

ارزیابی شاخ‌های مختلف تخمین توزیع ابعادی ذرات با استفاده از روش‌های آنالیز مؤلفه‌های اصلی و شبکه عصبی

اسماعیل حمزه‌لو^۱، محمد مسینایی، ناصر مهرشاد^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه بیرجند

۲- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه بیرجند، mmassinaei@birjand.ac.ir

۳- استادیار گروه مهندسی الکترونیک، دانشگاه بیرجند

(دریافت ۲ مرداد ۱۳۹۱، پذیرش ۲۰ اسفند ۱۳۹۱)

چکیده

تخمین توزیع اندازه ذره در مراحل مختلف خردایش از جمله مهمترین پارامترها در کنترل فرایند می‌باشد. روش مرسوم اندازه‌گیری توزیع اندازه ذره در صنعت آنالیز سرنديست که با توجه به تناژ بالای مواد و درشت بودن ابعاد ذرات کاری دشوار و زمان‌بر می‌باشد. هدف از بررسی حاضر، ارزیابی پتانسیل قطرهای معادل مختلف به‌منظور تخمین توزیع اندازه ذره واقعی با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر و شبکه عصبی می‌باشد. برای انجام آزمایش‌ها از یک نمونه منیزیت استفاده شد. در مجموع ۲۰ شاخص ابعادی استخراج شده از تصاویر ذرات با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) به ۴ مؤلفه کاهش یافته و بهترین شاخص‌های ابعادی شناسایی شدند. سپس از شاخص‌های ابعادی بدست آمده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی به‌منظور آموزش شبکه عصبی و تخمین توزیع اندازه ذره استفاده شد. نتایج بررسی حاضر نشان داد که تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین منحنی‌های توزیع اندازه ذره تخمین زده شده توسط شاخص‌های ابعادی مختلف وجود دارد. قطر کوچک بیضی مساحت معادل، عرض فرت، عرض بهترین مستطیل برازش شده و قطر ماکزیمم دیسک محاطی به ترتیب بهترین شاخص‌ها به‌منظور توصیف ابعاد ذرات می‌باشند. با تلفیق روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی و شبکه عصبی میتوان تخمین نسبتاً دقیقی از توزیع اندازه ذره به‌دست آورد.

کلمات کلیدی

توزیع اندازه ذره، آنالیز سرندي، پردازش تصویر، شبکه عصبی

۱- مقدمه

توزیع دانه‌بندی ذرات یکی از پارامترهای مهم در شبیه‌سازی، کنترل و بهینه‌سازی فرایندهای آتشباری، سنگ‌شکنی و آسیاکنی (بویژه آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن) است. روش مرسوم اندازه‌گیری توزیع ابعادی ذرات در صنعت نمونه‌برداری دستی و آنالیز سرنندی است که با توجه به تناژ بالای مواد و درشت بودن ابعاد ذرات امری دشوار و زمان‌بر می‌باشد. در سال‌های اخیر با توسعه دوربین‌های فیلم‌برداری با کیفیت بالا و نرم‌افزارهای پردازش تصویر، امکان اندازه‌گیری روی جریان ابعاد ذرات در مراحل مختلف معدنکاری و مدارهای خردایش فراهم شده است [۱-۳]. تکنیک پردازش تصویر روشی سریع، ارزان، سازگار و غیرمخرب در مقایسه با سایر سیستم‌های تعیین توزیع ابعادی است. در این سیستم با نصب دوربین و سیستم روشنایی مناسب از ذرات تصویربرداری شده، تصاویر برداشته شده سپس به کمک نرم‌افزارهای پردازش تصویر به منظور شناسایی ذرات ناحیه‌بندی گردیده و در نهایت منحنی‌های توزیع ابعادی ذرات ترسیم می‌گردد. از جمله مهمترین معایب سیستم پردازش تصویر این است که تصاویر از بخش فوقانی توده یا نوار نقاله برداشته شده که این بخش ممکن است نماینده واقعی از کل جامعه ذرات نباشد. به عبارت دیگر ذرات ریز یا نرمه قرار گرفته در بخش زیرین، در معرض دوربین قرار نگرفته و به همین دلیل نتایج توزیع دانه‌بندی بدست آمده با استفاده از این تکنیک اغلب درشت‌تر از دانه‌بندی واقعی است. معمولاً از نتایج تجزیه سرنندی به عنوان معیار واقعی و میزان صحت داده‌های پردازش تصویر استفاده می‌شود.

بررسی‌ها نشان داده است که استخراج شاخص ابعادی مناسب از تصاویر مرزبندی شده ذرات و تبدیل آنها به داده‌های توزیع وزنی (یا حجمی) معادل ذرات، از جمله موارد حل نشده و قابل تامل در اکثر الگوریتم‌های پردازش تصویر توسعه یافته بمنظور اندازه‌گیری توزیع اندازه ذره می‌باشد. بررسی‌های انجام شده توسط محققین این پژوهش نشان داده است که بجز در محدود پژوهش‌های انجام شده [۴-۵]، در اغلب موارد تنها از یک شاخص ابعادی مشخص (بدون بررسی قابلیت سایر شاخص‌ها) بمنظور محاسبه ابعاد ذرات استفاده شده است. به همین منظور هدف از انجام پژوهش حاضر، ارزیابی پتانسیل شاخص‌های ابعادی مختلف در تخمین دقیق توزیع اندازه ذره با استفاده تکنیک‌های پردازش تصویر و شبکه عصبی می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- تعاریف

در این بخش تعدادی از مرسوم‌ترین قطرهای معادل ذرات که در پژوهش حاضر استفاده شده است بطور اختصار تعریف و نحوه محاسبه آنها تشریح می‌گردد. این شاخص‌های ابعادی شامل قطر دایره مساحت معادل، قطرهای بیضی مساحت معادل، بهترین مستطیل برآزش شده، قطر فرت، ماکزیمم دیسک محاطی، قطر مستطیل محیط شده، مساحت و محیط هر ذره و شعاع‌های داخلی هر ذره می‌باشند.

دایره مساحت معادل

دایره مساحت معادل، دایره‌ای است که مساحت آن با مساحت ذره یکسان است (شکل ۱c). مساحت معادل هر ذره تعداد پیکسل‌های موجود در تصویر دوسطحی (Binary) آن است. قطر دایره مساحت معادل برای هر ذره بعنوان شاخص ابعادی آن ذره در نظر گرفته می‌شود [۶].

بیضی مساحت معادل

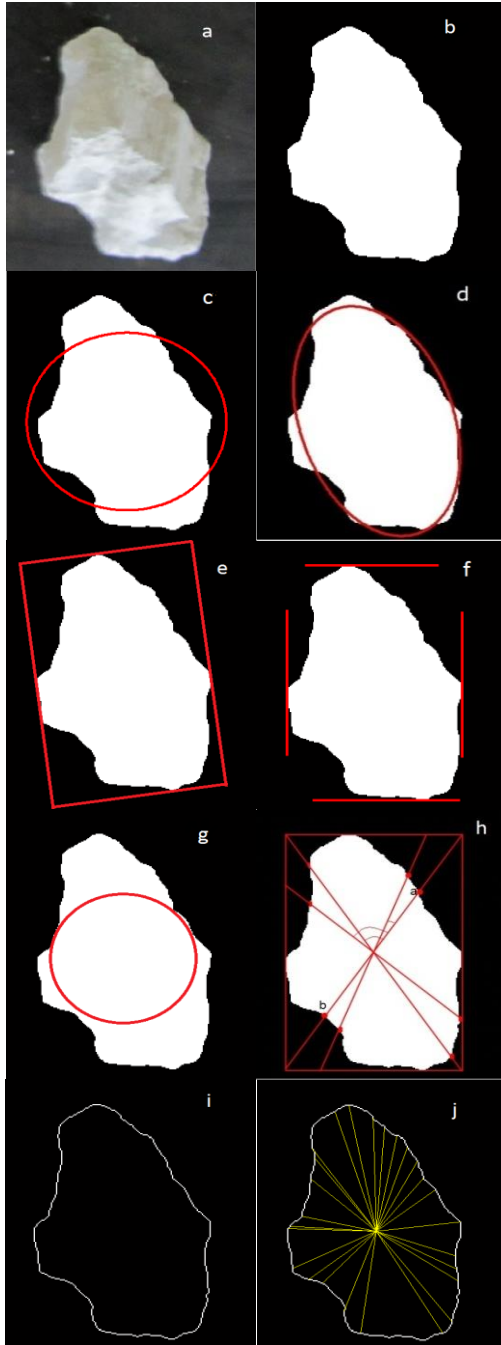
بیضی مساحت معادل، بیضی‌ای است که مساحت و جهت‌گیری آن با مساحت و جهت‌گیری ذره مورد نظر یکسان باشد (شکل ۱d). مشابه دایره مساحت معادل، مساحت هر ذره مجموع تعداد پیکسل‌های تشکیل‌دهنده آن ذره است. قطرهای بزرگ و کوچک بیضی مساحت معادل به عنوان شاخص‌های ابعادی هر ذره موجود در تصویر محاسبه می‌شوند [۵].

بهترین مستطیل برآزش شده

بهترین مستطیل برآزش شده، مستطیلی با کوچکترین مساحت محیط شده بر ذره می‌باشد (شکل ۱e). برای این منظور مستطیل فرضی بر هر ذره محیط شده و با زوایای یک درجه‌ای چرخانده می‌شود تا شرایط مورد نظر برآورده شود [۶]. سه مشخصه طول، عرض و مساحت بهترین مستطیل برآزش شده از تصاویر ذرات استخراج می‌گردند.

قطر فرت

و شاخصه‌های آماری مورد نظر به منظور آموزش شبکه‌ی عصبی تعیین می‌گردند.



شکل ۱- تصاویری از قطرهای معادل مختلف یک ذره

a: تصویر اصلی ذره، b: تصویر دو سطحی (باینری)، c: دایره مساحت معادل، d: بیضی مساحت معادل، e: بهترین مستطیل برازش شده، f: قطر فرت، g: ماکزیمم دیسک محاطی، h: مستطیل محیط‌شده، i: محیط ذره (پیکسل‌های مرزی)، j: شعاع‌های داخلی ذره

کوچکترین فاصله بین دو خط موازی مماس بر ذره را قطر فرت گویند (شکل ۱f). قطر فرت برای هر ذره در امتدادهای مختلف محاسبه شده و با هر یک درجه چرخش یک قطر فرت محاسبه می‌گردد. به این ترتیب برای هر ذره ۱۸۰ قطر فرت محاسبه شده و سپس کوچکترین فرت، بزرگترین فرت و متوسط فرت محاسبه می‌گردد [۲].

ماکزیمم دیسک محاطی

ماکزیمم دیسک محاطی، بزرگترین دایره‌ای است که در داخل یک ذره محاط شده است [۵] (شکل ۱g). در این بررسی، بزرگترین دیسک محاطی با استفاده از مورفولوژی ریاضی و عملگر فرسایش و گسترش محاسبه می‌شود. این کار با فرسایش و به دنبال آن گسترش، با استفاده از عناصر ساختاری دیسکی شکل با افزایش شعاع انجام می‌شود. اجرای این عمل با دیسکی با شعاع ۱ پیکسل شروع شده و تا برازش دیسک در داخل ذرات ادامه پیدا می‌کند.

مستطیل محیط‌شده

برای محاسبه این شاخص، ابتدا مستطیلی اطراف ذره محیط‌شده و سپس قطرهای مختلف مستطیل در جهات مختلف (که همگی از مرکز مستطیل عبور می‌نمایند) ترسیم می‌گردند (شکل ۱h). سپس مجموع تعداد پیکسل‌های بین محل‌های تقاطع هر قطر با ذره در جهات مختلف محاسبه می‌شوند. در نهایت، شاخصه‌های آماری مختلف طول‌های اندازه‌گیری شده (از قبیل متوسط، انحراف معیار، ماکزیمم و مینیمم) تعیین و به منظور آموزش شبکه‌ی عصبی استفاده می‌شوند.

مساحت و محیط ذره

مساحت هر ذره مجموع تعداد پیکسل‌های تشکیل دهنده آن و محیط هر ذره مجموع تعداد پیکسل‌های مرزی آن می‌باشد (شکل ۱i).

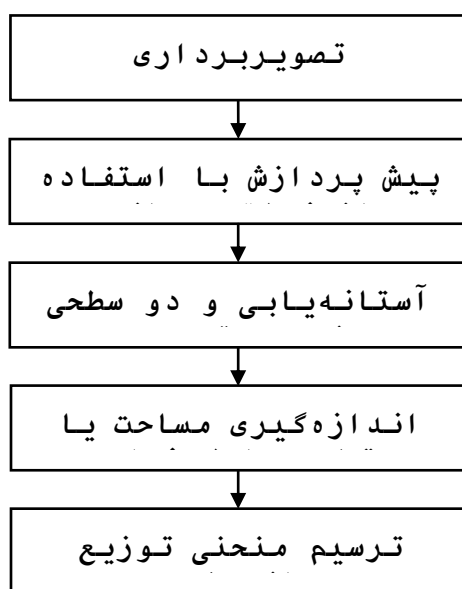
شعاع‌های داخلی ذره

فاصله بین مرکز جرم تصویر هر ذره تا پیکسل‌های مرزی آن به عنوان شعاع داخلی آن ذره در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱j). شعاع‌های داخلی برای پیکسل‌های مرزی ذره محاسبه شده

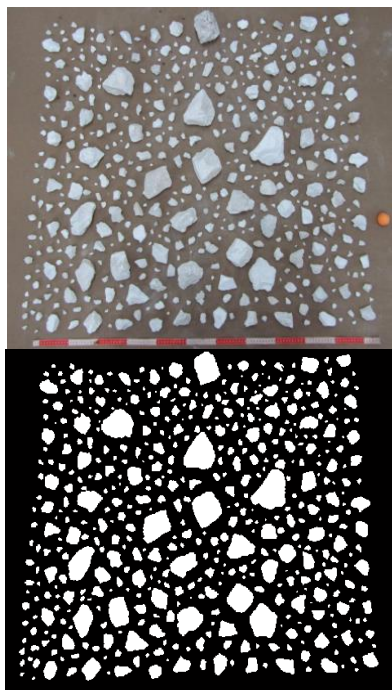
۲-۲- تصویربرداری و استخراج ویژگی

۲-۲-۱- تصویربرداری

مختلف نمونه نیز گرفته شدند (شکل ۴). در نهایت ویژگی‌های استخراج شده از این تصاویر برای آموزش شبکه عصبی و تخمین توزیع ابعادی ذرات استفاده شدند.



شکل ۲- الگوریتم پردازش تصویر استفاده شده به منظور اندازه‌گیری توزیع ابعادی ذرات



شکل ۳- تصاویر اصلی (بالا) و دو سطحی (پایین) نمونه منیزیت

آزمایش‌ها بر روی یک نمونه منیزیت (در شرایطی که ذرات هم‌پوشانی نداشته و جدا از هم می‌باشند) انجام شدند. نحوه انجام آزمایش بدین شکل بود که در ابتدا توزیع دانه‌بندی واقعی نمونه به روش آنالیز سردی تعیین گردید و سپس با پهن نمودن نمونه روی یک سطح مناسب، تصاویری از یک ارتفاع ثابت از سطح نمونه به کمک یک دوربین Canon SX210 (با بزرگنمایی ۱۴X و وضوح ۱۴ مگاپیکسل) گرفته شد. این تصاویر هم از کل نمونه و هم از فراکسیون‌های ابعادی مختلف نمونه گرفته شدند. به منظور اندازه‌گیری توزیع ابعادی واقعی ذرات از یک سری سردی با ابعاد روزه ۱۰، ۱۵، ۲۵، ۳۰، ۴۲، ۵۳، ۸۴ و ۱۱۰ میلی‌متر استفاده گردید. نتایج آنالیز سردی نمونه مورد نظر در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- نتایج آنالیز سردی نمونه منیزیت

چشمه الک (mm)	درصد وزن باقیمانده (%)
+۸۴	۲۵/۶۶
-۸۴+۵۳	۲۵/۹۲
-۵۳+۴۲	۱۵/۰۴
-۴۲+۳۰	۱۴/۵۹
-۳۰+۲۵	۹/۷۱
-۲۵+۱۵	۵/۵۱
-۱۵+۱۰	۲/۹۶
-۱۰	۰/۵۹

۲-۲-۲- الگوریتم پردازش تصاویر

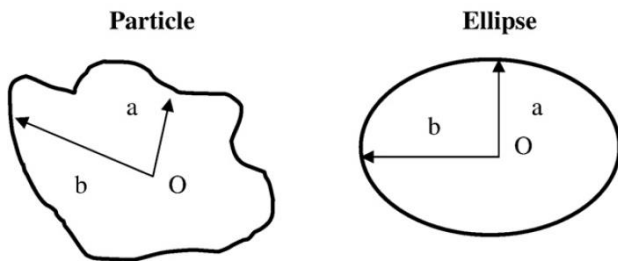
تصاویر به دست آمده به کمک الگوریتم‌های پردازش تصویر نوشته شده در نرم‌افزار Matlab مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. شکل ۲ الگوریتم پردازش تصویر استفاده شده در بررسی حاضر را نشان می‌دهد. در ابتدا تصویر رنگی به مقیاس خاکستری تبدیل شده و سپس از فیلتر میان به منظور هموارسازی و حذف نویز تصویر استفاده گردید. در مرحله بعد آستانه‌یابی با هدف باینری کردن تصویر انجام شد (شکل ۳). پس از باینری نمودن تصویر، قطرهای معادل مختلف از هر ذره موجود در تصویر استخراج گردید. با توجه به اینکه به منظور محاسبه برخی از شاخص‌های ابعادی از شبکه‌های عصبی استفاده شد، تعدادی تصاویر اضافی از فراکسیون‌های ابعادی

۲-۴- تبدیل سطح به حجم

به منظور تبدیل داده‌های دو بعدی (از سطح ذرات) به شکل سه بعدی (یعنی حجم معادل آنها) و در نهایت محاسبه توزیع وزنی ذرات در فراکسیون‌های ابعادی مختلف، کارآیی ۳ روش زیر مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت روش با کمترین خطا مورد استفاده قرار گرفت.

روش (۱): حجم معادل هر ذره (V) برابر با حجم بیضی است که قطر اصلی و فرعی آن به ترتیب دارای بیشترین و کمترین فاصله از مرکز جرم ذره تا لبه آن است [۳] (شکل ۵). حجم ذره را می‌توان از معادله زیر محاسبه نمود:

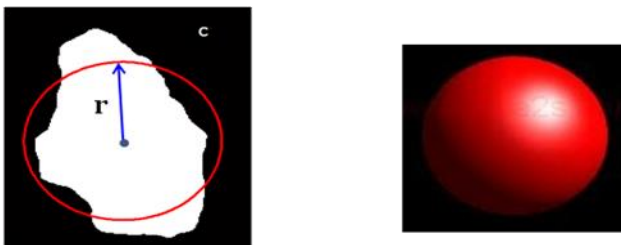
$$V = \frac{4}{3} \pi \cdot a^2 \cdot b \quad (2)$$



شکل ۵- بیضی معادل حجم ذره

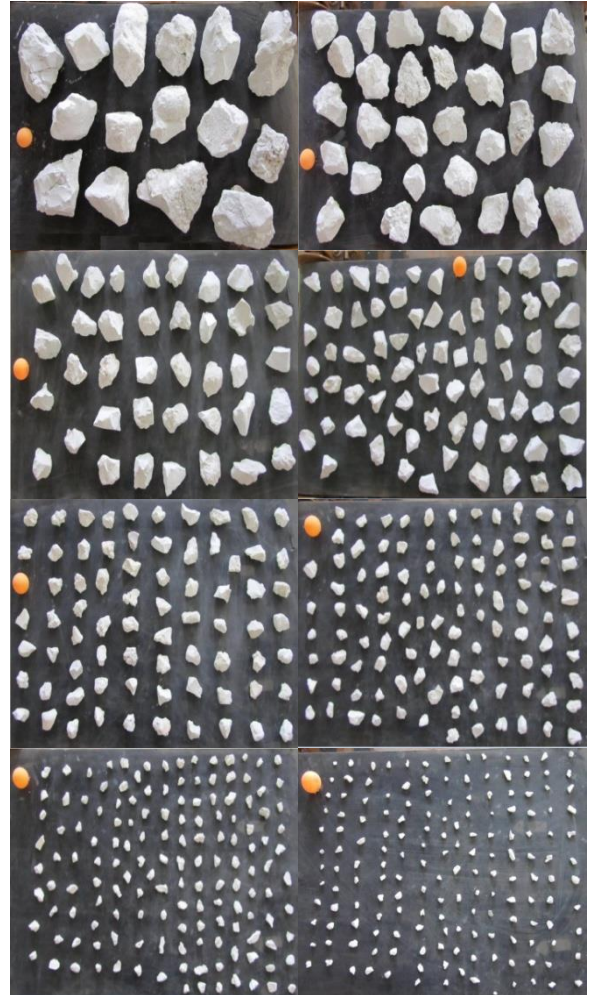
روش (۲): حجم ذره معادل با حجم کره‌ای با شعاعی معادل شعاع دایره مساحت معادل است (شکل ۶). حجم ذره را می‌توان از معادله زیر محاسبه نمود:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (3)$$



شکل ۶- کره حجم معادل ذره

روش (۳): Outal و همکارانش (در سال ۲۰۰۹) روشی را به منظور تعیین حجم ذره بر مبنای محاسبه قطر ماکزیمم دیسک محاطی (d) و مساحت کل ذره (A) مطابق رابطه زیر پیشنهاد نمودند [۷]:



شکل ۴- تصاویر نمونه منبذیت در فراکسیون‌های ابعادی مختلف

۲-۳- ارزیابی خطای تخمین

به منظور ارزیابی خطای هر تخمین و یا محاسبه میزان اختلاف هر روش از نتایج آنالیز سرندی (مقادیر واقعی) از شاخص جذر متوسط مجموع مربعات خطا (RMSE) مطابق رابطه زیر استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2} \quad (1)$$

X_i : درصد مواد مانده روی سرند در فراکسیون ابعادی i ام (مقادیر واقعی)

Y_i : درصد مواد مانده روی سرند در فراکسیون ابعادی i ام به دست آمده از پردازش تصویر (مقادیر پیش‌بینی شده)

N : تعداد فراکسیون‌های ابعادی

به وسیله تعداد محدودی از متغیرهای جدید توجیه شود. مراحل مختلف الگوریتم PCA استفاده شده در بررسی حاضر، که در محیط Matlab نوشته شد، به شرح زیر می‌باشند:

با فرض اینکه بردارهای x_1, x_2, \dots, x_M از مشخصه‌های تصویری باشند،

- محاسبه میانگین:

$$\bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i \quad (6)$$

- کم کردن میانگین از مقدار داده‌ها:

$$\varphi_i = x_i - \bar{x} \quad (7)$$

- تشکیل ماتریس $A = [\varphi_1 \ \varphi_2 \ \dots \ \varphi_M]$ و محاسبه ماتریس کواریانس C:

$$C = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \varphi_n \varphi_n^T = AA^T \quad (8)$$

در رابطه فوق AT ترانهاده ماتریس A است.

- محاسبه مقادیر ویژه $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_N$ C
- محاسبه بردارهای ویژه u_1, u_2, \dots, u_N C
- چون C متقارن است، هر بردار x یا در واقع $(x - \bar{x})$ را میتوان بعنوان ترکیب خطی از بردارهای ویژه نوشت:

$$x - \bar{x} = b_1 u_1 + b_2 u_2 + \dots + b_N u_N = \sum_{i=1}^N b_i u_i \quad (9)$$

- مرحله کاهش ویژگی (باقی ماندن داده‌های مربوط به بزرگترین مقادیر ویژه):

$$\text{where } K \ll N \quad x - \bar{x} = \sum_{i=1}^K b_i u_i \quad (10)$$

از ضابطه زیر به منظور محاسبه K استفاده شد:

$$\frac{\sum_{i=1}^K \lambda_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} > \text{Threshold (e.g. 0.9 or 0.95)} \quad (11)$$

۲-۶-۲- مدلسازی با شبکه عصبی

پس از بررسی شبکه‌های عصبی مختلف در محیط Matlab و بررسی کارایی تخمین هر یک، در نهایت یک شبکه چند

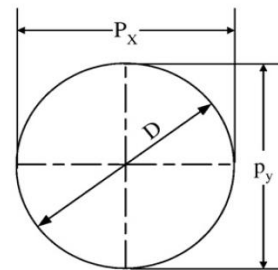
$$V = d.A.\sqrt{A} \quad (4)$$

۲-۵- کالیبراسیون

کالیبراسیون فرآیند تبدیل پیکسل‌های تصویر به واحدهای طولی مناسب است. در این بررسی از یک توپ تنیس با قطر معلوم ($D=40$ mm) به عنوان مقیاس و محاسبه مقادیر پیکسل‌ها در جهات عمودی (P_x) و افقی (P_y) استفاده شد (شکل ۷). فاکتورهای تبدیل مقیاس یا کالیبراسیون در جهات x و y از روابط زیر تعیین شدند [۸]:

$$R_x = \frac{D}{P_x} = \frac{40}{22} = 1.82(\text{mm / pixel})$$

$$R_y = \frac{D}{P_y} = \frac{40}{22} = 1.82(\text{mm / pixel}) \quad (5)$$



شکل ۷- نحوه محاسبه ضرایب کالیبراسیون

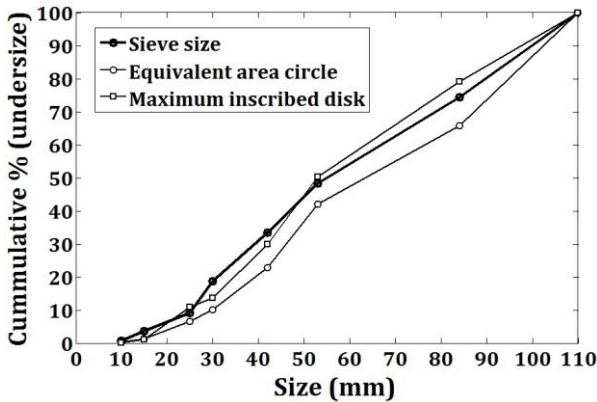
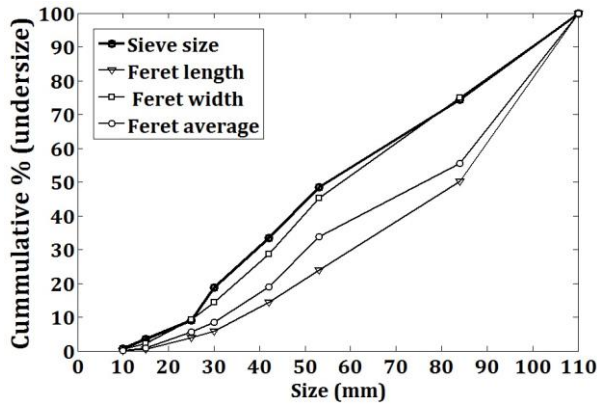
۲-۶- آنالیز مولفه‌های اصلی (PCA) و مدلسازی با شبکه عصبی

پس از جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی، از روش آنالیز مولفه‌های اصلی (PCA) به منظور کاهش ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر و از شبکه‌های عصبی هوشمند به منظور مدلسازی و تخمین توزیع ابعادی ذرات استفاده شد. در ادامه خلاصه‌ای از اصول روش PCA، الگوریتم استفاده شده در بررسی حاضر و در نهایت نوع شبکه‌ی عصبی بکار گرفته شده به منظور مدلسازی داده‌ها توضیح داده می‌شود.

۲-۶-۱- آنالیز مولفه‌های اصلی (PCA)

روش تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی تکنیکی است به منظور کاهش ابعاد داده‌ها و پیدا کردن ترکیبات خطی از متغیرهای اولیه همبسته که تشکیل یک دستگاه محور مختصات جدید را می‌دهند [۹]. این ترکیبات خطی، مؤلفه‌های اصلی نامیده می‌شود که بخش اعظمی از تغییرپذیری می‌تواند

منحنی‌های توزیع ابعادی ذرات تخمین زده شده توسط قطرهای معادل مختلف در مقایسه با نتایج آنالیز سرندی در شکل ۹ ارائه شده است. جدول ۳ نیز خطای هر قطر معادل در تخمین توزیع ابعادی ذرات را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج ارائه شده (i): تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین منحنی‌های توزیع ابعادی تخمین زده شده توسط شاخص‌های ابعادی مختلف وجود دارد، (ii): اکثر شاخص‌های ابعادی مقادیر توزیع ابعادی ذرات را بیش از اندازه واقعی تخمین می‌زنند، (iii): قطر کوچک بیضی مساحت معادل، عرض فرت، عرض بهترین مستطیل برآزش شده و قطر ماکزیمم دیسک محاطی به ترتیب بهترین شاخص‌ها به منظور توصیف ابعاد ذرات می‌باشند، (iv): به نظر می‌رسد بعد کوچک ذرات به اندازه روزنه سرند نزدیکتر است.



لایه‌ای پرسپترون شامل یک لایه ورودی (با چهار نرون)، دو لایه مخفی (به ترتیب با ۲۰ و ۱۲ نرون) و یک لایه خروجی (با یک نرون) برای این منظور انتخاب گردید. در شبکه توسعه داده شده از تابع تبدیل purelin برای تمامی لایه‌ها و از تابع trainlm به منظور آموزش شبکه استفاده شد.

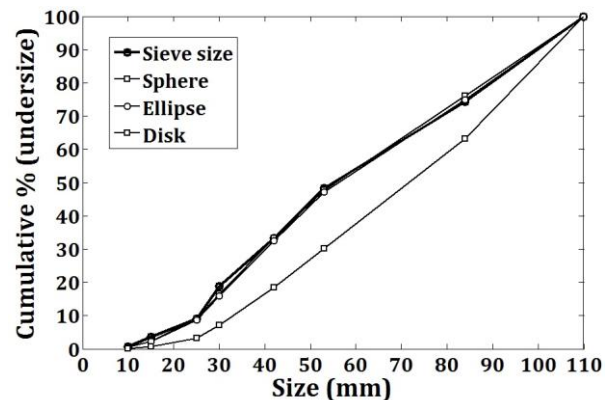
۳- ارائه یافته‌ها و بحث

۳-۱- تبدیل سطح به حجم

شکل ۸ نمودارهای تخمین توزیع ابعادی ذرات را با روش‌های مختلف تبدیل سطح به حجم در مقایسه با روش آنالیز سرندی نشان می‌دهد. مقادیر خطای مربوط به هر روش در جدول ۲ لیست شده است. مطابق با نتایج ارائه شده، روش تبدیل کره معادل دارای کمترین خطا و بهترین برآزش به نتایج آنالیز سرندی می‌باشد. بنابراین در این پژوهش به منظور تبدیل داده‌های سطح به حجم و در نتیجه محاسبه توزیع ابعادی وزنی ذرات، از روش کره معادل استفاده شد.

جدول ۲- مقادیر خطای روش‌های مختلف تبدیل سطح به حجم

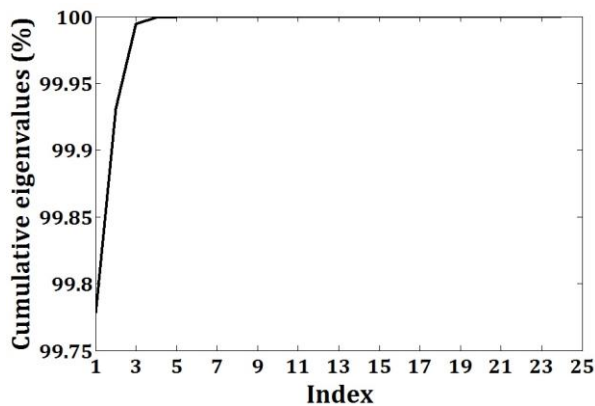
روشهای تبدیل سطح به حجم	خطا (%)
روش ۱ (بیضی معادل)	۱/۲۶
روش ۲ (کره معادل)	۱/۱۴
روش ۳ (دیسک محاطی)	۱۰/۳۷



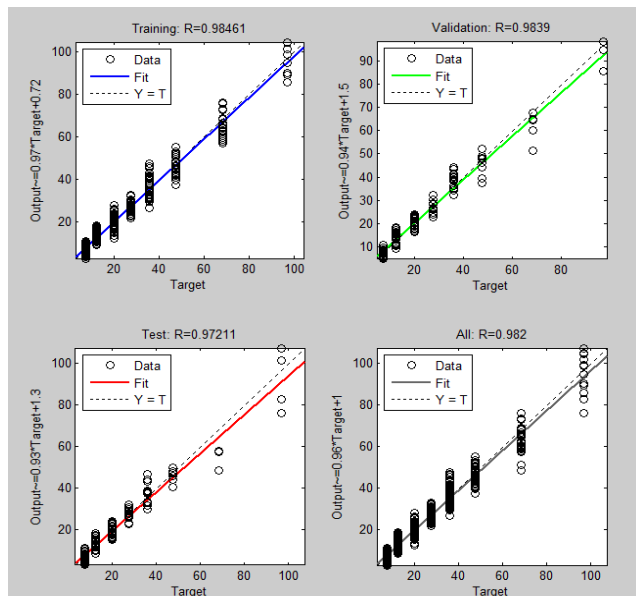
شکل ۸- کارایی روش‌های مختلف تبدیل سطح به حجم در تخمین توزیع ابعادی ذرات

۳-۲- تخمین توزیع ابعادی به کمک قطرهای معادل مختلف

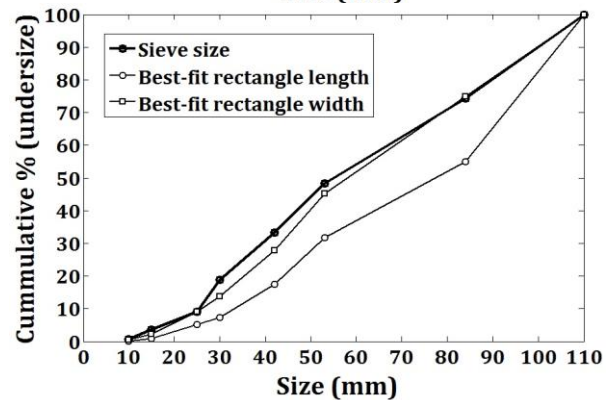
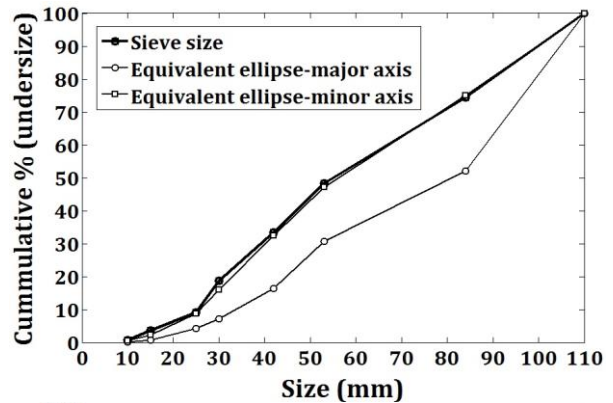
شد. در مجموع ۲۰ شاخص ابعادی استخراج شده از تصاویر ذرات برای آنالیز PCA استفاده شد. آنالیز PCA نشان داد که ۴ شاخص ابعادی به تنهایی قادرند بخش عمده تغییرات در داده‌ها را نشان دهند (شکل ۱۰). به عبارت دیگر نتیجه آنالیز PCA، کاهش ویژگی‌های ذرات از ۲۰ به ۴ ویژگی است. شکل ۱۱ نتایج آموزش و تست شبکه عصبی توسعه داده شده در محیط Matlab را نشان می‌دهد. نتایج تخمین توزیع ابعادی ذرات با PCA و شبکه عصبی در مقایسه با آنالیز سرندی در شکل ۱۲ ارائه شده است. جدول ۳ خطای تخمین مربوط به روش PCA و شبکه عصبی را نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده در شکل ۱۲ علاوه بر مقادیر RMSE گزارش شده در جدول ۳ نشان می‌دهند که تکنیک‌های PCA و شبکه عصبی ابزار مناسبی به منظور تخمین صحیح توزیع ابعادی ذرات می‌باشند.



شکل ۱۰- منحنی درصد تجمعی مقادیر ویژه مولفه‌ها



شکل ۱۱- نتایج رگرسیون داده‌های آموزش و تست شبکه عصبی در محیط Matlab



شکل ۹- منحنی‌های توزیع ابعادی قطرهای معادل مختلف در مقایسه با آنالیز سرندی

جدول ۳- مقادیر خطای تخمین قطرهای معادل و شبکه عصبی

خطا (%)	قطر معادل
۱۴/۶۳	بزرگترین قطر فرت
۲/۳۱	کوچکترین قطر فرت
۱۰/۳۲	متوسط فرت
۶	قطر دایره معادل
۱/۱۴	قطر کوچک بیضی مساحت معادل
۱۲/۴۸	قطر اصلی بیضی مساحت معادل
۳/۱۸	قطر بزرگترین دیسک محاطی
۱۱/۴۴	طول بهترین مستطیل
۲/۶۴	عرض بهترین مستطیل
۰/۷۶	PCA و شبکه عصبی

۳-۳- تخمین توزیع ابعادی ذرات با تکنیک‌های PCA و شبکه عصبی

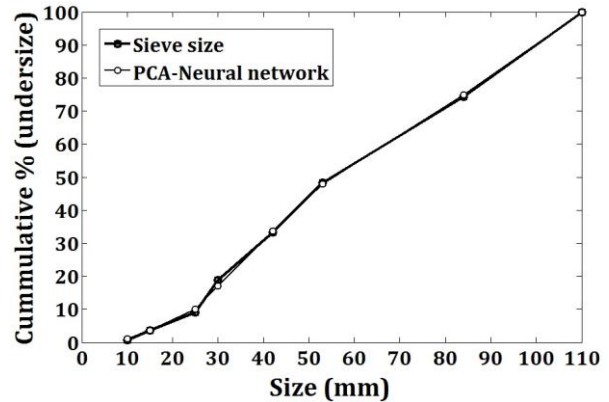
از تکنیک PCA به منظور کاهش ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر و از شبکه عصبی به منظور تخمین ابعاد ذرات استفاده

به ترتیب بهترین شاخص‌ها به‌منظور توصیف ابعاد ذرات می‌باشند. به نظر می‌رسد بعد کوچک ذرات به اندازه روزنه سرنند نزدیکتر است.

(۴) تلفیق تکنیک‌های PCA و شبکه عصبی به ترتیب به منظور کاهش ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر و مدلسازی داده‌ها منجر به بهبود قابل ملاحظه‌ای در نتایج تخمین توزیع ابعادی ذرات شد.

منابع

- [1] 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.
- [2] Al-Thyabat, S., Miles, N.J., Koh, T.S., 2007. *Estimation of the size distribution of particles moving on a conveyor belt*. Minerals Engineering 20, 72–83.
- [3] Liao, C.W., Tarng, Y.S., 2009. *On-line automatic optical inspection system for coarse particle size distribution*, Powder Technology 189, 508–513.
- [4] Al-Thyabat, S., Miles, N.J., 2006. *An improved estimation of size distribution from particle profile measurements*. Powder Technology 166, 152–160.
- [5] Andersson, T., Thurley, M.J., 2011. *Minimizing profile error when estimating the sieve-size distribution of iron ore pellets using ordinal logistic regression*, Powder Technology 206 (3), 218–226.
- [6] Wang, W., 2006. *Image analysis of particles by modified ferret method-best-fit rectangle*, Powder Technology 165 (1), 1–10.
- [7] Outal, S., Schleifer, J., Pirard, E., 2009. *Evaluating a calibration method for the estimation of fragmented rock 3d-size-distribution out of 2d images*, Rock Fragmentation by Blasting: Proceedings of the 9th Int. Symp. On rock fragmentation by blasting-fragblast 9, Sept. 2009, Granada Spain.
- [8] Liao, C.W., Yu, J.H., Tarng, Y.S., 2010. *On-line full scan inspection of particle size and shape using digital image processing*, Particuology 8, 286–292.
- [9] Jolliffe, T., 2002. *Principal Component Analysis, Statistical Theory and Methods*, Springer, 2nd edition.



شکل ۱۲- تخمین توزیع ابعادی ذرات با تکنیک‌های PCA و شبکه عصبی در مقایسه با آنالیز سرنندی

۴- نتیجه‌گیری

هدف از بررسی حاضر استفاده از تکنیک بینایی ماشین به‌منظور تخمین توزیع ابعادی ذرات بود. برای این منظور تست‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. در آزمایشگاه از یک نمونه منیزیت در شرایطی که ذرات هم‌پوشانی نداشته و جدا از هم بودند تصویربرداری شد و شاخص‌های مختلف ابعادی از تصاویر استخراج گردید. در مرحله بعد با روش آنالیز مولفه‌های اصلی (PCA)، تعداد ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر کاهش یافته و بهترین شاخص‌های ابعادی شناسایی گردید و در نهایت به کمک شبکه عصبی تخمین دقیقی از توزیع ابعادی ذرات بدست آمد. مهمترین نتایج بدست آمده از بررسی حاضر عبارتند از:

- (۱) تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین منحنی‌های توزیع ابعادی تخمین زده شده توسط شاخص‌های ابعادی مختلف وجود دارد.
- (۲) اکثر شاخص‌های ابعادی مقادیر توزیع ابعادی ذرات را بیش از اندازه واقعی تخمین می‌زنند.
- (۳) قطر کوچک بیضی مساحت معادل، عرض فرت، عرض بهترین مستطیل برآزش شده و قطر ماکزیمم دیسک محاطی