

## کاربرد آزمون‌های آماری در تحلیل نتایج به دست آمده از خردایش ذرات کالکوپیریت با آسیاهای مختلف

مهدی محسنی<sup>۱</sup>؛ محمود عبدالهی<sup>۲\*</sup> و سید محمدجواد کلینی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت آبان ۹۰، پذیرش اردیبهشت ۹۱)

### چکیده

در این مقاله روشی آماری برای تحلیل نتایج به دست آمده از پارامترهای هندسی ذرات کالکوپیریت خردشده با آسیاهای مختلف ارائه شده است. این مطالعات با هدف بررسی اثر مکانیزم خردایش در آسیاکنی بر هندسه‌ی ذرات کالکوپیریت انجام شده است. هندسه‌ی ذرات کالکوپیریت خردشده توسط آسیاهای میله‌ای، گلوله‌ای و سرامیکی، با استفاده از تکنیک آنالیز تصاویر و توسط نرم‌افزار Image J تعیین شد. پارامترهای هندسی با فاکتورهای شکل مثل کشیدگی، گردی، گرد شدگی، تحدب و فاکتور نظم توصیف شده‌اند. برای اطمینان از آنکه اختلاف در مکانیزم خردایش توانسته است تغییراتی را در هندسه‌ی ذرات ایجاد کند از روش آنالیز واریانس و آزمون‌های مقایسه‌ای چندگانه استفاده شد، مطالعات آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، در سطح اعتماد ۹۵٪ هندسه‌ی ذرات در محصول آسیاها در اکثر بخش‌های ابعادی با هم اختلاف دارند و اختلاف در مکانیزم خردایش در آسیاهای میله‌ای، گلوله‌ای و سرامیکی بر خصوصیات هندسی ذرات خردشده اثرگذار است. افزایش نقش مکانیزم سایش در خردایش مواد در آسیا فاکتورهای گردی، تحدب و گرد شدگی را در ذرات افزایش می‌دهد، به گونه‌ای که آسیای سرامیکی محصولی گردتر و آسیای میله‌ای محصولی با کشیدگی بیشتر تولید می‌کنند.

### کلمات کلیدی

کالکوپیریت، آزمون‌های آماری، مکانیزم خردایش، آسیاکنی، هندسه‌ی ذرات، آنالیز تصویر

## ۱- مقدمه

خردایش یکی از مهم‌ترین مراحل در فرایندهای کانه‌آرایی، متالورژیکی، صنایع شیمیایی و پودر است، در فرایندهای کانه‌آرایی از آن جهت که کاهش اندازه‌ی ذرات، کانی‌های بارزش را از باطله جدا کرده و این امر می‌تواند کیفیت جدایش مواد را تحت تأثیر قرار دهد، خردایش مواد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. رفتار سیستم‌های مورد استفاده در فرایندهای فراوری مواد، متأثر از خصوصیات فیزیکی ذرات مثل اندازه، شکل، مساحت سطحی و خصوصیات ساختاری است. ترکیبات و ساختار سطحی بر رفتار کانی‌ها در سیستم‌هایی که جدایش در آن‌ها بر پایه‌ی اختلاف در خصوصیات سطحی بنا شده است تأثیر آشکاری خواهد داشت [۱].

پارامترهای هندسی می‌تواند بسیاری از فرایندهایی که روی پودرها انجام می‌گیرد را تحت تأثیر قرار دهند، هندسه‌ی ذره بر عملکرد فیزیکی و شیمیایی سطح آن تأثیرگذار است، این امر اهمیت ارزیابی اثر هندسه‌ی ذرات بر فرایندهای مختلف را نشان می‌دهد، هندسه‌ی ذره به عنوان یک پارامتر مهم در پیشگویی رفتار پودر تحت تأثیر محیط‌های مختلف، مانند خردایش، واکنشی، شناور شوندگی و آگلومراسیون تأثیر دارد، هندسه‌ی ذرات در بسیاری از صنایع مصرف‌کننده‌ی پودر نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، از جمله‌ی این صنایع می‌توان به صنایع داروسازی، ساخت رنگ‌دانه‌ها، سرامیک‌سازی و ... اشاره کرد. [۲].

در طراحی دستگاه‌های خردایش در فراوری مواد معدنی از اصول ساده‌ی مکانیک سنگ استفاده می‌شود، مکانیزم‌های مختلف اعمال نیرو در این دستگاه‌ها متناسب با خصوصیات خوراک ورودی به دستگاه و خصوصیات محصول مورد نیاز به کار گرفته می‌شود تا محصول مورد نظر در نتیجه‌ی خردایش حاصل شود. ضربه، سایش، تراکم، کشش و برش مکانیزم‌هایی هستند که در خردایش مواد معدنی از آن‌ها استفاده می‌شود [۳].

عموماً مکانیزم‌های سایش و ضربه، بسته به روش آسیابانی در خرد شدن ذرات توسط آسیاب‌ها تأثیرگذار هستند. در روش‌های مختلف ترکیبی از این مکانیزم‌ها بر کاهش ابعاد ذرات تأثیر دارند. به کارگیری مکانیزم‌های مختلف در خردایش مواد علاوه بر تغییر در توزیع ابعادی محصول خردایش می‌تواند خصوصیات هندسی و مورفولوژیکی محصول را تغییر دهد [۴]. این اختلاف در مکانیزم خردایش محصولی با هندسه‌های مختلف تولید می‌کند.

بررسی اثر هندسه‌ی ذرات بر کارایی روش‌های پر عیار سازی مواد معدنی چندی است که مورد توجه قرار گرفته‌اند و از آنجایی که روش فلوتاسیون یکی از روش‌های پر عیار سازی مواد معدنی است که بر پایه‌ی اختلاف در خاصیت آب‌گریزی سطح ذرات بنا شده است لذا بررسی تأثیر هندسه‌ی ذرات بر فلوتاسیون آن‌ها در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۵][۶][۷][۸]. کورسان<sup>۱</sup> و همکارش [۶] در سال ۲۰۰۶ با هدف بررسی این تأثیر اقدام به شناورسازی مواد خردشده در محیط‌های مختلف خردایش، توسط سلول فلوتاسیون ستونی نمودند. آن‌ها تالک خردشده در آسیای گلوله‌ای و میله‌ای را بعد از آماده‌سازی در شرایط یکسان، در سلول فلوتاسیون ستونی شناور ساختند. نتایج این آزمایش‌ها اختلاف حدود ۱۸ درصدی در بازیابی میانگین محصول آسیاب‌ها نسبت به یکدیگر را نشان داده است، دلیل این اختلاف در بازیابی را در تفاوت خصوصیات هندسی و مورفولوژیکی ذرات در محصول آسیاب‌ها دانسته‌اند. نتایج این مطالعات نشان داده است ذرات تالک با کشیدگی و تخت شدگی بیشتر بازیابی بیشتری را از خود نشان داده‌اند. اولوسوی، یکلر<sup>۲</sup> و همکارانشان [۲][۷][۹][۱۰] در تحقیقاتی که با هدف بررسی تأثیر خصوصیات هندسی بر قابلیت تر شوندگی کانی‌های صنعتی انجام داده‌اند دریافتند، کانی‌هایی مانند کوارتز کلسیت و باریت در نتیجه‌ی خردایش در آسیاب‌های گلوله‌ای و میله‌ای رفتار تر شوندگی متفاوتی را از خود نشان می‌دهند.

در تحقیقاتی که تاکنون در زمینه‌ی هندسه‌ی ذرات انجام پذیرفته است، مقادیر میانگین ارائه‌شده برای هر یک از پارامترهای هندسی در محیط‌های خردایش آن‌چنان به هم نزدیک هستند که معناداری اختلاف در هندسه‌ی ذرات با تردید روبرو می‌شود اما در تمامی این مطالعات این اختلاف‌های اندک در مقادیر میانگین معنادار در نظر گرفته‌شده و نتایج به دست آمده مورد استفاده قرار گرفته‌اند، با توجه به آنکه مطالعات در این زمینه رو به پیشرفت است، ارائه‌ی روشی استاندارد برای مقایسه‌ی نتایج به دست آمده برای هر پارامتر هندسی بیش از پیش احساس می‌شود. در این مقاله یک روش آماری استاندارد نیز برای تشخیص معناداری این اختلاف‌ها ارائه‌شده است.

## ۲- مواد و روش و تجهیزات

## ۲-۱- نمونه

نمونه‌ی کالکوپیریت دانه درشت مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها از معدن مس مزرعه واقع در استان آذربایجان

گلوله‌ای، میله‌ها و گلوله‌های فولادی به عنوان بار خردکننده و در آسیای سرامیکی از گلوله‌های سرامیکی به عنوان بار خردکننده استفاده شد. آسیای سرامیکی به گونه‌ای عمل می‌کند که بیشتر ذرات را با مکانیزم سایش خرد می‌کند و نقش مکانیزم ضربه در کنار مکانیزم سایش در آسیای گلوله‌ای افزایش می‌یابد، اما آسیای میله‌ای بیشتر ذرات را تحت تأثیر مکانیزم ضربه خرد می‌کند و در مقایسه با آسیای گلوله‌ای مکانیزم سایش نقش کمتری را در خردایش ایفا می‌کند. خصوصیات آسیاهای مورد استفاده در جدول (۱) به طور خلاصه آورده شده است.

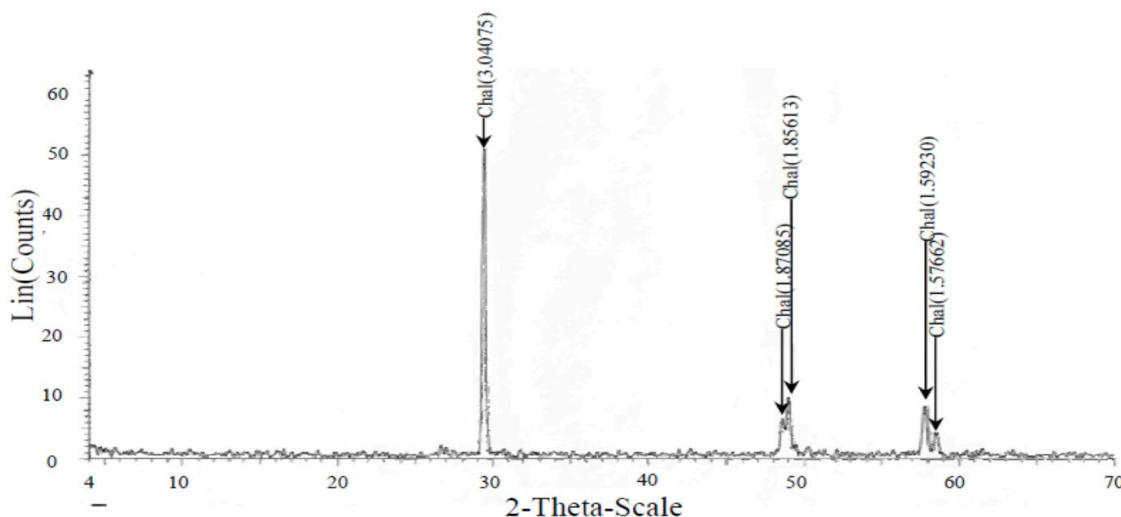
### ۳-۲- هندسه‌ی ذرات

عموماً برای توصیف هندسه‌ی ذرات از واژه‌های کیفی استفاده می‌شود، اما تعاریف کیفی از هندسه‌ی ذرات نمی‌تواند معیار مناسبی برای توصیف هندسه‌ی ذرات و مقایسه‌ی پارامترهای هندسی آن‌ها باشد. در این مقاله برای توصیف پارامترهای هندسی ذرات از توصیف‌های کمی استفاده شده است. جدول (۲) پارامترهای هندسی مورد استفاده برای توصیف هندسه‌ی ذرات را نشان می‌دهد.

شرقی تهیه و پس از سنگ‌شکنی فکی و غلطکی تا ابعاد ۱۰۰۰- میکرون برای خوراک دهی به آسیاها خرد شد. محصول به دست آمده از هر یک از آسیاها جهت به دست آوردن کالکوپیریت با خلوص مناسب، با درصد جامد ۱۵، ۱۰ گرم بر تن کلکتور اتیل گزنات، دور روتور ۱۰۰۰ دور بر تن دقیقه، pH=۱۰/۵-۱۱، زمان ماند ۵ دقیقه و با ۱۰۰ گرم بر تن MIBC به عنوان کف‌ساز به روش فلوتاسیون پر عیار گردید. شکل (۱) نتایج آنالیز XRD نمونه را پس از خالص‌سازی نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود تنها کانی موجود در نمونه کالکوپیریت است و درصد سایر کانی‌ها در محصول به دست آمده ناچیز است. بر اساس نتایج آنالیز جذب اتمی، عیار مس در خوراک فلوتاسیون ۵/۴ درصد و در کنسانتره ۳۱/۵ درصد به دست آمد. مجموع نتایج عیارسنجی و آنالیز XRD خلوص مناسب پودر کالکوپیریت (۹۱ درصد) را برای انجام مطالعات نشان می‌دهد.

### ۲-۲- آسیا کنی

به منظور بررسی اثر مکانیزم‌های مختلف خردایش بر هندسه‌ی ذرات کالکوپیریت از آسیاهای میله‌ای، گلوله‌ای و سرامیکی آزمایشگاهی استفاده شد، در آسیای میله‌ای و



شکل ۱: نتایج XRD از نمونه‌ی کالکوپیریت تهیه‌شده از معدن مس مزرعه، پس از خالص‌سازی (پیک‌های کالکوپیریت مشخص شده است)

نصب‌شده روی این میکروسکوپ دارای سنسور حساس CCD با کیفیت تصویر ۱۰ مگاپیکسل است. مجموعه‌ی میکروسکوپ و سیستم عکس‌برداری توسط لنز واسط<sup>۳</sup> به یکدیگر متصل می‌شوند (شکل ۲-الف).

تصاویر میکروسکوپی با تفکیک قسمتی از نمونه در بخش‌های ابعادی مختلف با استفاده از تجهیزات اشاره شده

### ۴-۲- تهیه‌ی تصاویر

تصاویر مناسب برای تعیین خصوصیات هندسی ذرات با استفاده از میکروسکوپ نوری کروم مدل MBL و دوربین المپیوس مدل EA510 تهیه گردید. این میکروسکوپ مجهز به لنز شیئی پلان است که در تهیه‌ی تصاویر با وضوح یکسان در تمام سطح بسیار تأثیرگذار است، همچنین دوربین

تهیه گردید، نمونه‌ی مورد نظر در محفظه‌ی مخصوص نمونه ریخته و پس از قرار دادن محفظه در گیره‌ی مخصوص، مجموعه‌ی نمونه و محفظه، توسط پیچ‌های مخصوص جابجایی، زیر لنز شیئی به گونه‌ای حرکت داده می‌شود که از تمامی مقطع پودر عکس تهیه شود، شکل ۲- ب و ج، این مجموعه را به همراه نمونه‌ای از تصاویر مورد استفاده در

مطالعات نشان می‌دهد. به منظور افزایش دقت، نمونه‌ی پودر ۲ تا ۳ مرتبه تعویض و عکس‌برداری مطابق روال اشاره شده انجام پذیرفت. مجموعه‌ی عکس‌های تهیه‌شده توسط نرم‌افزار مورد پردازش و آنالیز قرار گرفت برای هر طبقه‌ی ابعادی تا حدود ۷۰۰ ذره مورد پردازش و آنالیز قرار گرفت.

جدول ۱: مشخصات آسیاهای گلوله‌ای و میله‌ای و سرامیکی مورد استفاده در آزمایش‌ها

| نوع آسیا       | ویژگی                              | مقدار                   |
|----------------|------------------------------------|-------------------------|
| آسیای گلوله‌ای | حجم (سانتی متر مکعب)               | ۷۸۵۴                    |
|                | قطر (سانتی متر)                    | ۲۰                      |
|                | طول (سانتی متر)                    | ۲۰                      |
|                | سرعت چرخش (دور بر دقیقه)           | ۸۶                      |
|                | قطر گلوله (میلی متر) / تعداد گلوله | ۱۳/۱۰، ۱۲/۱۹، ۱۳، ۲۵/۳۰ |
|                | وزن گلوله‌ها (گرم)                 | ۵۶۷۰                    |
|                | ابعاد بار اولیه (میکرون)           | -۱۰۰۰+۲۵۰               |
|                | وزن مواد (گرم)                     | ۳۶۵                     |
|                | زمان آسیا کنی (دقیقه)              | ۵                       |
|                | حجم (سانتی متر مکعب)               | ۶۷۷۶                    |
| آسیای میله‌ای  | قطر (سانتی متر)                    | ۱۵/۷                    |
|                | طول (سانتی متر)                    | ۳۵                      |
|                | سرعت چرخش (دور بر دقیقه)           | ۸۶                      |
|                | طول × قطر (میلی متر) / تعداد میله  | ۷/۲۵ × ۳۰۰              |
|                | وزن میله‌ها (گرم)                  | ۷۷۰۰                    |
|                | ابعاد بار اولیه (میکرون)           | -۱۰۰۰+۲۵۰               |
|                | وزن مواد (گرم)                     | ۴۶۰                     |
|                | زمان آسیا کنی (دقیقه)              | ۵                       |
|                | حجم (سانتی متر مکعب)               | ۷۸۵۴                    |
|                | قطر (سانتی متر)                    | ۲۰                      |
| آسیای سرامیکی  | طول (سانتی متر)                    | ۲۰                      |
|                | سرعت چرخش (دور بر دقیقه)           | ۸۶                      |
|                | قطر گلوله (میلی متر) / تعداد گلوله | ۴۰/۲۵                   |
|                | وزن گلوله‌ها (گرم)                 | ۲۵۰۰                    |
|                | ابعاد بار اولیه (میکرون)           | -۱۰۰۰+۲۵۰               |
|                | وزن مواد (گرم)                     | ۳۶۵                     |
|                | زمان آسیا کنی (دقیقه)              | ۱۰                      |
|                | حجم (سانتی متر مکعب)               | ۷۸۵۴                    |
|                | قطر (سانتی متر)                    | ۲۰                      |
|                | طول (سانتی متر)                    | ۲۰                      |

## ۲-۵- پردازش تصاویر

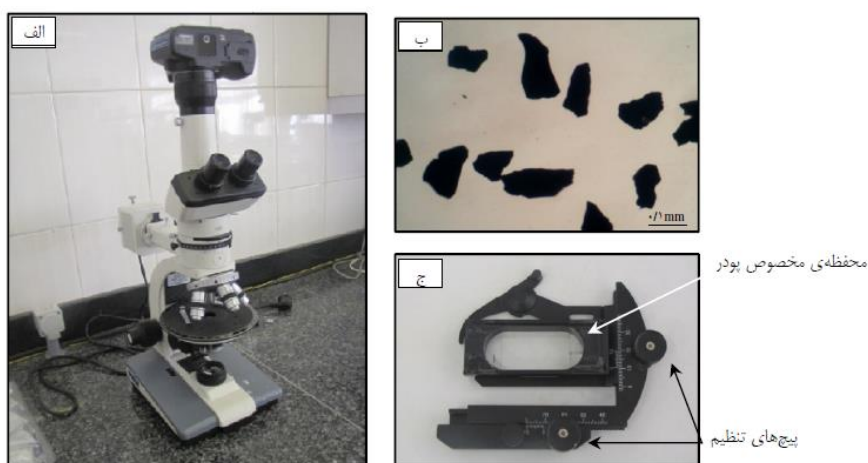
نرم‌افزار ImageJ یک نرم‌افزار پیشرفته‌ی پردازش و آنالیز تصاویر است، این نرم‌افزار ابزار قدرتمندی را برای پردازش تصاویر و آنالیز آن‌ها در اختیار کاربر قرار می‌دهد، همچنین

قابلیت‌های فراوانی برای اندازه‌گیری پارامترهای هندسی ذرات داشته و در بخشی از این نرم‌افزار تمامی ابزار لازم برای تعیین پارامترهای هندسی ذرات در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. تمامی

امور مربوط به پردازش و آنالیز تصاویر با استفاده از این نرم‌افزار انجام شد.

جدول ۲: پارامترهای هندسی و تعاریف ریاضی آن‌ها

| پارامتر    | تعریف                        | شرح                                                         | مرجع |
|------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------|------|
| کشیدگی     | $\frac{L}{W}$                | $L$ = طول ذره، $W$ = عرض ذره                                | [۱۱] |
| گردی       | $\frac{4\pi A}{P^2}$         | $A$ = مساحت ذره، $P$ = محیط ذره                             | [۲]  |
| گرد شدگی   | $\frac{4A}{\pi D_{Feret}^2}$ | $A$ = مساحت ذره، $D_{Feret}$ = قطر Feret                    | [۱۲] |
| تحدب       | $\frac{CH}{P}$               | $CH$ = محیط چندضلعی محیط بر ذره، $P$ = محیط ذره             | [۱۲] |
| فاکتور نظم | $\frac{d}{D}$                | $D$ و $d$ به ترتیب قطر دایره‌های محیطی و محاطی منطبق با ذره | [۱۳] |



شکل ۲: الف) میکروسکوپ و سیستم عکس‌برداری ب) نمونه‌ای از تصاویر میکروسکوپی تهیه‌شده از پودر ج) محفظه و گیره‌ی مخصوص برای جابه‌جایی نمونه‌ی پودری زیر میکروسکوپ (ابعاد ۱۰۶+۱۵۰- میکرون)

میانگین‌های به دست آمده برای پارامترهای هندسی ذرات، استفاده کرد.

آنالیز تحلیل واریانس در حالتی که برای مقایسه‌ی مقادیر میانگین سه دسته داده یا بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد، تنها نشان می‌دهد که آیا نمونه‌ها از نظر آماری با هم اختلاف دارند یا خیر اما در صورتی که اختلاف‌ها معنادار باشند معلوم نیست که اختلاف بین کدام جفت از میانگین‌ها معنادار است. آزمون‌های متفاوت آماری نیز وجود دارند که امکان بررسی مقایسه‌ای چندگانه را فراهم می‌آورند. این آزمون‌ها با دو فرض برابری واریانس‌ها و عدم برابری واریانس‌ها دسته‌بندی می‌شوند.

در این مقاله با توجه به امکان بروز هر دو حالت برابری واریانس‌ها و عدم برابری واریانس برای مقایسه‌ی جفتی داده‌ها

## ۲-۶- آزمون‌های فرضیه‌های مقایسه‌ای برای داده‌های پارامتری

در مباحث آماری برای بررسی معناداری اختلاف میانگین دو یا چند دسته داده از آزمون‌های خاصی استفاده می‌شود، در این مقاله جهت مقایسه‌ی مقادیر میانگین به دست آمده برای پارامترهای و بررسی معناداری اختلاف این میانگین‌ها، از روش آزمون‌های فرضیه‌های مقایسه‌ای استفاده شد.

آزمون F، تحلیل واریانس یک طرفه، برای بررسی تفاوت میانگین یک متغیر در بین بیش از دو گروه (۳ گروه یا بیشتر) به کار می‌رود. به کمک این آزمون می‌توان مقایسه‌های چند گانه را بین گروه‌های مختلف انجام داد. این آزمون در تحلیل نتایج به دست آمده از پردازش و آنالیز تصاویر کاربرد دارد، به گونه‌ای که از آن می‌توان در بررسی معناداری اختلاف در

برای تعیین اینکه آیا خصوصیات هندسی ذرات خردشده با سه روش فوق با یکدیگر اختلاف معناداری دارند یا خیر، مقادیر میانگین برای هر فاکتور شکل، با استفاده از روش آنالیز یک‌طرفه ANOVA (آنالیز واریانس) و آزمون‌های Bonferroni و Games-Howell برای مقایسه‌های چندگانه با سطح معناداری ۰/۰۵ با هم مقایسه شد.

### ۳-۱- استفاده از آزمون F

جدول (۴) نتایج آنالیز یک‌طرفه واریانس را برای داده‌ها نشان می‌دهد، وقتی مقدار به دست آمده برای سطح معناداری (Sig.) کمتر از ۰/۰۵ باشد برای آن مقایسه، مقادیر میانگین گروه‌ها اختلاف معناداری در سطح اعتماد ۹۵٪ با هم دارند [۱۵]، بر این اساس و همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر میانگین به دست آمده برای میانگین فاکتورهای شکل در محصول تمامی آسیاها اختلاف معناداری با یکدیگر دارند.

از آزمون Bonferroni برای حالت برابری واریانس دو گروه و از آزمون Games-Howell برای حالت عدم برابری واریانس‌ها استفاده شده است، این دو آزمون با توجه به شرایط گروه داده‌ها، برای تجزیه و تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴]. در این مقاله کلیه محاسبات آماری توسط نرم‌افزار SPSS انجام پذیرفت.

### ۳-۲ نتایج

پس از تهیه و آنالیز تصاویر، نتایج به دست آمده از پردازش و آنالیز تصاویر میکروسکوپی برای انجام تحلیل‌های آماری به نرم‌افزار SPSS منتقل شد، جدول (۳) مقادیر میانگین به دست آمده برای پارامترهای هندسی ذرات در بخش ابعادی ۱۵۰+۱۰۶- میکرون، برای آسیاهای میله‌ای، گلوله‌ای و سرامیکی را بعد از پردازش و آنالیز تصاویر نشان می‌دهد.

جدول ۳: مقادیر میانگین به دست آمده برای پارامترهای هندسی ذرات در بخش ابعادی ۱۵۰+۱۰۶- میکرون

| ابعاد<br>(میکرون) | خردایش         | کشیدگی  |              | گردی    |              | گرد شدگی |              | تحدب    |              | فاکتور نظم |              |
|-------------------|----------------|---------|--------------|---------|--------------|----------|--------------|---------|--------------|------------|--------------|
|                   |                | میانگین | انحراف معیار | میانگین | انحراف معیار | میانگین  | انحراف معیار | میانگین | انحراف معیار | میانگین    | انحراف معیار |
| ۱۵۰+۱۰۶           | آسیای گلوله‌ای | ۱/۴۷۵۷  | ۰/۳۲۸۱۵      | ۰/۵۹۸۸  | ۰/۰۸۰۳۶      | ۰/۵۷۹۹   | ۰/۱۱۴۴۱      | ۰/۸۶۵۳  | ۰/۰۴۱۴۶      | ۰/۴۹۹۴     | ۰/۱۱۶۷۲      |
|                   | آسیای میله‌ای  | ۱/۵۵۳۱  | ۰/۳۶۴۴۶      | ۰/۵۷۷۷  | ۰/۰۸۴۷۵      | ۰/۵۵۶۲   | ۰/۱۲۰۷۳      | ۰/۸۵۶۴  | ۰/۰۴۵۶۴      | ۰/۴۷۳      | ۰/۱۲۴۴۳      |
|                   | آسیای سرامیکی  | ۱/۳۶۸۴  | ۰/۲۴۴۸۶      | ۰/۶۵۶۲  | ۰/۰۵۷۹۸      | ۰/۶۲۴۶   | ۰/۰۹۶۸۱      | ۰/۸۸۹   | ۰/۰۲۳۸۵      | ۰/۵۴۲      | ۰/۰۹۵۵۵      |

جدول ۴: نتایج آنالیز یک‌طرفه واریانس

|            |              | متوسط<br>مربعات | Df  | مجموع<br>مربعات | Sig.  | F      |
|------------|--------------|-----------------|-----|-----------------|-------|--------|
| کشیدگی     | بین گروه‌ها  | ۳/۰۲۷           | ۲   | ۶/۰۵۳           | ۰/۰۰۰ | ۲۶/۳۰۵ |
|            | درون گروه‌ها | ۰/۱۱۵           | ۷۴۶ | ۸۵/۸۳۴          |       |        |
|            | مجموع        |                 | ۷۴۸ | ۹۱/۸۸۷          |       |        |
| گردی       | بین گروه‌ها  | ۰/۳۸۸           | ۲   | ۰/۷۷۷           | ۰/۰۰۰ | ۴۱/۷۰۰ |
|            | درون گروه‌ها | ۰/۰۰۹           | ۷۴۶ | ۶/۹۳۲           |       |        |
|            | مجموع        |                 | ۷۴۸ | ۷/۷۰۹           |       |        |
| گرد شدگی   | بین گروه‌ها  | ۰/۲۸۷           | ۲   | ۰/۵۷۴           | ۰/۰۰۰ | ۱۸/۱۹۴ |
|            | درون گروه‌ها | ۰/۰۱۶           | ۷۴۶ | ۱۱/۷۶۳          |       |        |
|            | مجموع        |                 | ۷۴۸ | ۱۲/۳۳۷          |       |        |
| تحدب       | بین گروه‌ها  | ۰/۰۴۸           | ۲   | ۰/۰۹۶           | ۰/۰۰۰ | ۷/۷۵۱  |
|            | درون گروه‌ها | ۰/۰۰۶           | ۷۴۶ | ۴/۶۰۷           |       |        |
|            | مجموع        |                 | ۷۴۸ | ۴/۷۰۳           |       |        |
| فاکتور نظم | بین گروه‌ها  | ۰/۲۸۴           | ۲   | ۰/۵۶۹           | ۰/۰۰۰ | ۱۸/۱۷۶ |
|            | درون گروه‌ها | ۰/۰۱۶           | ۷۴۶ | ۱۱/۶۶۸          |       |        |
|            | مجموع        |                 | ۷۴۸ | ۱۲/۲۳۷          |       |        |

در جدول (۶) هرگاه مقدار ستون معناداری آزمون (Sig.) کوچک‌تر از ۰/۰۵ باشد آنگاه در سطح اعتماد ۹۵٪ مقادیر اختلاف در میانگین‌ها معنادار در نظر گرفته می‌شود و گروه‌های مقایسه شده از نظر آماری متفاوت در نظر گرفته می‌شوند، همین نتایج را با مقایسه‌ی علامت دو ستون آخر مربوط به حد پایین و بالای فاصله‌ی اطمینان ۹۵٪ نیز می‌توان به دست آورد؛ به گونه‌ای که اگر اعداد مربوط به این دو ستون برای یک مقایسه هم علامت باشند آنگاه اختلاف در مقادیر میانگین معنادار در نظر گرفته شده و در غیر این صورت اختلاف‌ها معنادار در نظر گرفته نمی‌شوند

نتایج به دست آمده از مقایسه‌ی جفتی مقادیر میانگین‌های به دست آمده برای فاکتورهای هندسی ذرات کالکوپیریت در جدول (۶) نشان می‌دهد، هندسه‌ی ذرات خرد شده با آسیاهای میله‌ای، گلوله‌ای و سرامیکی از نظر آماری کاملاً با هم متفاوت هستند و مقادیر اختلاف در میانگین‌ها برای اکثر فاکتورهای هندسی در سطح اعتماد ۹۵٪ معنادار هستند. تنها محصول آسیای گلوله‌ای و سرامیکی در مقدار فاکتور تحدب با هم اختلاف معناداری ندارند.

همانطور که اشاره شد معناداری در این اختلاف‌ها با توجه به نتایج این آزمون نمی‌تواند برای مقایسه‌ی جفتی میان آسیاها مورد استفاده قرار گیرد، لذا بایستی از آزمون‌های مقایسه‌ای چندگانه استفاده کرد.

آزمون‌های مقایسه‌ای چندگانه برای دو حالت برابری و عدم برابری واریانس‌ها ارائه شده‌اند و می‌بایست قبل از استفاده از آزمون با استفاده از آماره‌ی لون برابری و عدم برابری واریانس‌ها مورد بررسی قرار گیرد. جدول (۵) نتایج آزمون لون را برای بررسی وضعیت واریانس‌ها نشان می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود مقدار معناداری (Sig.) آزمون لون برای فاکتورهای گرد شدگی و تحدب بزرگ‌تر از ۰/۰۵ است، به بیان دیگر برای این دو فاکتور مقادیر واریانس برابر بوده و مقادیر واریانس‌ها اختلاف معناداری با هم ندارند و لذا برای مقایسه‌ی این فاکتورها می‌بایست از آزمون‌ها با شرط برابری واریانس‌ها استفاده کرد، برای سایر فاکتورهای هندسی شرط عدم برابری واریانس‌ها صادق بوده ( $\text{Sig.} < 0.05$ ) و برای مقایسه‌های چندگانه می‌بایست از آزمون‌ها با شرط عدم برابری واریانس‌ها استفاده کرد. جدول (۶) نتایج آزمون‌های Bonferroni و Games-Howell را برای پارامترهای هندسی مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۵: نتایج آزمون لون برای بررسی وضعیت اختلاف واریانس‌ها

| معناداری (Sig.) | واریانس | محیط خردایش    | آماره‌ی لون | فاکتور شکل |
|-----------------|---------|----------------|-------------|------------|
| ۰/۰۰۰           | ۰/۱۰۸   | آسیای گلوله‌ای | ۲۳/۱۲۰      | کشیدگی     |
|                 | ۰/۱۳۳   | آسیای میله‌ای  |             |            |
|                 | ۰/۰۶    | آسیای سرامیکی  |             |            |
| ۰/۰۳۴           | ۰/۰۰۶   | آسیای گلوله‌ای | ۳/۴۰۳       | گردی       |
|                 | ۰/۰۰۷   | آسیای میله‌ای  |             |            |
|                 | ۰/۰۰۳   | آسیای سرامیکی  |             |            |
| ۰/۰۶۶           | ۰/۰۱۳   | آسیای گلوله‌ای | ۲/۷۲۶       | گرد شدگی   |
|                 | ۰/۰۱۵   | آسیای میله‌ای  |             |            |
|                 | ۰/۰۰۹   | آسیای سرامیکی  |             |            |
| ۰/۵۰۹           | ۰/۰۰۲   | آسیای گلوله‌ای | ۰/۶۷۵       | تحدب       |
|                 | ۰/۰۰۲   | آسیای میله‌ای  |             |            |
|                 | ۰/۰۰۱   | آسیای سرامیکی  |             |            |
| ۰/۰۲۳           | ۰/۰۱۴   | آسیای گلوله‌ای | ۳/۸۱۲       | فاکتور نظم |
|                 | ۰/۰۱۵   | آسیای میله‌ای  |             |            |
|                 | ۰/۰۰۹   | آسیای سرامیکی  |             |            |

جدول ۶: نتایج آزمون‌های Bonferroni و Games-Howell برای پارامترهای هندسی مختلف

| فاکتور شکل | نوع آزمون    | گروه (I)       | گروه (J)       | اختلاف میانگین‌ها (I-J) | (Sig.) معناداری | فاصله‌ی اطمینان 95% |          |
|------------|--------------|----------------|----------------|-------------------------|-----------------|---------------------|----------|
|            |              |                |                |                         |                 | حد بالا             | حد پایین |
| پیش‌ریزی   | Games-Howell | آسیای گلوله‌ای | آسیای میله‌ای  | -۰/۱۱۰۹۸*               | ۰/۰۰۹           | -۰/۱۹۹۲             | -۰/۰۲۲۷  |
|            |              |                | آسیای سرامیکی  | ۰/۱۱۵۱۴*                | ۰/۰۰۰           | ۰/۰۵۴۱              | ۰/۱۷۶۲   |
|            |              | آسیای میله‌ای  | آسیای گلوله‌ای | ۰/۱۱۰۹۸*                | ۰/۰۰۹           | ۰/۰۲۲۷              | ۰/۱۹۹۲   |
|            |              |                | آسیای سرامیکی  | ۰/۲۲۶۱۲*                | ۰/۰۰۰           | ۰/۱۴۲۹              | ۰/۳۰۹۳   |
|            |              | آسیای سرامیکی  | آسیای گلوله‌ای | -۰/۱۱۵۱۴*               | ۰/۰۰۰           | -۰/۱۷۶۲             | -۰/۰۵۴۱  |
|            |              |                | آسیای میله‌ای  | -۰/۲۲۶۱۲*               | ۰/۰۰۰           | -۰/۳۰۹۳             | -۰/۱۴۲۹  |
| گردی       | Games-Howell | آسیای گلوله‌ای | آسیای میله‌ای  | ۰/۰۲۵۳۲*                | ۰/۰۰۷           | ۰/۰۰۵۸              | ۰/۰۴۴۸   |
|            |              |                | آسیای سرامیکی  | -۰/۰۵۱۹۹*               | ۰/۰۰۰           | -۰/۰۷۱۱             | -۰/۰۳۲۹  |
|            |              | آسیای میله‌ای  | آسیای گلوله‌ای | -۰/۰۲۵۳۲*               | ۰/۰۰۷           | -۰/۰۴۴۸             | -۰/۰۰۵۸  |
|            |              |                | آسیای سرامیکی  | -۰/۰۷۷۳۱*               | ۰/۰۰۰           | -۰/۰۹۸۹             | -۰/۰۵۵۷  |
|            |              | آسیای سرامیکی  | آسیای گلوله‌ای | ۰/۰۵۱۹۹*                | ۰/۰۰۰           | ۰/۰۳۲۹              | ۰/۰۷۱۱   |
|            |              |                | آسیای میله‌ای  | ۰/۰۷۷۳۱*                | ۰/۰۰۰           | ۰/۰۵۵۷              | ۰/۰۹۸۹   |
| گرد شدگی   | Bonferroni   | آسیای گلوله‌ای | آسیای میله‌ای  | ۰/۰۲۹۲۹*                | ۰/۰۴۶           | ۰/۰۰۰۴              | ۰/۰۵۸۲   |
|            |              |                | آسیای سرامیکی  | -۰/۰۳۹۳۳*               | ۰/۰۰۱           | -۰/۰۶۴۸             | -۰/۰۱۳۸  |
|            |              | آسیای میله‌ای  | آسیای گلوله‌ای | -۰/۰۲۹۲۹*               | ۰/۰۴۶           | -۰/۰۵۸۲             | -۰/۰۰۰۴  |
|            |              |                | آسیای سرامیکی  | -۰/۰۶۸۶۲*               | ۰/۰۰۰           | -۰/۰۹۶۶             | -۰/۰۴۰۶  |
|            |              | آسیای سرامیکی  | آسیای گلوله‌ای | ۰/۰۳۹۳۳*                | ۰/۰۰۱           | ۰/۰۱۳۸              | ۰/۰۶۴۸   |
|            |              |                | آسیای میله‌ای  | ۰/۰۶۸۶۲*                | ۰/۰۰۰           | ۰/۰۴۰۶              | ۰/۰۹۶۶   |
| خرد        | Bonferroni   | آسیای گلوله‌ای | آسیای میله‌ای  | ۰/۰۱۰۰۴                 | ۰/۵۵            | -۰/۰۰۸۱             | ۰/۰۲۸۱   |
|            |              |                | آسیای سرامیکی  | -۰/۰۱۷۴۷*               | ۰/۰۲۶           | -۰/۰۳۳۴             | -۰/۰۰۱۵  |
|            |              | آسیای میله‌ای  | آسیای گلوله‌ای | -۰/۰۱۰۰۴                | ۰/۵۵            | -۰/۰۲۸۱             | ۰/۰۰۸۱   |
|            |              |                | آسیای سرامیکی  | -۰/۰۲۷۵۱*               | ۰/۰۰۱           | -۰/۰۴۵              | -۰/۰۱    |
|            |              | آسیای سرامیکی  | آسیای گلوله‌ای | ۰/۰۱۷۴۷*                | ۰/۰۲۶           | ۰/۰۰۱۵              | ۰/۰۳۳۴   |
|            |              |                | آسیای میله‌ای  | ۰/۰۲۷۵۱*                | ۰/۰۰۱           | ۰/۰۱                | ۰/۰۴۵    |
| فاکتور نهج | Games-Howell | آسیای گلوله‌ای | آسیای میله‌ای  | ۰/۰۳۱۳۲*                | ۰/۰۲۳           | ۰/۰۰۳۵              | ۰/۰۵۹۱   |
|            |              |                | آسیای سرامیکی  | -۰/۰۳۷۴۷*               | ۰/۰۰۱           | -۰/۰۶۲              | -۰/۰۱۳   |
|            |              | آسیای میله‌ای  | آسیای گلوله‌ای | -۰/۰۳۱۳۲*               | ۰/۰۲۳           | -۰/۰۵۹۱             | -۰/۰۰۳۵  |
|            |              |                | آسیای سرامیکی  | -۰/۰۶۸۷۹*               | ۰/۰۰۰           | -۰/۰۹۶۹             | -۰/۰۴۰۶  |
|            |              | آسیای سرامیکی  | آسیای گلوله‌ای | ۰/۰۳۷۴۷*                | ۰/۰۰۱           | ۰/۰۱۳               | ۰/۰۶۲    |
|            |              |                | آسیای میله‌ای  | ۰/۰۶۸۷۹*                | ۰/۰۰۰           | ۰/۰۴۰۶              | ۰/۰۹۶۹   |

#### ۴- بحث

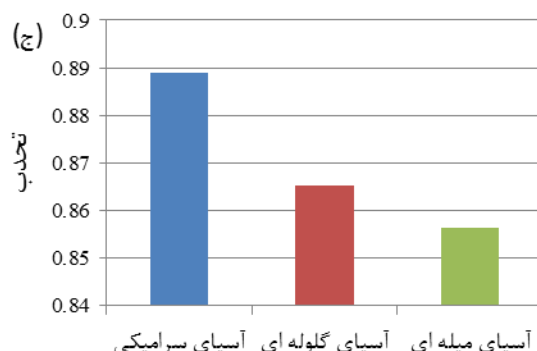
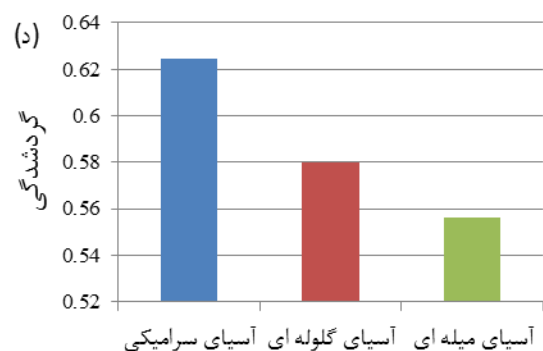
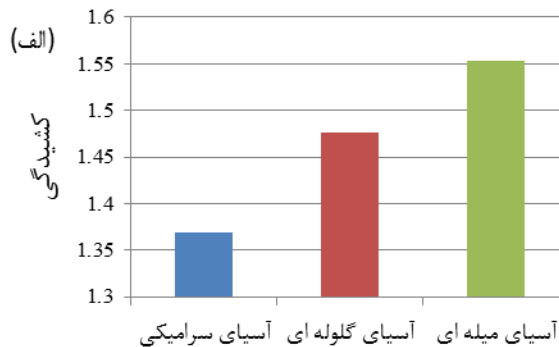
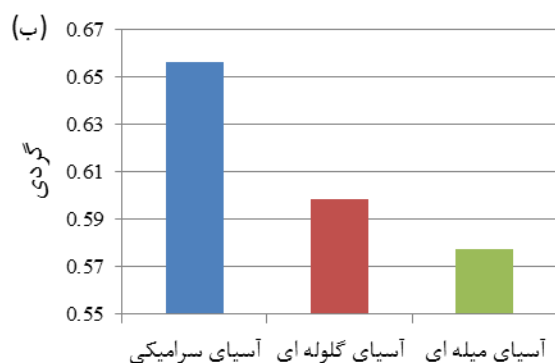
در آسیای میله‌ای نیروی ضربه به صورت خطی به ذرات اعمال می‌شود، اما در آسیای گلوله‌ای این نیرو به صورت نقطه‌ای به ذرات اعمال می‌شود و خردایش ضربه‌ای را در آن‌ها سبب می‌شود. بار خردکننده‌ی گلوله‌ای نسبت به بار خردکننده‌ی میله‌ای مساحت سطحی بیشتری دارد این امر در

کنار شکل بار خردکننده و نحوه‌ی حرکت آن در آسیا باعث می‌شود تا ذرات در آسیای گلوله‌ای نسبت به آسیای میله‌ای بیشتر تحت تأثیر مکانیزم سایش خرد شوند، افزایش نقش مکانیزم سایش در خردایش مواد معدنی در آسیای گلوله‌ای در مقایسه با آسیای میله‌ای منجر به ایجاد اختلاف در خصوصیات هندسی ذرات در محصول هر یک از این آسیاها شده‌است.

همانطور که در شکل ۳-ج مشاهده می‌شود، محصول به دست آمده از آسیای گلوله‌ای و آسیای سرامیکی در پارامتر تحدب اختلاف معناداری ندارند، اما اختلاف مقدار میانگین تحدب برای ذرات خردشده توسط این آسیاها با آسیای میله‌ای اختلافی معنادار است. تغییر در فاکتورهای کشیدگی، گردی، گرد شدگی و تحدب ذرات را می‌توان تحت عنوان یک فاکتور با نام فاکتور نظم مشاهده کرد، این فاکتور همانطور که اشاره شد به صورت قطر دایره‌ی محیطی به قطر دایره‌ی محاطی منطبق با ذره تعریف می‌شود و هرچه ذره گردتر و دارای گرد شدگی و تحدب بیشتری در گوشه‌ها باشد مقدار این پارامتر به عدد ۱ نزدیک‌تر است. مقادیر این فاکتور به ترتیب برای آسیای میله‌ای، گلوله‌ای و سرامیکی از ۰/۴۷ تا ۰/۵۴ تغییر می‌کند.

عکس روند مشاهده‌شده برای فاکتور کشیدگی در مقادیر به دست آمده برای پارامتر گردی مشاهده می‌شود، برای محصول آسیای سرامیکی بیش‌ترین مقدار گردی و برای محصول آسیای میله‌ای ذرات کم‌ترین میزان گردی را دارند. مقدار میانگین این فاکتور به ترتیب برای آسیای میله‌ای، گلوله‌ای و سرامیکی از ۰/۵۸ تا ۰/۶۶ تغییر می‌کند.

پارامترهای گرد شدگی و تحدب ذره تا حدودی شکل هندسی سطح ذرات را نشان می‌دهد، مقادیر به دست آمده برای این پارامترها نشان می‌دهد، افزایش نقش مکانیزم سایش در خردایش مواد، ذرات کالکوپیریتی با گوشه‌های گردتر و محدب‌تر تولید می‌کند، در حقیقت در مکانیزم سایش بیشتر سطح ذرات تحت تأثیر قرار گرفته و ضمن ساییده شدن گوشه‌های تیز به صورت گرد شده و محدب در می‌آیند.



شکل ۳: تغییرات مقادیر میانگین فاکتورهای (الف) کشیدگی، (ب) گردی، (ج) تحدب، (د) گرد شدگی و (ه) فاکتور نظم در آسیاهای میله‌ای، گلوله‌ای و سرامیکی

## ۵- نتایج و تحلیل

در این مقاله خصوصیت هندسی ذرات کالکوپیریت خردشده با آسیاهای گلوله‌ای، میله‌ای و سرامیکی آزمایشگاهی، به روش آنالیز تصاویر و با استفاده از نرم‌افزار Image J تعیین گردید و روشی استاندارد برای مقایسه‌ی آماری نتایج به دست آمده از پردازش و آنالیز تصاویر ارائه شد. از روش‌های آنالیز یک طرفه ANOVA برای تحلیل معناداری اختلاف در مقادیر میانگین به دست آمده استفاده شد. مطالعات آماری و استفاده از روش‌های آنالیز آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نشان داد، اختلاف در نوع بار خردکننده و مکانیزم مورد استفاده در خردایش ذرات کالکوپیریت خصوصیات هندسی آن‌ها را تغییر داده و ذرات بسته به محیط خردایش متفاوت شکل هندسی مختلفی را پیدا می‌کنند. استفاده از روش‌های آماری در تحلیل نتایج به دست آمده از آنالیز تصاویر نشان می‌دهد در سطح اعتماد ۹۵٪، ذرات خردشده با هر یک از این آسیاها خصوصیات هندسی کاملاً متفاوتی با یکدیگر دارند. نتایج این تحقیق نشان داد، افزایش نقش مکانیزم سایش در آسیای سرامیکی ذراتی با هندسه‌ی گردتر و با گوشه‌های محدب‌تر تولید می‌کند، مقدار فاکتور نظم برای این ذرات نیز به ۱ نزدیک‌تر است، کاهش نقش مکانیزم سایش در آسیای میله‌ای ذراتی کشیده‌تر و با گوشه‌های تیزتر تولید می‌کند، مقادیر فاکتور نظم نیز برای محصول آسیای میله‌ای کوچک‌تر از محصول آسیای سرامیکی است. این نتایج نشان می‌دهد با کنترل مکانیزم‌های مورد استفاده در خردایش مواد معدنی می‌توان خصوصیات هندسی ذرات تولیدشده را کنترل و آن را در جهت بهبود عملیات‌های بعدی تغییر داد. نتایج به دست آمده از تعیین پارامترهای هندسی ذرات نشان داد مقادیر گردی، گرد شدگی، تحدب و فاکتور نظم به ترتیب برای آسیای سرامیکی، گلوله‌ای و میله‌ای کاهش و مقدار کشیدگی ذرات افزایش پیدا می‌کند. به گونه‌ای که آسیای میله‌ای ذراتی کشیده‌تر و آسیای سرامیکی ذراتی گردتر تولید می‌کنند.

## ۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود از دانشگاه تربیت مدرس به جهت حمایت از تحقیقات منتهی به این نتایج را اعلام می‌دارند

## ۷- مراجع

[1]. Ulusoy U., Yekeler M., 2007, *Floatability of barite particles with different shape and roughness*. Indian Journal of Chemical Technology, Vol. 14. pp 616-625.

- [2]. Ulusoy U., Yekeler M., Hicyilmaz C., 2003, *Determination of the shape, morphological and wettability properties of quartz and their correlations*. Minerals Engineering, Vol. 16. pp 951-964.
- [3]. METSO, 2003, *Basics in mineral processing-product handbook*.
- [4]. Yan D.S., Gupta A., 2006, *Introduction to Mineral Processing Design and Operation*. Elsevier science and technology books, pp 161-162.
- [5]. Hicyilmaz C., Ulusoy U., Bilgen S., Yekeler M., 2005, *Flotation responses to the morphological properties of particles measured with three-dimensional approach*. International Journal of Mineral Processing, Vol. 75. pp 229-236.
- [6]. Kursun H., Ulusoy U., 2006, *Influence of shape characteristics of talc mineral on the column flotation behavior*. Int. J. Miner. Process., Vol. 78, pp 262-268.
- [7]. Yekeler M., Ulusoy U., Hicyilmaz C., 2004, *Effect of particle shape and roughness of talc mineral ground by different mills on the wettability and floatability*. Powder Technology, Vol. 140. pp 68-78.
- [8]. Koh P.T.L., Hao F.P., Smith L.K., Chau T.T., Bruckard W.J., 2009, *The effect of particle shape and hydrophobicity in flotation*. International Journal of Mineral Processing, Vol. 93. pp 128-134.
- [9]. Hicyilmaz C., Ulusoy U., Yekeler M., 2004, *Effects of the shape properties of talc and quartz particles on the wettability based separation processes*. Applied Surface Science, Vol. 233. pp 204-212.
- [10]. Ulusoy U., Hicyilmaz C., Yekeler M., 2004, *Role of shape properties of calcite and barite particles on apparent hydrophobicity*. Chemical Engineering and Processing, Vol. 43. pp 1047-1053.
- [11]. Ahmed M. M., 2010, *Effect of comminution on particle shape and surface roughness and their relation to flotation process*. International Journal of Mineral Processing, Vol. 94. pp 180-191.
- [12]. Kursun H., Ulusoy U., 2006, *Influence of shape characteristics of talc mineral on the column flotation behavior*. International Journal of Mineral Processing, Vol. 78, pp 262-268.
- [13]. Milki V., Kaedri H., Kulu P., Besterce M., 2001, *Characterization of powder particle morphology*. Proc. Estonian Acad. Sci. Eng, Vol. 7. pp 22-34.

[۱۴]. حبیب پور. کرم، صفری. رضا. ۱۳۸۸، راهنمای جامع کاربرد SPSS در تحقیقات پیمایشی (تحلیل داده‌های کمی)،

انتشارات متفکران، چاپ اول

- [15]. Ulusoy U., 2008, *Application of ANOVA to image analysis results of talc particles produced by different milling*, Powder Technology, Vol. 188. pp 133-138

- 1- Hulya Kursun
- 2- Yekeler
- 3- Relay lens