندسی خطوط متن حروف»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.
- [۱۰] اسماعیل زاده، مجید؛ امینی، جلال؛ ۱۳۹۵؛ «کالیبراسیون هندسی تصاویر SAR به منظور حذف خطاهای ناشی از توپوگرافی سطح زمین»، نشریه علمی-پژوهشی علوم و فنون نقشه برداری، دوره پنجم، شماره ۴.
- [11] Reis, B. F., Teixeira, J. M., Teichrieb, V., Kelner, J.; 2008; "Perspective correction implementation for embedded (marker-based) augmented reality", In Proceedings of Workshop of Virtual and Augmented Reality, Federal University of Pernambuco, Computer Center, Research Group on Virtual Reality and Multimedia.
- [12] Baumann, R., Blackwell C., Seales, W.B.; 2012; "Automatic Perspective Correction of Manuscript Images", In: Chen HH. Chowdhury G. (Eds) The Outreach of Digital Libraries: A Globalized Resource Network, ICADL, Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, Heidelberg vol 7634.
- [13] Valente, J., Soatto, S.; 2015; "Perspective Distortion Modeling, Learning and Compensation", Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), IEEE, pp 9-16.
- [14] Konov, S. G., Markov, B. N.; 2016; "Algorithm of correction of error caused by perspective distortions of measuring mark images", Mechanics & Industry, vol 17, pp 713.
- [15] Gonzalez W.; 2004; "Digital Image Processing Using MATLAB", Pearson Prentice Hall, pp 334 - 426.
- [۱۶] گنزالس، رافائل؛ ۱۳۸۷؛ "پردازش تصاویر دیجیتال (چاپ دوم)", ترجمه: عین‌الله جعفرنژاد قمی، انتشارات علوم رایانه.
- [۱] اقتصادی، محسن؛ ۱۳۹۰؛ «تخمین خطاهای پردازش تصویری برای تعیین توزیع ابعاد سنگ خرد شده پس از انفجار با استفاده از رگرسیون غیرخطی و منطق فازی»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.
- [۲] جهانی، مصطفی؛ ۱۳۹۲؛ «پیش بینی خردایش با روش‌های تجربی و توسعه یک مدل مناسب برای معدن آهن شماره ۱ گل گهر»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.
- [3] Thurley M., Andersson T.; 2008; "An industrial 3D vision system for size measurement of iron ore green pellets using morphological image segmentation", Minerals Engineering, vol 21, pp 405-415.
- [4] Thurley, M.; 2013; "Automated image segmentation and analysis of rock piles in an open-pit mine", International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA), pp 1-8.
- [5] Maerz, N. H., Zhou, W.; 1998; "Optical digital fragmentation measuring systems - inherent sources of error", FRAGBLAST, the International Journal for Blasting and Fragmentation, Vol 2, No 4, pp 415-431.
- [6] Wang, D., M. Doddrell, D.; 2005; "Geometric Distortion in Structural Magnetic Resonance Imaging", Current Medical Imaging Reviews, vol 1, pp 49-60.
- [۷] گل پرداز، مریم؛ ۱۳۸۹؛ «پیش پردازش تصاویر متون فارسی دوربینی برای کاربردهای بازشناسی حروف»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.

13-Brightness
 14-Hue
 15-Saturation
 16-Additive
 17-Subtractive
 18-Cyan, Magenta, Yellow
 19-Luminance
 20-Value
 21-Binary
 22-Otsu
 23-Morphology
 24-Dilation
 25-Erosion
 26-Opening
 27-Closing
 28-Structural element
 29-Reflection
 30-Affine
 31-Perspective
 32-Projective
 33-Telephoto
 34-Mean Relative Error (MRE)
 35-Distance Factor

[17] Maerz, N. H.; 1996b; "Image sampling techniques and requirements for automated image analysis of rock fragmentation", Proceedings of the Fragblast 5, Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Montreal, Quebec, Canada, vol 23-24, pp 115-120.

[18] Scott N.; 2007; "Edge Detection using Mathematical Morphology", Research Centre for Integrated Microsystems, University of Windsor.

[19] Liu J.L., Feng D. Z.; 2014; "Two-dimensional multi-pixel anisotropic Gaussian filter for edge-line segment (ELS) detection", Image and Vision Computing, vol 32, pp 37-53.

[۲۰] عبداللهی شریف، مرتضی؛ عبداللهی شریف، جعفر؛ علیپور، عارف؛ ۱۳۸۹؛ "بررسی خطای ناشی از ویژگی‌های تصویر و پردازش دیجیتال در حوزه پردازش تصویری سنگ ناشی از انفجار"، اولین کنفرانس مهندسی انفجار و جایگاه آن در سازندگی کشور.

[21] "MATLAB and Statistics Toolbox Release 2014a", the MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.

[۲۲] عباسی، اسماعیل؛ ۱۳۸۵؛ "فرهنگ عکاسی (چاپ چهارم)"، تهران، انتشارات سروش.

[23] Tofallis, C.; 2015; "A Better Measure of Relative Prediction Accuracy for Model Selection and Model Estimation", Journal of the Operational Research Society, vol 66, pp 1352-1362.

[24] "MATLAB and Statistics Toolbox Release 2014a", the MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.

پی‌نوشت‌ها

1-Maerz
 2-Wang
 3-Thurley
 4-Bernardo
 5-Baumann
 6-Homography
 7-Valente
 8-Konov
 9-Segregation
 10-Hue, Saturate, Value
 11-Red, Green, Blue
 12-Color space