

تعیین توزیع دانه بندی سنگ دانه های بتن و آسفالت با استفاده از استخراج ویژگی فیلترهای گابور و شبکه های عصبی

هادی یعقوبی

دانشجوی دکتری مهندسی استخراج معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

حمید منصوری*

دانشیار بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

محمد علی ابراهیمی فرسنگی

دانشیار بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

حسین نظام آبادی پور

استاد بخش مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

چکیده

توزیع ابعادی سنگ دانه های تشکیل دهنده بتن و آسفالت، از مهم ترین پارامترها در کنترل طرح های اختلاط بتن و آسفالت است که می تواند بر کیفیت نهایی، مقاومت و دوام بتن و آسفالت تاثیر گذار باشد. به منظور ارزیابی درصد اختلاط سنگ دانه ها، روش پردازش تصویری دیجیتال یک روش غیر مستقیم، سریع و قابل اعتماد است. در این تحقیق بر پایه یکی از روش های استخراج ویژگی های دیداری تصویر (فیلترهای گابور) و استفاده از شبکه های عصبی، الگوریتمی جهت تعیین توزیع دانه بندی تصاویر سنگ دانه های تشکیل دهنده بتن و آسفالت ارائه شده است. تعداد ۱۰۰ تصویر از سنگ دانه های تشکیل دهنده بتن و آسفالت برای آموزش شبکه عصبی به کار برده شد. سپس نتایج حاصله با نتایج تخمین خودکار دانه بندی سنگ دانه ها در نرم افزار Split-Desktop و همچنین تجزیه سرنندی مقایسه شد. نتایج به دست آمده بیان گر یک بهبود کلی در ارزیابی توزیع اندازه سنگ دانه های تشکیل دهنده بتن و آسفالت و کاهش خطای ۶۷٪ با استفاده از روش پیشنهادی نسبت به تخمین خودکار نرم افزار Split-Desktop است. همچنین در ارزیابی اندازه های $F_{1.0}$ تا $F_{1.0}$ ، روش پیشنهادی بهبود ۶۳٪ را نشان داد.

واژه های کلیدی: توزیع دانه بندی، سنگ دانه های بتن و آسفالت، استخراج ویژگی تصویر، فیلترهای گابور، شبکه های عصبی.

* نویسنده مسئول: hmansouri@uk.ac.ir

۱- مقدمه

روش به عنوان یک روش غیرمستقیم در تعیین دانه بندی، نسبت به دیگر روش ها به تجزیه سرنندی نزدیک تر است [۳]. در این روش پس از خردایش، تصاویری از سطح سنگ دانه های تولید شده گرفته شده و به صورت دستی یا با استفاده از رایانه، توزیع خردشدگی سنگ تعیین می شود. مزیت اصلی پردازش تصویر این است که می تواند در یک طیف گسترده و بدون تاثیر بر چرخه تولید مورد استفاده قرار گرفته و این امر آن را تنها ابزار عملی جهت ارزیابی خردایش در معادن و کارخانه های تولید مصالح دانه بندی قرار داده است [۱ و ۳].

پردازش تصویر به عنوان علمی برای تعیین خردایش توده سنگ خرد شده ناشی از انفجار، از سال ۱۹۸۷ توسط میرزا^۷ توسعه داده شده است [۵]. در سال ۱۹۹۳، لین^۲ و مایلر^۳ از روش های لبه یابی برای تشخیص قطعات استفاده کردند [۶]. در سال ۱۹۹۴، لین، یین^۴ و مایلر و در سال ۱۹۹۶ نیز فرانکلین^۵ و همکاران روشی ارائه دادند که برگرفته از الگوریتم قطعه بندی آب پخشان است [۷ و ۸]. در سال ۱۹۹۷ نیز یک تحقیق توسط کریدا^۶ و جاگر^۷ انجام شد که روشی برای لبه یابی قطعات براساس سیستم بینایی انسان ارائه دادند [۹]. در سال های ۱۹۹۸، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۸، وانگ^۸ و همکاران مطالعاتی برای جدایش قطعات سنگی که با هم در تماس هستند، انجام دادند [۱۰-۱۲].

رویکردهای دیگر، استفاده از روش های بازشناسی الگو با استفاده از شبکه های عصبی است. یکی از مشکلات استفاده از شبکه عصبی در بازشناسی الگو، تعداد زیاد ورودی ها است [۱۳]. در سال ۱۹۸۶ نیز لورکنز^۹ [۱۴] و در سال ۱۹۹۳ پلانسکی^{۱۰} و همکاران [۱۵] با گرفتن تبدیل فوریه بسط^{۱۱} از تصویر دیجیتال به عنوان ورودی برای شبکه عصبی، تعداد ورودی ها را کاهش دادند. مساله تغییرناپذیری چرخشی توسط میانگین گیری حلقه های هم مرکز تبدیل های فوریه دوبعدی نیز در سال ۱۹۹۲ توسط باتلینگر^{۱۲} و همکاران مطرح شد. ضریب فوریه متوسط گیری شده به عنوان ورودی برای شبکه عصبی که برای بازشناسی توزیع اندازه قطعات

در فرآیند تولید بتن و آسفالت معمولاً بایستی شرایطی ایجاد شود تا هزینه های تولید به حداقل برسد. این امر نیازمند یک ارزیابی صحیح از پارامترهای مرتبط با فرآیند مذکور از جمله کیفیت مصالح، خردایش و فرآوری سنگ دانه، تهیه طرح اختلاط متناسب با عملیات عمرانی و کسب حداقل مشخصات فنی محصول تولید شده است. در این میان، خردایش تاثیر چشم گیری بر کیفیت محصول دارد. منظور از خردایش، توزیع اندازه قطعات یا دانه بندی سنگ خرد شده است. خردایش بهینه در کنترل فرآیندهای استخراج و فرآوری سنگ دانه تاثیر به سزایی داشته و بازدهی عملیات سنگ شکنی را نیز بهبود بخشیده و می تواند باعث صرفه جویی قابل توجهی در مصرف انرژی شود. از سوی دیگر در به حداقل رسانیدن هزینه های تولید بتن و اخذ مقاومت فشاری حداکثر نیز بسیار موثر است. از این رو به منظور کنترل موثرتر و بهینه سازی این فرآیند ضروری است که یک روش سریع و قابل اعتماد برای ارزیابی نتایج حاصل از خردایش استفاده شود. همچنین از دید طراحی، می توان طرح های خردایش مختلف را به سرعت مورد تجزیه و تحلیل قرار داد و طرح بهینه را انتخاب نمود [۱].

تحقیقات وسیعی در خصوص روش های تعیین توزیع خردایش مواد معدنی از جمله سنگ دانه های تشکیل دهنده بتن و آسفالت انجام شده است. از جمله این روش ها می توان به روش مستقیم سرنند کردن و روش های غیر مستقیم شمارش قطعات بزرگ [۲]، مصرف مواد منفجره در انفجار ثانویه [۲]، بازدهی ماشین آلات بارگیری [۲]، تاخیر ایجاد شده در اثر پل زدن در سنگ شکن [۲]، روش تحلیل دیداری [۲]، تجزیه و تحلیل عکاسی یا دستی [۲]، فوتوگرامتری و روش های عکاسی با سرعت بالا یا پردازش تصویری اشاره نمود [۱ و ۲].

یکی از روش های نوین و متداول در تعیین توزیع خردشدگی سنگ دانه، روش پردازش تصویر دیجیتال است [۳]. نتایج این

⁷Jager⁸Wang⁹Luerkens¹⁰Plansky¹¹Bessel¹²Bottlinger¹Maerz²Lin³Miller⁴Yen⁵Franklin⁶Crida

در سال ۲۰۰۸، مورتاق^{۱۰} و استارک^{۱۱} تا چهارمین سطح تبدیل‌های موجک را برای دسته‌بندی تصاویر توده سنگ استفاده نمودند [۲۲]. همچنین مطالعه‌ای برای طبقه‌بندی ماکروسکوپی بافت سنگ براساس یک مدل عصبی-فازی سلسله مراتبی در سال ۲۰۰۹ توسط گنکالوس^{۱۲} و همکاران ارائه شد [۲۳]. از طرف دیگر کاربرد پردازش تصویر نیز بر روی نمونه سنگ‌های بازالت توسط سینگ^{۱۳} و همکاران در سال ۲۰۱۰ ارائه شد [۲۴].

در سال ۲۰۱۱ نیز روشی برای بهبود دسته‌بندی سنگ با استفاده از تجزیه و تحلیل تصویر دیجیتال، استخراج ویژگی بر اساس اطلاعات دو سویه و یک فرآیند رای گیری برای گرفتن اطلاعات مرزی توسط پرز^{۱۴} و همکاران ارائه شد [۲۵]. در این تحقیق روش پیشنهادی برای طبقه‌بندی سنگ شامل استخراج ویژگی بافت و رنگ و انتخاب ویژگی، به‌علاوه استفاده از یک ماشین بردار پشتیبان^{۱۵} (SVM) برای طبقه بندی است. در تحقیق انجام شده توسط کو^{۱۶} و شانگ^{۱۷} در سال ۲۰۱۱ تکنواختی قطعات مواد معدنی براساس تصاویر سطحی گرفته شده، تعیین شده است [۲۶].

در این تحقیق از نرم افزار ویفراگ^{۱۸} برای ارائه یک تخمین اولیه از توزیع اندازه قطعات استفاده شد. تخمین به‌دست آمده برای ساختن یک مدل با استفاده از شبکه عصبی به کار برده شد و از الگوریتم لونبرگ-مارکواردت^{۱۹} برای آموزش استفاده شد. تکنیک‌های PCA و شبکه‌های عصبی برای تخمین توزیع اندازه ذره مواد معدنی خرد شده توسط حمزه لو^{۲۰} و همکاران در سال ۲۰۱۴ استفاده شد [۲۷]. در سال ۲۰۱۵ نیز پرز و همکاران با هدف دسته بندی لیتولوژی سنگ تحقیقاتی انجام دادند [۲۸]. در این تحقیق ابتدا هر تصویر به زیرتصاویری شکسته و سپس یک فرآیند استخراج ویژگی برای هر زیر تصویر با استفاده از فیلترهای گابور با مقیاس‌ها و جهت‌های مختلف بکار برده شد. سپس این ویژگی‌ها به‌عنوان ورودی برای طبقه بند SVM برای تخمین نوع سنگ در

در تصاویر دیجیتال، آموزش داده شده بود، استفاده شد. دسته‌های آموزشی با استفاده از مرتب‌سازی و تعیین اندازه دستی توده سنگ خرد شده، ایجاد شدند [۱۶]. در سال ۱۹۹۴ بارون و همکاران از بازشناسی الگو با استفاده از شبکه‌های عصبی براساس ضرایب تبدیل فوریه سریع تصویر، برای دسته‌بندی توزیع اندازه قطعات سنگ استفاده کردند [۱۳]. ورودی‌ها و خروجی‌ها به ترتیب پروفیل‌های بریده شده هر تصویر و دسته توزیع اندازه (۴۰٪ یا ۶۰٪ وزنی ریزتر از اندازه ۶ اینچ قطعات سنگ که به ترتیب ریز و درشت است) بودند. قابلیت پیش بینی شبکه عصبی با دادن ویژگی‌های تصاویری از توده خرد شده به شبکه عصبی، آزمایش شد. آموزش شبکه عصبی برای بازشناسی دسته توزیع اندازه، با استفاده از ضرایب تبدیل فوریه به‌عنوان ویژگی‌های بازشناسی الگو، انجام شد. در سال ۱۹۹۵ جانز^۱ و ماکسول^۲ تحقیق مشابهی درخصوص استفاده از شبکه‌های عصبی جهت پیش‌بینی توزیع اندازه قطعات سنگ انجام داده‌اند [۱۷].

در سال ۱۹۹۸ پترسن^۳ و همکاران مطالعه‌ای بر مبنای ویژگی‌های بافت (واریانس و دامنه عملگرهای بافتی) برای تعیین خصوصیات نوع ماده معدنی و تخمین اندازه سطح قطعات بر اساس بازشناسی الگوی بافت قطعات انجام دادند [۱۸]. در سال ۲۰۰۵ لپیستو^۴ و همکاران فیلتر گابور را برای فضاهای رنگ مختلف در طبقه بندی تصاویر سنگ طبیعی بکار بردند [۱۹]. در سال ۲۰۰۷، لینک^۵ و همکاران ترکیب ویژگی‌های هارالیک^۶ و تجزیه و تحلیل موجک را برای طبقه‌بندی تصاویر دیواره گمانه الکتریکی که در اکتشاف پوسته اقیانوس از طریق حفاری استفاده می‌شوند، به کار گرفتند [۲۰]. در سال ۲۰۰۸، کاجانبیل^۷ و یودومهانساکول^۸ از یک شبکه عصبی همراه با تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA)^۹ استفاده نموده و اندازه‌گیری فرکانس مکانی را برای جدایش بیست و شش دسته سنگ به کار بردند [۲۱].

¹¹Starck

¹²Goncalves

¹³Singh

¹⁴Perez

¹⁵Support Vector Machine (SVM)

¹⁶Ko

¹⁷Shang

¹⁸WipFrag©

¹⁹Levenberg- Marquardt (LM)

²⁰ Hamzeloo

¹Jones

²Maxwell

³Petersen

⁴Lepisto

⁵Linek

⁶Haralick

⁷Kachanubal

⁸Udomhunsakul

⁹Principal Component Analysis (PCA)

¹⁰Murtagh



شکل ۱- ساختار روش پیشنهادی تعیین توزیع دانه بندی سنگ دانه های بتن و آسفالت با روش پردازش تصویر دیجیتال

۲-۱- پیش پردازش تصویر و ارتقای کیفیت

ممکن است حین تصویر برداری به دلایلی همچون وجود گرد و غبار، آلوده بودن محیط، عدم تنظیم روشنایی و شدت نور، زاویه نامناسب تصویر برداری و ایجاد سایه، خطاهایی در تصویر گرفته شده، ایجاد شود. از این رو باید یک مرحله پیش پردازش بر روی تصاویر انجام شود. از جمله روش های پیش پردازش و ارتقاء کیفیت تصویر که عمدتاً برای رفع مشکلاتی از قبیل " وجود نویز در تصویر، وضوح پایین، حرکت جزئی، نامناسب نشان دادن جزئیات تصویر و ... " است، می توان به فیلترهای رفع نویز، هموار کننده و نرم کننده جزئیات تصویر، ارتقاء جزئیات و افزایش وضوح تصویر اشاره نمود. از مهم ترین این فیلترها می توان به فیلترهای میانگین گیر، فیلترهای مرتبه آماری، فیلترهای همومورفیک^۳، یکسان سازی هیستوگرام، فیلترهای ارتقاء جزئیات و ... اشاره نمود [۳۲]. با توجه به اینکه تصاویر سنگ دانه های تشکیل دهنده بتن و آسفالت عمدتاً در سر معدن و یا واحدهای فرآوری گرفته می شوند، خطاهای پیش گفته وجود داشته و جهت پیشگیری از وقوع خطاهای بعدی در الگوریتم، لازم است در مرحله اول این خطاها رفع و یا به حداقل ممکن کاهش یابند.

تأثیر خطای اعوجاج هنگامی بروز می کند که دید دوربین با سطح توده زاویه قائمه نداشته و یا در صورتی که مواد به صورت کپه ای

هر زیردسته استفاده شدند. سرشکی^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۶ نیز از فیلتر لبه یاب کلاسیک سوبل^۲ و مورفولوژی ریاضی جهت تعیین اندازه قطعات سنگ استفاده نمودند [۲۹].

تحقیقات انجام شده در زمینه تعیین توزیع خردایش قطعات سنگ خرد شده نشان می دهند که اغلب این روش ها از مشکلات و نواقصی از قبیل توانایی پایین مرزبایی قطعات به صورت خودکار و لزوم ویرایش دستی (صرف زمان زیاد و کاهش کارایی الگوریتم) و همچنین وابستگی اغلب الگوریتم های موجود به شرایط آزمایشگاهی و نیمه صنعتی و کاهش کارایی در محیط معدن و کارخانجات دانه بندی (به علت وجود گرد و خاک، محدودیت مکانی و زمانی و توزیع نامنظم مواد و ...) برخوردار هستند [۴، ۲۹، ۳۰، ۳۱].

هدف از تحقیق حاضر این است که براساس روش های استخراج ویژگی و کاربرد شبکه های عصبی، الگوریتمی ارائه شود که کم ترین تأثیر پذیری را از مشکلات موجود داشته و با تکیه بر روش های مبتنی بر یادگیری ماشینی، فرآیند تعیین توزیع دانه بندی سنگ دانه های تشکیل دهنده بتن و آسفالت را در کم ترین زمان ممکن و به نحوه بهینه انجام دهد.

در بخش دوم به ارائه روش پیشنهادی و شبکه عصبی پرداخته، در بخش سوم به آزمایش ها، معرفی پایگاه داده، معیار ارزیابی و بررسی نتایج روش پیشنهادی و در بخش چهارم به ارائه یافته ها، نتیجه گیری و جمع بندی پرداخته می شود.

۲-۲- روش پیشنهادی

در سال های اخیر الگوریتم های تعیین توزیع دانه بندی مواد معدنی خرد شده (از جمله سنگ دانه های تشکیل دهنده بتن و آسفالت)، عمدتاً با بهره گیری از روش های یادگیری ماشینی ارائه شده و به روش هایی که بر مبنای لبه یابی قطعات سنگ است، کم تر پرداخته شده است [۲۸-۲۱]. در این تحقیق نیز به دلیل اینکه نتایج روش های برگرفته از یادگیری ماشینی کارآمدتر، دقیق تر و سریع تر هستند، از این روش ها استفاده می شود [۲۸-۲۱]. یکی از مراحل اصلی این روش ها تشخیص ویژگی های مناسب با توانایی تمیزدهندگی خوب و سپس بهره گیری از روش های هوشمند از جمله شبکه های عصبی است. ساختار کلی روش پیشنهادی در شکل ۱ آورده شده است.

¹ Homomorphic

¹ Sereshki

² Sobel

پردازش شود، اما با استخراج ویژگی‌های شاخص این تصویر، می‌توان با یک بردار $n \times 1$ ، تصویر را معرفی نموده و سایر محاسبات را بر روی این بردار انجام داد. هر چه این ویژگی‌های استخراج شده شاخص‌تر بوده و توانایی تمیزدهندگی بهتری داشته باشند، در اولویت انتخاب هستند. در ادامه به معرفی روش استخراج ویژگی با استفاده از فیلترهای گابور که در این تحقیق استفاده شده است، پرداخته می‌شود.

۲-۱-۲-۲- موجک گابور

فیلتر گابور یک فیلتر خطی و محلی است که برای تجزیه و تحلیل بافت و آشکارسازی لبه به‌طور وسیعی استفاده می‌شود. هسته کانولوشن^۲ این فیلتر حاصل ضرب یک تابع نمایی مختلط و گوسین است [۳۲]. فیلترهای گابور در صورتی که به‌طور مناسب و دقیق تنظیم شوند، عملکرد مناسبی در تشخیص ویژگی‌های بافت و لبه بافت دارند [۱۹ و ۳۸-۴۰]. تابع یک فیلتر گابور دو بعدی متفانر زوج و تبدیل فوریه آن به‌صورت روابط (۱) تا (۳) است [۳۹].

$$f(x, y) = \left(\frac{1}{2\pi s_x s_y} \right) \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{s_x^2} + \frac{y^2}{s_y^2} \right)\right) \cos(2\pi u_0 x) \quad (1)$$

$$F(u, v) = \frac{1}{2} \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \left[\frac{(u - u_0)^2}{s_u^2} + \frac{v^2}{s_v^2} \right]\right] + \exp\left[-\frac{1}{2} \left[\frac{(u + u_0)^2}{s_u^2} + \frac{v^2}{s_v^2} \right]\right] \right\} \quad (2)$$

$$s_u = \frac{1}{2\pi s_x}, \quad s_v = \frac{1}{2\pi s_y} \quad (3)$$

در این روابط u_0 فرکانس مرکزی موج سینوسی در راستای محور x ، s_x و s_y به ترتیب انحراف معیار تابع پوش گاوسی در راستای محورهای x و y ، s_u و s_v به ترتیب انحراف معیار تابع گاوسی در راستای محورهای u و v است. مجموعه‌ای از فیلترهای گابور از طریق گسترش (مقیاس)^۳ و چرخش (جهت)^۴ موجک مادر $f(x, y)$ مطابق روابط (۴) تا (۷) به‌دست می‌آیند.

$$(4)$$

$$f_{mn}(x, y) = a^{-m} f(x', y'), \quad a > 1, m, n = \text{integer}$$

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 بوده و قطعات دورتر نسبت به دوربین، کوچک‌تر از حالت واقعی خود نشان داده می‌شوند. در حالت کلی جهت 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، پرسپکتیو و پراجکتیو اشاره نمود [۳۶-۳۳]. در این تحقیق با توجه به ویژگی‌های هر یک از این تبدیل‌های هندسی و تناسب آن‌ها با تصاویر توده سنگ خرد شده، از تبدیل پراجکتیو^۱ دو بعدی استفاده شده است. تحت این تبدیل، خطوط موازی دیگر موازی باقی نمانده، اما خطوط مستقیم حفظ شده و دچار اعوجاج نمی‌شوند [۳۳]. روش مورد نظر در این تحقیق به این صورت است که ابتدا دو شی هم شکل و هم اندازه (مثل توپ) را به‌عنوان مقیاس بر روی توده خرد شده و در مکان‌های مناسبی قرار داده و تصویربرداری انجام می‌شود. سپس یک مرحله پیش پردازش انجام شده و دو شی مقیاس، استخراج، جداسازی و قطر و مساحت آن‌ها محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از این تبدیل هندسی اقدام به کاهش و یا رفع خطای اعوجاج می‌شود. با اعمال این تبدیل هندسی، هر ردیف از U به ردیف متناظر آن در X نگاشت می‌شود. بردارهای U و X به‌صورت 2×4 عضوی بوده و مختصات گوشه‌های چهار ضلعی اولیه و اصلاح شده را تعریف می‌کنند [۳۴ و ۳۵].

۲-۲-۲- روش پیشنهادی برای استخراج ویژگی

از آنجایی که هدف اصلی از استخراج ویژگی، کاهش ابعاد داده و به تبع آن کاهش قابل توجه حجم محاسبات و زمان انجام آن است [۳۷]، از این رو در این بخش ویژگی‌های تصاویر سنگ‌دانه‌های تشکیل دهنده بتن و آسفالت، با استفاده از فیلترهای گابور استخراج شده و بردارهای ویژگی به‌دست آمده است. به‌عنوان مثال اگر یک تصویر به ابعاد 800×900 در نظر گرفته شود، اگر با تمام پیکسل‌های این تصویر محاسبات انجام شود، 720000 پیکسل بایستی

³Scale

⁴Orientation

¹Projective

²Convolution

به ترتیب ۰/۵، ۰/۶۵ و ۰/۳۵ انتخاب شده است. بنابراین یک آرایه ۵×۶ عضوی ایجاد می شود [۳۰].

با اعمال هر یک از فیلترهای گابور (با فاکتور نمونه برداری با نرخ کاهشی ۴×۴ در راستای سطر و ستون) بر روی تصاویر، تعدادی تصویر فیلتر شده به دست می آید. برای هر یک از تصاویر فیلتر شده، میانگین و انحراف معیار محاسبه می شود (روابط (۸) و (۹)) که با احتساب میانگین و انحراف معیار کل تصویر، بردار ویژگی ترکیبی (ترکیبی از فیلترهای گابور و میانگین و انحراف معیار تصویر فیلتر نشده) مطابق رابطه (۱۰)، با ۶۲×۱ عضو از تصویر استخراج شده است [۴۱-۳۸].

$$\mu_{mn} = \iint |f_{mn}(x, y)| dx dy \quad (8)$$

$$\sigma_{mn} = \sqrt{\iint |f_{mn}(x, y) - \mu_{mn}|^2 dx dy} \quad (9)$$

$$F_V = [\mu_1, \dots, \mu_{31}, \sigma_1, \dots, \sigma_{31}] \quad (10)$$

در این رابطه μ_i و σ_i به ترتیب میانگین و انحراف معیار است.

۲-۳- شبکه عصبی پرسپترون چند لایه

با توجه به بررسی های به عمل آمده، مناسب ترین شبکه عصبی MLP مورد استفاده در این تحقیق، از نوع جلورونده^۲ با الگوریتم یادگیری پس انتشار خطا^۳ است. جهت آموزش شبکه نیز از تابع یادگیری LM استفاده شده است. برای دستیابی به بهترین نتیجه ممکن، شبکه عصبی با تعداد نرون های مختلف لایه های ورودی، مخفی و خروجی و همچنین تعداد لایه های مختلف مخفی تشکیل و آزمایش شد. جهت آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش شبکه عصبی، نسبت داده ها به صورت ۷۰٪، ۱۵٪ و ۱۵٪ انتخاب شده است. پس از تشکیل شبکه عصبی و اجرای آن، تعداد ۱۰ تصویر نیز به عنوان تصاویر آزمایشی، به شبکه وارد و نتایج آن بررسی شده است. برای تعیین شبکه بهینه، معیار RMSE^۴ مطابق رابطه (۱۱) برای شبکه های مختلف محاسبه شد [۳۴].

$$RMSE = \frac{\sqrt{(O_i - T_i)^2}}{N} \quad (11)$$

در این رابطه O_i ، T_i و N به ترتیب معرف داده هدف، مقدار به دست آمده و تعداد داده های خروجی است.

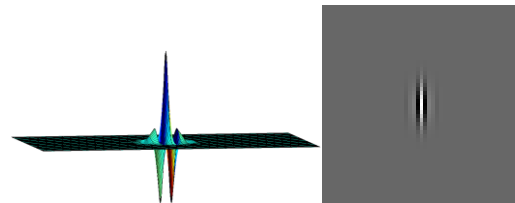
ساختار شبکه عصبی روش پیشنهادی در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین نمونه هایی از شبکه های عصبی آزمایش شده در

$$x' = a^{-m}(x \cos q + y \sin q) \quad (5)$$

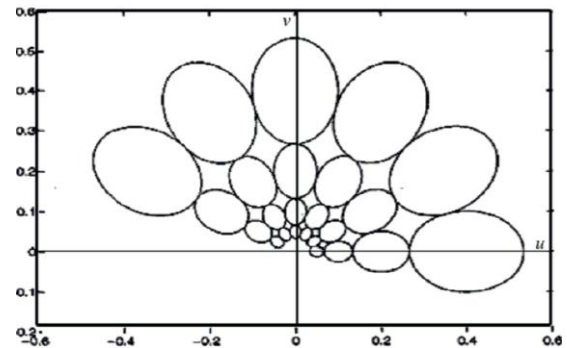
$$y' = a^{-m}(-x \sin q + y \cos q) \quad (6)$$

$$q = \frac{n\pi}{k} \quad n = 0, 1, \dots, k-1 \quad m = 0, 1, \dots, s-1 \quad (7)$$

در این روابط f_{mn} مقیاس شده و چرخش یافته ای از فیلتر مادر $f(x, y)$ ، ضریب مقیاس، n اشاره گر مربوط به چرخش فعلی، k تعداد کل جهت ها، m اشاره گر مربوط به مقیاس فعلی، s تعداد مقیاس ها و x' و y' مختصات مقیاس شده و چرخش یافته هستند. ضریب a^{-m} برای مستقل کردن انرژی فیلتر از مقیاس m است. تابع گابور دو بعدی در شکل ۲ نشان داده شده است. نمونه ای از گسترش و چرخش موجک مادر در حالتی که ۴ مقیاس و ۶ جهت دارد نیز در شکل ۳ نشان داده شده است [۴۱-۳۸].



شکل ۲- تابع گابور دو بعدی [۳۵]



شکل ۳- ایجاد موجک های گابور از طریق گسترش و چرخش

موجک مادر [۴۱]

در این تحقیق ابتدا اندازه تصاویر به ۸۰۰×۸۰۰ پیکسل تغییر داده شده، سپس فیلترهای بانک فیلتر گابور که قبلاً ساخته شده است، بر روی تصاویر اعمال شد. در این بانک، برای ایجاد فیلترهای گابور دو بعدی با اندازه ۸۰۰×۸۰۰ (هم اندازه تصویر)، تعداد ۵ مقیاس (۰/۲، ۰/۱، ۰/۰۵ و ۰/۰۲۵) و ۶ جهت (با چرخش ۳۰ درجه ای از ۰ تا ۵π/۶) استفاده شده و پارامترهای S_u و S_v

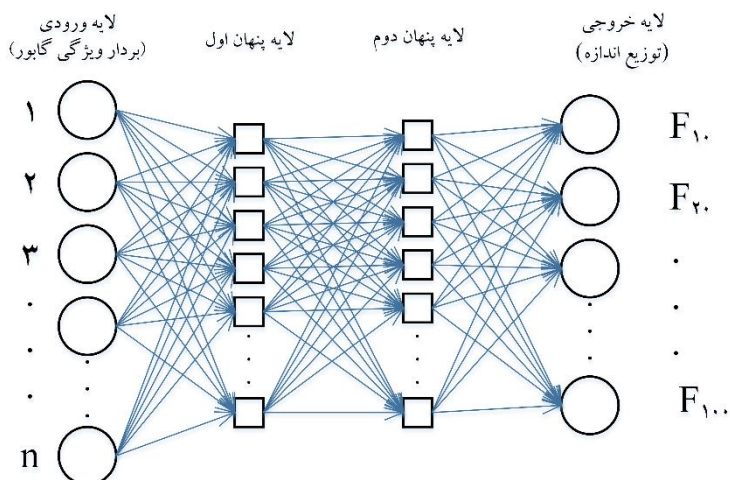
³Back Propagation

⁴Root Mean Square Error (RMSE)

¹Down sampling

²Feed Forward

جدول ۱ آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود شبکه عصبی با مشخصات ردیف اول، دارای کم‌ترین RMSE بوده و به‌عنوان بهترین شبکه انتخاب شده است.



شکل ۴- ساختار شبکه عصبی روش پیشنهادی

جدول ۱- نمونه‌هایی از شبکه‌های عصبی آزمایش شده

ردیف	تابع انتقال (لایه پنهان ۱ و ۲، لایه خروجی)	مدل	RMSE
۱	TANSIG- TANSIG- TANSIG	۶۲-۱۵-۱۰-۱۰	۱/۶۲
۲	LOGSIG- TANSIG- TANSIG	۶۲-۱۵-۱۰-۱۰	۲/۲۷
۳	LOGSIG- LOGSIG- TANSIG	۶۲-۱۵-۱۰-۱۰	۲/۶۵
۴	TANSIG- LOGSIG- TANSIG	۶۲-۱۵-۱۰-۱۰	۲/۵۴
۵	TANSIG- TANSIG- PURELIN	۶۲-۱۵-۱۰-۱۰	۳/۱۳
۶	LOGSIG- LOGSIG- LOGSIG	۶۲-۱۵-۱۰-۱۰	۵/۵۱
۷	PURELIN- TANSIG- PURELIN	۶۲-۱۵-۱۰-۱۰	۷/۵۶
۸	TANSIG - TANSIG- TANSIG	۶۲-۱۰-۱۰-۱۰	۲/۵
۹	LOGSIG- TANSIG- TANSIG	۶۲-۱۰-۱۰-۱۰	۲/۷۲
۱۰	LOGSIG- LOGSIG- LOGSIG	۶۲-۱۰-۱۰-۱۰	۶/۳۲
۱۱	TANSIG- TANSIG	۶۲-۱۰-۱۰	۳/۶۱
۱۲	TANSIG- TANSIG	۶۲-۱۵-۱۰	۳/۳۶

۲-۴- آزمایش‌ها و نتایج

آماري پایگاه داده تصاویر سنگ‌دانه‌های تشکیل دهنده بتن و آسفالت در جدول ۲ آورده شده است. همچنین نمونه‌ای از تصاویر تهیه شده از سنگ دانه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۱- الک‌های مورد استفاده در موسسه استاندارد و تحقیقات

صنعتی ایران جهت دانه‌بندی انواع سنگ‌دانه‌ها [۴۲-۴۴]

الک	نمره الک	اندازه الک (میلی‌متر)
	۱۰۰	۰/۱۵
ریز	۵۰	۰/۳
	۳۰	۰/۶
	۱۶	۱/۱۸
متوسط	۸	۲/۳۶
	۴	۴/۷۵

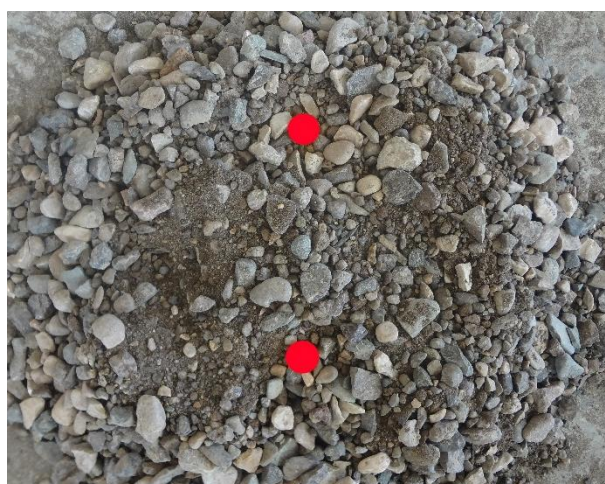
در این بخش پایگاه داده تصاویر معرفی شده و پس از آماده‌سازی داده‌ها، از شبکه عصبی جهت آموزش و به‌منظور یادگیری استفاده شده است. جهت تشکیل پایگاه داده، تعداد ۳۰ نمونه با وزن کلی حدود ۱۰۰ کیلوگرم از سنگ‌دانه‌های دانه‌بندی شده شامل شن درشت، شن ریز و ماسه با محدوده دانه‌بندی ۷۰ میلی‌متر الی ۰/۰۳ میلی‌متر از معادن حوزه گلوگرمک در جنوب شهر کرمان تهیه و سرنند شد. جهت تجزیه سرنندی نمونه‌ها از الک‌های استاندارد که مطابق استاندارد موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران است، استفاده شد. مشخصات این الک‌ها در جدول ۱ آورده شده است [۴۲-۴۴]. همچنین جهت تهیه پایگاه تصاویر، تعداد ۱۰۰ تصویر از نمونه‌های مذکور تهیه شد. پارامترهای

۳۷/۵	۱/۵	۹/۵	۳/۸	
۵۰	۲	۱۲/۵	۱/۲	
بزرگ‌تر از ۵۰	-	۱۹	۳/۴	درشت
		۲۵	۱	

جدول ۲- پارامترهای آماری پایگاه داده تصاویر سنگ‌دانه‌های تشکیل دهنده بتن و آسفالت

چولگی	میانگین	واریانس	میانگین (اینچ)	حداکثر (اینچ)	حداقل (اینچ)	درصد عبوری
۴/۲۴	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۱۸	۲/۰۶	۰/۰۰۱۵	F _۱ .
۳/۸۸	۰/۱۳	۰/۱	۰/۲۲	۲/۱۲	۰/۰۰۱۷	F _۲ .
۳/۵۴	۰/۲۱	۰/۱۱	۰/۲۶	۲/۱۸	۰/۰۰۱۹	F _۳ .
۳/۱۵	۰/۲۵	۰/۱۲	۰/۳۱	۲/۲۴	۰/۰۰۲	F _۴ .
۲/۷۶	۰/۳	۰/۱۳	۰/۳۶	۲/۳	۰/۰۰۲۲	F _۵ .
۲/۲۹	۰/۴۶	۰/۱۵	۰/۴۱	۲/۳۶	۰/۰۰۲۳	F _۶ .
۱/۷۹	۰/۵۲	۰/۱۷	۰/۴۷	۲/۴۲	۰/۰۰۲۵	F _۷ .
۱/۵۱	۰/۵۸	۰/۲	۰/۵۲	۲/۴۹	۰/۰۰۲۶	F _۸ .
۱/۰۱	۰/۶۹	۰/۵۲	۰/۷۴	۲/۵۵	۰/۰۰۲۸	F _۹ .
۰/۸۱	۱	۰/۷۹	۰/۹۶	۲/۶۱	۰/۰۰۳	F _{۱۰} .

پس از انجام مراحل الگوریتم، منحنی توزیع دانه بندی قطعات سنگ خرد شده با استفاده از روش پیشنهادی، تجزیه سرنبدی و روش خودکار نرم‌افزار Split-Desktop تهیه شد. یک نمونه تصویر سنگ‌دانه‌های بتن و آسفالت در شکل ۵ و منحنی توزیع دانه‌بندی آن در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴- نمونه‌ای از تصاویر تهیه شده از سنگ‌دانه‌ها



شکل ۵- یک نمونه تصویر سنگ‌دانه‌های بتن و آسفالت

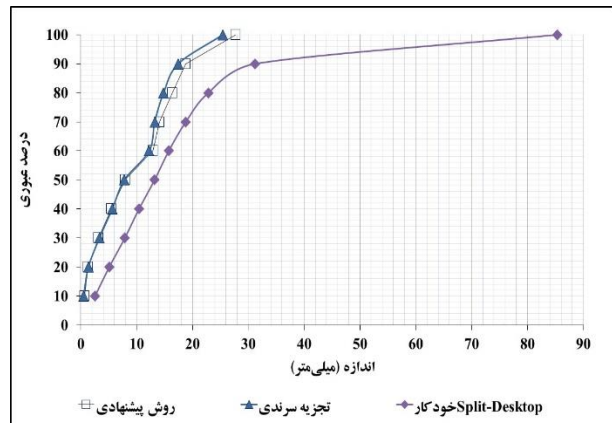
۲-۴-۱- آماده سازی داده‌ها

با توجه به اینکه شبکه عصبی مورد استفاده در این تحقیق از نوع نظارت شده است، از این رو بردارهای ویژگی تشکیل شده با استفاده از روش گابور، به‌عنوان داده‌های ورودی سامانه یادگیری در نظر گرفته می‌شوند. همچنین نتایج تجزیه سرنبدی نیز به‌عنوان داده‌های هدف در نظر گرفته شدند.

۲-۵- تعیین توزیع اندازه سنگ‌دانه‌های بتن و آسفالت

شده است [۴۶-۴۷]. مراحل پردازش تصویر به صورت یکسان کردن سطوح خاکستری^۱، عمل گر تشخیص لبه Sobel، تبدیل به دودویی با استفاده از حد آستانه، تبدیل فاصله روی لبه تصویر دودویی و اصلاح قطعه‌بندی آب پخشان^۳ برای بهبود کیفیت قطعه‌بندی است. Split-Desktop بهترین بیضوی فیت شده روی ناحیه تشخیص داده شده را تشکیل داده و اندازه هر قطعه خرد شده را محاسبه می‌کند. سپس قطرهای کوچک و بزرگ بیضوی، به عنوان ورودی به یک تابع تصحیح در نظر گرفته می‌شود [۴۸-۴۶]. به کمک این نرم افزار می‌توان به دو روش دستی و خودکار تصاویر را مرزیابی نمود. اگر چه در هر دو برنامه الگوریتم یکسانی استفاده شده است. در روش دستی، مرز بین قطعات سنگ توسط کاربر مشخص می‌شود. در حالی که در روش خودکار، نرم افزار با توجه به کنتراست موجود در تصویر، عملیات مرزیابی را انجام می‌دهد. سرعت کار در روش خودکار بیشتر بوده، اما دقت کار در روش دستی بیشتر است [۴۹].

پس از اینکه تصاویر در این نرم افزار مرزیابی شدند، مساحت و حجم قطعات (بعد سوم به عنوان نسبتی از دو بعد دیگر) محاسبه شده و توزیع دانه بندی سنگ تعیین می‌شود. توزیع دانه بندی به دو صورت ارائه می‌شود. روش مد نظر در این تحقیق، در نظر گرفتن ۱۰ بازه اندازه و به دست آوردن درصد تجمعی مواد عبوری از هر سرند است. نمونه‌ای از منحنی توزیع دانه بندی تهیه شده با نرم افزار Split-Desktop به همراه داده‌های خروجی با این روش در شکل ۷ آورده شده است. در این شکل F_{10} تا F_{100} به ترتیب اندازه سرنندی است که ۱۰ و ۱۰۰ درصد قطعات سنگ از آن عبور می‌کنند.



شکل ۶- منحنی توزیع دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های بتن و آسفالت به دست آمده از روش پیشنهادی، تجزیه سرندی و روش خودکار نرم‌افزار Split-Desktop برای تصویر شکل ۵

۶-۲- معیار ارزیابی

پس از تعیین توزیع دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های تشکیل دهنده بتن و آسفالت با استفاده از روش پیشنهادی، نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از تجزیه سرندی و روش خودکار نرم‌افزار Split-Desktop مقایسه شد. جهت انجام این مقایسه از معیار ارزیابی میانگین خطای نسبی^۱ استفاده شده است (رابطه (۱۲)) [۴۵].

$$MRE = \left(\frac{100}{n} \right) \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i - F_i}{A_i} \right) \quad (12)$$

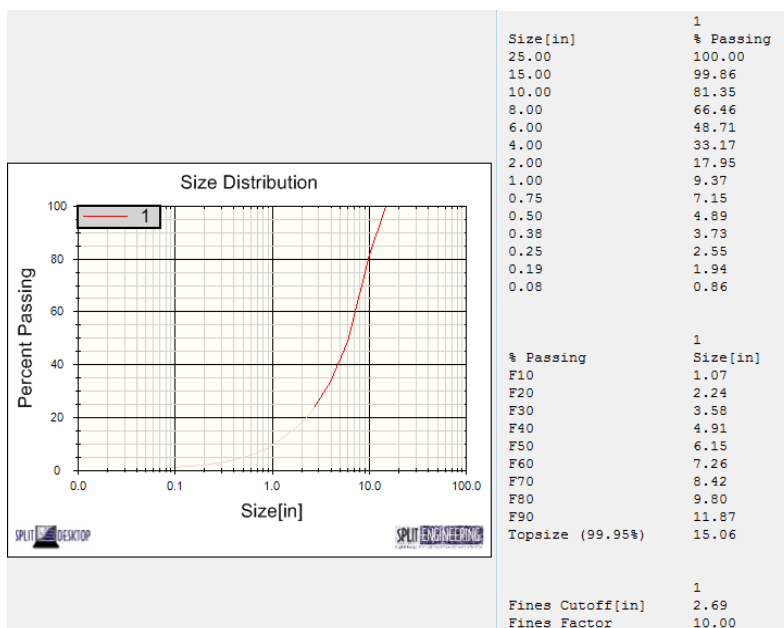
در این رابطه A_i ، یک اندازه خاص (F_{10} تا F_{100}) مربوط به درصد عبوری تجمعی به دست آمده (از ۱۰٪ تا ۱۰۰٪) از تجزیه سرندی، F_i یک اندازه خاص (F_{10} تا F_{100}) مربوط به درصد عبوری تجمعی محاسبه شده با روش پیشنهادی یا روش خودکار نرم‌افزار Split-Desktop و n تعداد اندازه‌ها (در اینجا ۱۰) است.

نرم افزار Split-Desktop جهت تعیین توزیع ابعادی قطعات سنگ خرد شده از طریق پردازش تصاویر سطح خاکستری طراحی

³Watershed

¹Mean Relative Error (MRE)

²Greyscale Equalization



شکل ۷- نمونه‌ای از منحنی توزیع دانه بندی تهیه شده با نرم افزار Split-Desktop به همراه داده‌های خروجی

در این رابطه IM بهبود نتایج، S و M به ترتیب مقادیر میانگین حاصل از روش خودکار نرم افزار Split-Desktop و روش پیشنهادی است. همان گونه که ملاحظه می‌شود روش پیشنهادی، دقت تخمین توزیع دانه‌بندی حاصل از روش خودکار نرم افزار Split-Desktop را به‌طور متوسط ۶۷٪ بهبود داده است.

مقایسه تغییرات MRE روش پیشنهادی و روش خودکار نرم‌افزار Split-Desktop با نتایج تجزیه سرندهی برای $F_{1.0}$ تا F_{100} تصاویر آزمایشی (به‌صورت تفکیک شده برای هر دسته اندازه) در شکل ۸ نشان داده شده است. همچنین متوسط درصد بهبود جواب تعیین دانه‌بندی برای هر دسته اندازه (تفکیکی) نسبت به حالت خودکار Split-Desktop در جدول ۴ نشان داده شده است. لازم به‌ذکر است که اکثر روش‌های خودکار تخمین توزیع اندازه سنگ‌دانه‌های خرد شده، در بخش‌های دانه‌بندی ریز تا متوسط ($F_{5.0}$ تا $F_{1.0}$) خطای قابل توجهی داشته و در بخش متوسط تا درشت (F_{100} تا $F_{5.0}$) خطای کم‌تری دارند.

نمودار شکل ۸ و جدول ۴ نیز بیان‌گر آن است که روش پیشنهادی در اندازه‌های سرنده $F_{1.0}$ تا F_{100} به‌طور متوسط، ۶۳٪ نتایجی بهتر از روش خودکار نرم افزار Split-Desktop دارد.

۲-۷- ارائه یافته‌ها و بحث

میانگین خطای MRE و متوسط درصد بهبود جواب تعیین دانه‌بندی برای هر یک از تصاویر آزمایشی (۱۰ تصویر) نسبت به روش خودکار Split-Desktop برای روش پیشنهادی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- خطای MRE و بهبود جواب تعیین دانه‌بندی روش

پیشنهادی نسبت به روش خودکار Split-Desktop

تصویر	روش پیشنهادی	Split-Desktop خودکار
۱	۰/۰۹	۱/۴۴
۲	۰/۴۱	۳/۵۶
۳	۰/۵۳	۲/۹۳
۴	۰/۱۳	۱/۶۱
۵	۰/۹۲	۰/۴۹
۶	۱/۷۷	۰/۶۴
۷	۰/۳۴	۳/۰۸
۸	۰/۳۸	۰/۳۳
۹	۰/۸۴	۴/۷۱
۱۰	۰/۸۱	۰/۲۷
میانگین	۰/۶۲	۱/۹۱
انحراف معیار	۰/۵	۱/۵۷
IM	٪۶۷	-

برای مقایسه نتایج روش پیشنهادی با نتایج حاصل از روش خودکار نرم افزار Split-Desktop، رابطه

$$IM = \frac{S-M}{S} \times 100 \quad (۱۳) \quad \text{استفاده شده است [۳۶].}$$

(۱۳)

۴- مراجع

[۱]. جهانی، م. "پیش بینی خردایش با روش های تجربی و توسعه یک مدل مناسب برای معدن آهن شماره ۱ گل گهر"، دانشگاه شهید باهنر کرمان، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۹۲.

[2] Jimeno, C.L., Jimeno, E.T., Carcedo, A.J.F. "Drilling and Blasting of Rocks", A.A. Balkema/ Rotterdam: Netherland, 1995.

[3] Kemeny, J., Mofya, E., Kaunda, R., Perry, G. and Morin, B. "Improvements in blast fragmentation model using digital image processing", Proceedings of the 38th Rock Mechanics Symposium, Washington, D.C, 2001.

[4] Sudhakar, J., Adhikari, G.R., Gupta RN. "Comparison of fragmentation measurements by photographic and image analysis techniques", Rock Mechanics and Rock Engineering, V. 39, No. 2, pp. 159-168, 2006.

[5] Maerz, N. H., Franklin, J. A. and Coursen, D. L. "Fragmentation measurement for experimental blasting in Virginia", Proceedings of Third Mini-symposium on Explosives and Blasting Research, 1987.

[6] Lin, C. L., Ken, Y. K and Miller, J. D. "Evaluation of a pc image-based on-line coarse particle size analyzer", Emerging Computer Techniques for the Mineral Industry Symposium, Utah, 1993.

[7] Yen, Y. K., Lin, C. K. and Miller, J. D. "Particle overlap and segregation problems in on-line coarse particle size measurement", Powder Technology, V. 98, No. 1, pp. 1-12, 1998.

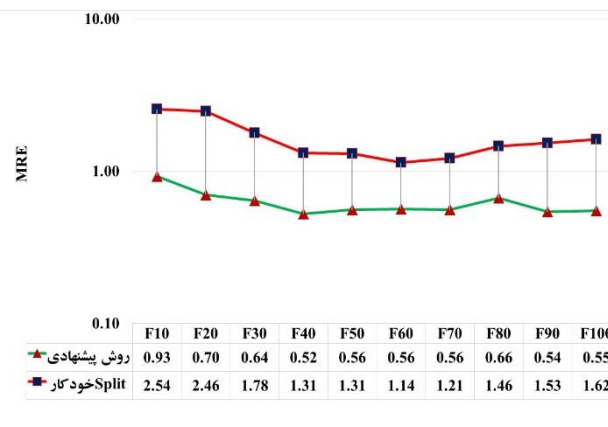
[8] Maerz, N. H., Palangio, T. C. and Franklin, J. A. "WipFrag image based granulometry system", Proceedings of the FRAGBLAST 5, Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Montreal, Quebec, Canada, 1996.

[9] Crida, R. and Jager, G., "An approach to rock size measurement based on a model of the human visual system", Minerals Engineering, V. 10, No. 10, pp. 1085-1093, 1997.

[10] Wang, W. x. "Binary image segmentation of aggregates based on polygonal approximation and classification of concavities", Pattern Recognition, V. 10, No. 31, pp. 1503-1524, 1998.

[11] Wang, W. X. "Particle size estimation based on edge density", Electronic Science and Technology of China, V. 4, No. 3, p. 100, 2005.

[12] Wang, W. and Hubei, W. "Pattern recognition techniques, technology and applications, rock particle image segmentation and systems", I-Tech,



شکل ۸- مقایسه تغییرات MRE روش پیشنهادی و روش خودکار نرم افزار Split-Desktop (تفکیک شده برای هر دسته اندازه)

جدول ۴- متوسط درصد بهبود جواب تعیین دانه‌بندی برای هر دسته اندازه نسبت به روش خودکار Split-Desktop

درصد عبوری	IM برای هر دسته اندازه نسبت به روش خودکار Split (%)
F ₁	۶۳
F _۲	۷۱
F _۳	۶۴
F _۴	۶۰
F _۵	۵۷
F _۶	۵۰
F _۷	۵۴
F _۸	۵۴
F _۹	۶۹
F _{۱۰}	۸۶
میانگین	۶۳

۳- نتیجه گیری

در این تحقیق یک الگوریتم جهت تعیین توزیع دانه‌بندی تصاویر دیجیتال قطعات سنگ خرد شده پیشنهاد و جهت استخراج ویژگی بافتی تصاویر، از فیلترهای گابور استفاده شد. ویژگی های استخراج شده به عنوان بردارهای ورودی به شبکه عصبی در نظر گرفته شدند. مقایسه نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی و نتایج حاصل از مرزبایی خودکار قطعات سنگ خرد شده در نرم افزار Split-Desktop با تجزیه سرنندی، نشان داد که روش پیشنهادی به طور متوسط ۶۷٪ نتایجی بهتر از روش خودکار نرم افزار Split-Desktop دارد. همچنین در بررسی توزیع اندازه F_{۱۰} تا F_{۱۰۰} تصاویر نیز روش پیشنهادی به طور متوسط، ۶۳٪ نتایجی بهتر از روش خودکار نرم افزار Split-Desktop داشته است.

- [25] Claudio, A. P., Pablo, A. E., Pablo, A. V., Luis, E. C. and Carlos, M. A. "Ore grade estimation by feature selection and voting using boundary detection", *International Journal of Mineral Processing*, V. 101, pp. 28-36, 2011.
- [26] Young-Don, K. and Helen, S. "A neural network-based soft sensor for particle size distribution using image analysis", *Powder Technology*, V. 212, pp. 359-366, 2011.
- [27] Hamzeloo, E., Massinaei, M. and Mehrshad, M. "Estimation of particle size distribution on an industrial conveyor belt using image analysis and neural networks", *Powder Technology*, V. 261, pp. 185-190, 2014.
- [28] Claudio, A. P., Jacob, A. S., Carlos, F. N., Daniel, A. S., Carlos M. A. and Francisco, J. G. "Rock lithological classification using multi-scale gabor features from sub-images, and voting with rock contour information", *International Journal of Mineral Processing*, V. 144, pp. 56-64, 2015.
- [29] Sereshki, F., Hoseini, S. M. and Ataei, M. "Blast fragmentation analysis using image processing", *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, V. 2, pp. 211-218, 2016.
- [30] Hunter, G.C., McDermott, C., Miles, N.J., Singh, A., Scoble, M.J. "A review of image analysis techniques for measuring blast fragmentation", *Mining Science and Technology*, V.11, No.1, pp. 19-36, 1990.
- [31] Sanchidria'n, J.A., Segarra, P., Ouchterlony, F., Lopez, L.M. "On the accuracy of fragment size measurement by image analysis in combination with some distribution functions", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, V. 42, pp. 95-116, 2009.
- [32] Gonzalez, R. C., Woods, R. E. and Eddins, S. L. "Digital image processing using MATLAB", Pearson Prentice Hall, 2004.
- [۳۳] کیومرثی، ا. "رفع اعوجاج هندسی، پرسپکتیو و کجی تصاویر متن دوربینی فارسی"، دانشگاه شهید باهنر کرمان، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۹۱.
- [34] MATLAB and Statistics Toolbox Release 2014a, the MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- [۳۵] یعقوبی، ه.، منصوری، ح.، ابراهیمی فرسنگی، م.، نظام آبادی پور، ح. « ارزیابی خطای اعوجاج در روش پردازش تصویری دیجیتال برای تعیین توزیع خردایش توده سنگ خرد شده ناشی از انفجار»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، در دست چاپ، ۱۳۹۷.
- [36] Liu, J.L., Feng, D.Z. "Two-dimensional multi-pixel anisotropic Gaussian filter for edge-line Vienna, Austria, pp. 626, 2005.
- [13] Luerkens, D. W. "Surface representation derived from a variational principle 1: the gray level function", *Particulate Science and Technology*, V. 4, p. 361, 1986.
- [14] Plansky, L. E., Amick, D. and Prisbrey, K. A. "Neural networks based optical sensors for metal welds", *Emerging Computer Techniques for the Minerals Industry*, Littleton, Colorado, 1993.
- [15] Bottlinger, M. and Kholus, R. "Characterizing particle shapes and knowledge based image analysis of particle samples", *Dutsches Institut Furrier Lebensmitteltechik. e. v. 4750, Quavkenbruck*, 1992.
- [16] Barron, L., Martin, L.S. and Prisbrey, K. "Neural network pattern recognition of blast fragment size distribution", *Particulate Scince and Technology*, V.12, pp.235-242, 1994.
- [17] Jones, T. F. and Maxwell, A. P. "Information from bulk particulate profiles", *Proceedings of the 8th IFAC International Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*, Sun City, South Africa, 1995.
- [18] Petersen, K. R., Aldrich, C. and Van deveter, J. S. "Analysis of ore particles based on textural pattern recognition ", *Minerals Engineering*, V. 10, pp. 959-977, 1998.
- [19] Lepisto, L., Kunttu, I. and Visa, A, "Rock image classification using color features in gabor space", *Journal of Electronic Imaging*. V. 14, No.4, 2005.
- [20] Linek, M., Jungmann, M., Berlage, T., Pechinig, R. and Clauser, C. "Rock classification based on resistivity patterns in electrical borehole wall images", *Journal of Geophysics and Engineering*, V. 4, No. 2, pp. 171-183, 2007.
- [21] Kachanubal, T. and Udomhunsakul, S, "Rock textures classification based on textural and spectral features", *International Journal of Computational Intelligence*, V. 4, pp.240-246, 2008.
- [22] Murtagh, F. and Starck J. L. "Wavelet and curvelet moments for image classification: application to aggregate mixture grading", *Pattern Recognition Letters*, V. 29, No. 10, pp. 1557-1564, 2008.
- [23] Goncalves, L. B., Leta, F. R. and de Valente, S. C. "Macroscopic rock texture image classification using a hierarchical neuro-fuzzy system", *16th International Conference on Systems, Signals and Image Processing, IWSSIP*, 2009.
- [24] Singh, N., Singh, T. N., Tiwary, A. and Sarkar, K. M. "Textural identification of basaltic rock mass using image processing and neural network", *Computational Geosciences*, V. 14, No. 2, pp. 301-310, 2010.

- [49] Split Engineering LLC Team, "Manual of split-desktop image analysis software, Version 3.0", 2010.
- segment (ELS) detection", Image and Vision Computing, V. 32, pp. 37–53, 2014.
- [37] Bow, S. T. "Pattern recognition and image processing", Secend Ed., U.S.A: Northern Illinois University, De Kalb, Illinois, 2002.
- [۳۸] میرزاپور، ف.، قاسمیان، ح. «آشکار سازی بافت تصاویر ماهواره با استفاده از موجک‌های گابور»، دومین کنفرانس ماشین بینایی و پردازش تصویر ایران، جلد اول، ص ۱۴۰ تا ۱۴۵، ۱۳۸۱.
- [۳۹] نظام آبادی پور، ح.، کبیر، ا. «ترکیب ویژگی های سطح پایین برای طبقه بندی معنایی تصاویر»، نشریه علمی پژوهشی عوم و مهندسی کامپیوتر، جلد ۲، شماره ۱ و ۳ (الف)، ص ۳۷ تا ۴۶، ۱۳۸۳.
- [40] Chu, X. and Chan, K.L. "Rotation and scale invariant texture analysis with tunable gabor filter banks", Lecture Notes in Computer Science, V 5414, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [۴۱] امیری، س، ح.، جم زاد، م. «بازیابی تصاویر بر اساس محتوی»،
<http://ce.sharif.edu/courses/92-93/2/ce687-1/resources/root/Lectures/CBIR.pptx>.
- [۴۲] استاندارد ملی ایران، شماره ۴۹۷۷. «سنگدانه‌های بتن، ویژگی‌ها»، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، تجدید نظر سوم، ۱۳۹۴.
- [۴۳] استاندارد ملی ایران، شماره ۳۰۲. «دانه بندی»، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، تجدید نظر سوم، ۱۳۹۴.
- [۴۴] مقررات ملی ساختمان، مبحث پنجم، «مصالح و فرآورده‌های ساختمانی»، دفتر امور مقررات ملی ساختمان، ۱۳۹۴.
- [45] Tofallis, C. "A better measure of relative prediction accuracy for model selection and model estimation", Journal of the Operational Research Society, V.66, pp. 1352–1362, 2015.
- [46] Higgins, M., Seppala, V., Kemeny, J., BoBo, T. and Girdner, K., Integrated software tools and methodology for optimization of blast fragmentation, Proceedings of the International Society of Explosive Engineers Annual Meeting, Nashville, TN, 1999.
- [47] Kemeny, J. "Practical technique for determining the size distribution of blasted benches, waste dumps and heap leach sites", Mining Engineering, pp. 1281-1284, 1994.
- [48] La Rosa, D., Girdner, K., Valery, W. and Abramson, S. "Recent applications of the split-online image analysis system" Vi Shmmt, Rio de Janeiro, Brazil, 2001.

Determining the size distribution of concrete and asphalt aggregates using Gabor filters feature extraction and neural networks

Hadi Yaghoobi

PhD Student of Mining Engineering, Mining Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Hamid Mansouri*

Associate Professor of Mining Engineering, Department of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Mohammad Ali Ebrahimi Farsangi

Associate Professor of Mining Engineering, Department of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Hossein Nezamabadi-Pour

Professor of Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Abstract

Concrete and asphalt aggregates size distribution is one of the most important parameters in concrete and asphalt mix design that can affect the quality, durability, and strength of both concrete and asphalt. For evaluating the aggregates mix design, digital image analysis is a fast, reliable and indirect technique. In this study, based on one of the visual feature extractions methods (Gabor filters) and the neural networks, an algorithm was developed to determine the size distribution of digital images of concrete and asphalt aggregates. 100 images of concrete and asphalt aggregates were applied to train the neural network. Then, the results were compared with the results obtained by automatic estimation of aggregates size distribution by Split-Desktop software and sieving analysis. The results showed a general improvement in evaluating concrete and asphalt aggregates size distribution. Also, by using the proposed method, compare to automatic estimation of Split-Desktop, a reduction of 67% in error estimation was observed. Furthermore, this method showed also an improvement of 63% in evaluating of F_{10} to F_{100} .

Keywords: Size distribution, Concrete and asphalt aggregates, Image feature extraction, Gabor filters, Neural networks.

* Corresponding Author: hmansouri@uk.ac.ir