Archive of SID

نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر- مهندسی عمران و محیط زیست
Amirkabir Journal of Science & Research Civil & Environmental Engineering
(AJSR - CEE)

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)
دوره چهل و هفت، شماره۲، پاییز ۱۳۹٤، صفحه ۸۱ تا ۸۹
Vol. 47, No. 2. Fall 2015, pp. 81- 89

مدلسازی ارتباط بین زبری سطح با ابعاد و اندیس‌کار کانی‌های باریت، پیریت و کوارتز

جعفر شهریور قوزوللو [1*]، یونس شکاریان[1]، بهرام رضایی[2]، فاطمه منعمی مطلق[1]، محمد رضا اصلانی[3]

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیرتهران، ایران
۲- استاد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیرتهران، ایران
۳- دانشجوی دکتری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران

(دریافت۱۳۹۱/۱۱/۱۱، پذیرش۱۳۹۳/۳/۴)

چکیده

زبری سطح ذرات نقش بسیار مهمی در فرآیندهای فرآوری مواد معدنی دارد. از این رو شناخت ارتباط بین زبری سطح ذرات با پارامتر ابعاد و اندیس‌کار، مهم است. در این پژوهش، نمونه پیریت، باریت و کوارتز به ترتیب با اندیس کار ۴/۷۳، ۸/۹۳ و ۱۳/۵۷ kwh/st مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری زبری سطح ذرات نشان می‌دهد که با کاهش ابعاد ذرات، زبری ذرات نیز، کاهش می‌یابد. همچنین در تمامی محدوده‌های ابعادی زبری سطح باریت، بیشتر از پیریت و پیریت بیشتر از کوارتز به دست آمد که نشان از کاهش زبری سطحی ذرات با افزایش اندیس باند دارد. بیشترین زبری ذرات برای باریت، پیریت و کوارتز در محدوده ابعادی ۱۴۷+۱۷۷- میکرون رخ داد، که به ترتیب معادل ۱۹۳/۴۱، ۸۴/۶۳ و ۲۳/۰۹ (بی بعد) است.

کلمات کلیدی

زبری سطح، اندیس کار، ابعاد ذرات، مدلسازی.

۱- مقدمه

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: jafarsharivar@yahoo.com

www.SID.ir

Archive of SID

زبری سطح از مؤثرترین و برجسته‌ترین خصوصیت سطح است. از آنجا که در بسیاری زمینه‌ها کاربرد دارد، مورد توجه بسیاری از محققان می‌باشد. این خصوصیت سطح، به سبب افت و خیزهای اطراف سطح جامد (توپوگرافی کلی سطح) است که آشکارا بر واکنش‌پذیری جامد اثر می‌گذارد [۱]. زبری سطح، به طور واضح واکنش پذیری جامد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. سرعت واکنش‌های سطحی به‌وسیله افزایش زبری سطح، افزایش می‌یابد و افزایش ناهمواری سطح، باعث افزایش تراکم مکان‌های با انرژی بالا می‌شود. ساختمان اتمی لایه‌ها می‌تواند تأثیر بسزایی بر ویژگی‌های سطح داشته باشد. ویژگی‌های سطح جامد، حتی برای نمونه‌های با ترکیبات به ظاهر یکسان و هم‌چنین تحت شرایط برابر، متغیر بوده و به نوع آسیاهای به کار گرفته شده وابسته است[۲]. زبری سطح در جذب سطحی و برهم کنش ذره- ذره یک عامل هم می‌باشد. در مطالعات انجام شده توسط برخی محققین، گزارش شده که عملیات سنگ‌شکنی و آسیا، تغییراتی را در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مواد بوجود می‌آورد و خواص مورفولوژی و زبری سطح ذرات، فرآیندهای بعدی عملیات کانه‌آرایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۴،۳]. ذرات پودری در بهترین تعریف، به‌صورت مواد جامد ریز با مساحت سطحی بسیار بالا نسبت به حجم بیان می‌شوند. با این تعریف ذهنی، می‌توان به خوبی نقش برجسته پدیده‌های سطحی در تکنولوژی پودر را درک نمود. روش‌های اندازه‌گیری دوبعدی مورفولوژیکی ذرات در حالت پودری دارای معایبی همچون سایش ذرات در طی تهیه مقاطع صیقلی و نیز امکان نادیده گرفتن بعد سوم می‌باشد. علاوه براین، روشی وقت‌گیر بوده و برای کاربرد گسترده نیازمند توسعه تجهیزات خودکار می‌باشد [۵]. روش‌های دستی آنالیز تحت تاثیر خطاهای انسانی بوده و در تعداد نمونه‌های بیشتر، برای قابلیت اطمینان، نیازمند بدست آوردن اطلاعات آماری می‌باشد [۶]. به همین دلیل اغلب از آنالیزهای سه بعدی، برای اندازه‌گیری خواص مورفولوژی ذرات استفاده می‌شود.

هندسه ذرات به‌طور قابل توجهی بر اندرکنش‌های فیزیکی و شیمیایی سطح ذرات تاثیر دارد. این پژوهش، اهمیت ارزیابی دقیق هندسه ذرات را توسط مقدار پارامترهای ذره نشان می دهد. این پارامترها می‌توانند برای تمایز بین مواد و ارتباط آنها با فرآیندهای مختلف استفاده شوند [۷]. رفتار و خواص منحصربفرد ذرات، تا حد زیادی به مورفولوژی ذرات (شکل، بافت و غیره)، ابعاد و توزیع ابعاد بستگی دارد. زبری ذرات توسط اندازه‌گیری جذب گاز BET محاسبه می‌شود. هنگامی که مساحت سطحی اندازه‌گیری شود، زبری سطح نیز می‌تواند مشخص شود [۸].

خواص و ویژگی‌های سطح، به طور مشخص، عملیات فرآوری ذرات ریزدانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲]. بنابراین رفتار و ویژگی‌های ذره، تا حد زیادی وابسته به زبری، مورفولوژی سطح ذره و ابعاد ذره می‌باشد. در کانه‌آرایی، عملیاتی از قبیل فلوتاسیون، جیگ، الک کردن، طبقه‌بندی، میز لرزان، جدایش واسطه سنگین، جدایش با سیکلون و سایر عملیات دیگر به زبری و مورفولوژی سطح ذره وابسته هستند [۱۰،۹].

میزان ترشوندگی ذرات جامد یک پارامتر مهم است که بسیاری از فرآیندهای تکنولوژیکی مثل فلوتاسیون، آگلومراسیون و جدایش جامد-مایع را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هم چنین در پیگمنت‌ها و صنایع داروسازی نیز نیاز به دانستن قابلیت ترشوندگی ذرات می‌باشد [۹]. میزان ترشوندگی ذرات به‌وسیله اندازه‌گیری زاویه تماس تعیین می‌شود. زبری سطح جامد، زاویه تماس اندازه گیری شده را متأثر می‌کند [۲]. بنابراین بررسی کیفیت سطح ذره بعد از خردایش، برای انجام عملیات فلوتاسیون ضروری است. درجه آزادی ذرات مواد معدنی با ارزش از گانگ، در عملیات فرآوری مواد معدنی، متالورژی، پودرکنی و صنعت شیمی مهم بوده و توسط خردایش و آسیاکنی به دست می‌آید. کاهش ابعاد ذرات با افزایش مساحت سطح همراه است. انواع مختلف آسیاها می‌توانند با توجه به مکانیزم‌های اصلی شکست ذرات به‌صورت: فشاری، برشی، ضربه‌ای و نیروهای داخلی تقسیم‌بندی شوند. ایجاد تبعیض بین این مکانیزم‌های شکست مشکل می‌باشد، چون حداقل دو مکانیزم در هر دستگاه دیده می‌شود. با این حال، معمولا سه مدل از شکست، به‌صورت شکست سایشی، لب پرشدن و ضربه‌ای تعریف می‌شود [۵]. بنابراین آسیاکنی توسط آسیاهای مختلف باعث تغییرات قابل توجهی در شکل و خواص مورفولوژیکی ذرات می‌شود که در بیشتر عملیات فرآوری مواد معدنی بسیار مهم می‌باشد.

آقای باند قابلیت خرد شدن مود را با پارامتری به نام اندیس کار مشخص کرده است. این اندیس برابر است با کار لازم برای خرد کردن یک تن ماده معدنی از ابعاد با تئوری بینهایت تا ابعادی که ۸۰ درصد آن از سرندی به دهانه ۱۰۰ میکرون عبور کند. اندیس باند از خصوصیات ذاتی هر ماده بوده و هر ماده‌ای دارای اندیس باند مشخصی می باشد [۱۱].

از مهم‌ترین خواص فیزیکی قابل اندازه‌گیری ذرات، زبری سطح است که از پارامترهای مهم در پیش بینی رفتار فردی و تجمعی ذرات می‌باشد. این پارامتر برای کاربردهای صنعتی مواد در شکل پودری، اهمیت زیادی دارد که درحال حاضر در زمینه فرآوری مواد معدنی به صورت رضایت بخش بررسی نشده است. هدف از

www.SID.ir

Archive of SID

این تحقیق بررسی ارتباط بین زبری در ذرات مختلف با توجه به اندیس کار آنها می‌باشد.

۲- روش‌های تخمین اندیس‌کار، شکل و زبری سطح ذرات

انرژی یا کار لازم برای کاهش ذرات با اندازه y با کاهش y افزایش می‌یابد. تحقیقات بسیاری برای تعیین تابع اندیس کار صورت گرفته است. باند با توجه به بررسی کارخانه‌های مختلف، دریافت که کار لازم برای شکستن یک ماده معدنی با به‌طور عکس با ریشه دوم y متناسب است. باند اندیس کار را برحسب kwh/t بیان کرد و y را به صورت اندازه‌ای که ۸۰ درصد مواد از آن عبور می کنند، تعریف نمود. K ثابت بوده و کار لازم برای کاهش از اندازه ذرات خوراک (F) به محصول (P) برابر است با:

$$W = k(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}}) \qquad (۱)$$

باند با حل معادله۱ برای شریط حدی F برابر بینهایت و P برابر ۱۰۰ میکرون متر اندیس کار (W_i) را تعریف کرد:

$$W_i = K\frac{1}{\sqrt{100}} \quad , \quad K = 10W_i \qquad (۲)$$

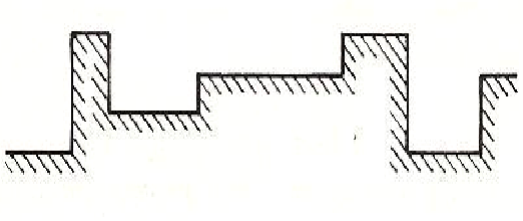
بنابراین با استفاده از رابطه ۲ در رابطه ۱ اندیس کار به صورت معادله ۳ به دست می‌آید:

$$W = 10W_i \ (\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}}) \qquad (۳)$$

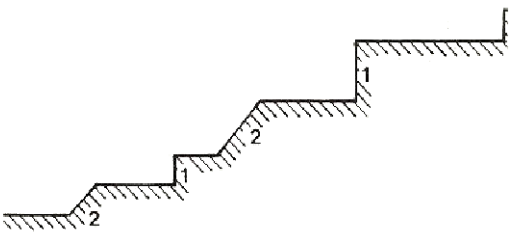
پیشرفت‌هایی که در روش‌های میکروسکوپی اتوماتیک مرتبط با سیستم های رایانه ای (روش‌های تحلیلی تصویر) صورت گرفته، امکان استفاده از روش‌های تعیین زبری سطح با مقطع عرضی ذرات را توسط شیوه‌های ریاضی، آسان کرده است. برای تعیین محدوده زبری سطح از روش‌های ساده‌ای همچون تعیین نسبت تصویر، نسبت کشیدگی یا کروی بودن ویا روش‌های نوینی مانند تحلیل فوریر، تحلیل دلتا، علم هندسه فراکتال استفاده می‌شود [۷]. در این بخش مفهوم کمی و کیفی زبری ارائه شده است.

۲-۱ مفهوم کمی و کیفی زبری

در سال ۱۹۸۱ جیکوک و پارفیت، زبری سطح ذره را اینگونه تعریف کردند: زبری سطح در کل به تغییرات، تغییر مکان‌های معرف سطحی بیشتر از فواصل بین اتمی محدود می‌شود. اگر یک کریستال مکعبی مثل کلرید سدیم به موازی سطح شکسته شود، سطح ممکن است شبیه شکل۱ باشد که همه سطوح به صورت سطوح مکعبی شکل هستند. اگر چنین بلوری در زاویه های کوچک در این صفحه بریده شود، سطح حاصل به صورت پلکان‌مانند خواهد بود و به صورت شکل۲ خواهد بود [۱۲، ۱].



شکل (۱): روفایل شکستگی به موازات سطح برای سطح مکعبی [۵]



شکل (۲): پروفایل بریدگی سطح در زاویه های کوچک برای سطح مکعبی [۵]

از آنجایی که شدت تراکم یا فشرده‌سازی بین صفحات مختلف کریستالی تغییر می‌کند، سطح آن‌ها ممکن است انرژی‌های سطحی مختلفی داشته باشد. سطوح جامد به روش‌های مختلفی آماده می‌شوند. اکثر این روش ها باعث زبر شدن سطح نمونه می‌شوند. در شکل۳ سطح واقعی XY می‌باشد و AB نماینده سطح فرضی جامد با حجم هم ارز و سطح صاف مولکولی می-باشد. رابطه (۴) مقدار تغییرات در سطح را بیان می‌کند:

$$h_{av} = \frac{|h_1| + |h_2| + |h_3| + ... + |h_n|}{n} \qquad (۴)$$

که h فاصله پروفیل XY از AB می‌باشد که در تعداد زیادی نقطه روی سطح اندازه‌گیری شده است که می‌تواند به صورت رابطه (۵) نیز بیان شود:

www.SID.ir

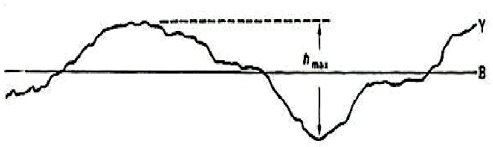
Archive of SID

$$h_{rms}=\sqrt{\frac{h_1^2+h_2^2+h_3^2+h_4^2+...h_n^2}{n}} \quad (۵)$$

جیکوک و پارفیت همچنین عامل زبری را به صورت رابطه (۶) تعریف کرده‌اند:

$$r=\frac{A_{XY}}{A_{AB}} \quad (۶)$$

که در آن A_{XY} و A_{AB} به ترتیب نماینگر مساحت سطح واقعی XY و مساحت سطح تعریف شده بوسیله AB می‌باشد.



شکل۳) پروفایل سطح جامد[۵].

پکهام نیز عامل زبری سطح را به صورت رابطه (۷) تعریف کرد[۱۴]:

$$r=\frac{A}{A_0} \quad (۷)$$

که در آن A مساحت سطح واقعی و A_0 مساحت اسمی است. برای سطح‌های ایده‌آل ساده، r می‌تواند از فرمول‌های هندسی مقدماتی محاسبه شود. وقتی که مقیاس زبری، ریزتر می‌شود، کاربرد فاکتور زبری ساده، به طور قابل توجهی غیرواقعی می‌شود. این به دلیل فزایش سختی اندازه‌گیری مساحت واقعی چنین سطحی غیرمتقاعدکننده می‌شود. هنگامی که ما به زبری با مقیاس مولکولی می‌رسیم، انرژی مولکول‌های سطح حاصل، وضعیت توپولوژی می‌باشد[۱۴].

هودسون و همکاران برای محاسبه زبری سطح ذره به صورت پودری، ابتدا فرض کردند که دانه‌های مواد معدنی شکل‌های منظم دارند، پس با محاسبه مساحت سطح هندسی (A_{GEOM}) و با به کار بردن ایزوترم جذب گازنیتروژن BET برای محاسبه مساحت سطح BET (A_{BET}) رابطه (۸) را برای محاسبه زبری پیشنهاد کردند [۱۵]:

(مساحت‌های محاسبه شده برحسب متر مربع بر گرم هستند).

$$r=\frac{A_{BET}}{A_{GEOM}} \quad (۸)$$

هیکی‌ایلماز و همکاران، مساحت سطح ذرات اندازه‌گیری شده بوسیله BET و دیگر روش های جذب گاز، زبری سطح ذرات را برای اندازه‌گیری زبری سطح ذره پیشنهاد کردند و آنها با فرض شکل هندسی منظم (ذرات کروی به قطرD) و با استفاده از معادله8، رابطه (۹) را برای اندازه‌گیری زبری سطح پیشنهاد کردند[۵]:

$$r=\frac{A_{BET}}{6/(Dd)}=A_{BET}\,d(\frac{D}{6}) \quad (۹)$$

A_{BET}= مساحت‌سطح BET اندازه گیری شده (m^2/gr)

d =چگالی جامد (gr/m^3)

D= میانگین قطر ذرات (m)

r= زبری سطح ذره (بدون بعد)

۳- مواد و روش‌ها

ابتدا مواد معدنی پیریت، باریت و کوارتز در محدوده ۸۴۱+۱۱۱۹- میکرون تهیه و توسط آسیای گلوله‌ای خرد شده و محصول حاصل در پنج محدوده ابعادی ۱۴۷+۱۷۷-، ۱۰۴+۱۴۷- ، ۷۴+۱۰۴-، ۵۳+۷۴- و ۴۴+۵۳- میکرون طبقه‌بندی شدند.

در این پژوهش، برای اندازه‌گیری زبری سطح از رابطه(۹) استفاده می‌شود. ین رابطه برای اندازه‌گیری زبری سطح نیاز به اندازه‌گیری سطح ویژه با استفاده از اطلاعات جذب گاز به روش ایزوترم BET دارد. پس از اندازه‌گیری سطح ویژه، با اندازه‌گیری چگالی جامد و ابعاد ذرات و قرار دادن در رابطه(۶)، می‌توان زبری سطح ذرات را اندازه‌گیری کرد. در این مطالعه از دستگاه Gimini III 2375, USA، برای اندازه‌گیری سطح ویژه ذرات استفاده شد. دقت این دستگاه برابر ۰/۰۱ متر مربع بر گرم است. چون سطح ویژه ذرات استفاده شده در این مطالعه کم است، در نتیجه از دقت کافی برای اندازه‌گیری سطح ویژه ذرات برخوردار است.

۴- نتایج و بحث

به منظور بررسی ارتباط بین زبری سطح با ابعاد و اندیس کار، از سه نوع ماده معدنی با اندیس کار مختلف استفاده شد. به طوری که در شکل (۹) نشان داده شده است، این سه ماده‌معدنی

www.SID.ir

Archive of SID

بررسی شده شامل باریت، پیریت و کوارتز به ترتیب با اندیس کار ۴/۷۳، ۸/۹۳ و ۱۳/۵۷ kwh/st است. هر سه ماده‌معدنی تحت یک شرایط توسط آسیای گلوله‌ای خردایش شده و در پنج محدوده ابعادی ۱۴۷+۱۷۷- ،۱۰۴+۱۴۷- ،۷۴+۱۰۴- ،۵۳+۷۴- و ۴۴+۵۳- میکرون طبقه بندی شدند. سپس زبری سطح هر یک از محدوده‌های ابعادی اندازه‌گیری شد. نتایج اندازه‌گیری زبری سطح در برابر ابعاد ذرات توسط نرم افزار مطلب مدلسازی شد. به طوری که در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است، به ترتیب زبری سطح باریت، پیریت و کوارتز در برابر محدوده-های ابعادی ۴۴+۱۷۷- میکرون به صورت معادله خطی ترسیم شده است. نتایج حاصل از مدلسازی خطی برای باریت، پیریت و کوارتز به ترتیب به صورت معادلات خطی ۷، ۸ و ۹ به دست آمد. در حالی که S.R و S به ترتیب نمایانگر زبری سطح ذرات (بدون بعد) و ابعاد ذرات (میکرون) هستند.

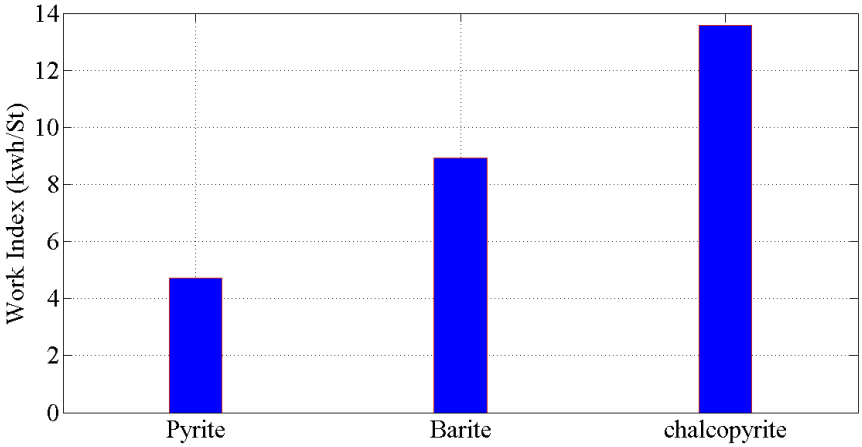
به طوری که در شکل های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است، در هر سه نوع ماده معدنی با کاهش ابعاد، زبری کاهش می‌یابد. از آنجایی که با کاهش ابعاد ذره، سطح ویژه زیاد می‌شود، انتظار می‌رود که زبری سطح ذره زیاد شود. ولی طبق رابطه (۶)، زبری سطح ذره، هم به ابعاد ذره و هم به سطح ویژه ذرات وابسته است. با کاهش ابعاد ذره سطح ویژه ذرات زیاد می‌شود اما ابعاد نیز کاهش می‌یابد و تأثیر کاهش ابعاد، بیشتر از تأثیر افزایش سطح ویژه است، بنابراین زبری سطح ذره با ابعاد کاهش می‌یابد.

به طوری که در شکل (۸) نشان داده شده است، ارتباط بین ابعاد، زبری سطح و اندیس کار به خوبی دیده می‌شود. به‌طوری که با کاهش ابعاد ذرات برای هر سه نوع ماده‌معدنی، زبری سطح کاهش می‌یابد. همانطور که گفته شد، کاهش زبری سطح ذرات با کاهش ابعاد به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. از طرفی با بررسی تمام محدوده‌های ابعادی برای سه ذره باریت، پیریت و کوارتز مشاهده می‌شود که زبری سطح باریت بیشتر از پیریت و پیریت بیشتر از کوارتز می‌باشد که احتمالا این روند ناشی از اندیس‌کار مختلف این ذرات می باشد یعنی با افزایش اندیس‌کار ذرات، زبری سطح ذرات کاهش می‌یابد.

$$S.R = ۰.۸۰۹۸ * S + ۶۲.۱۵$$ ضریب همبستگی برابر ۰/۹۸۳۶ (۷)

$$S.R = ۰.۱۸۹۴ * S + ۵۵.۷۴$$ ضریب همبستگی برابر ۰/۸۴۱۴ (۸)

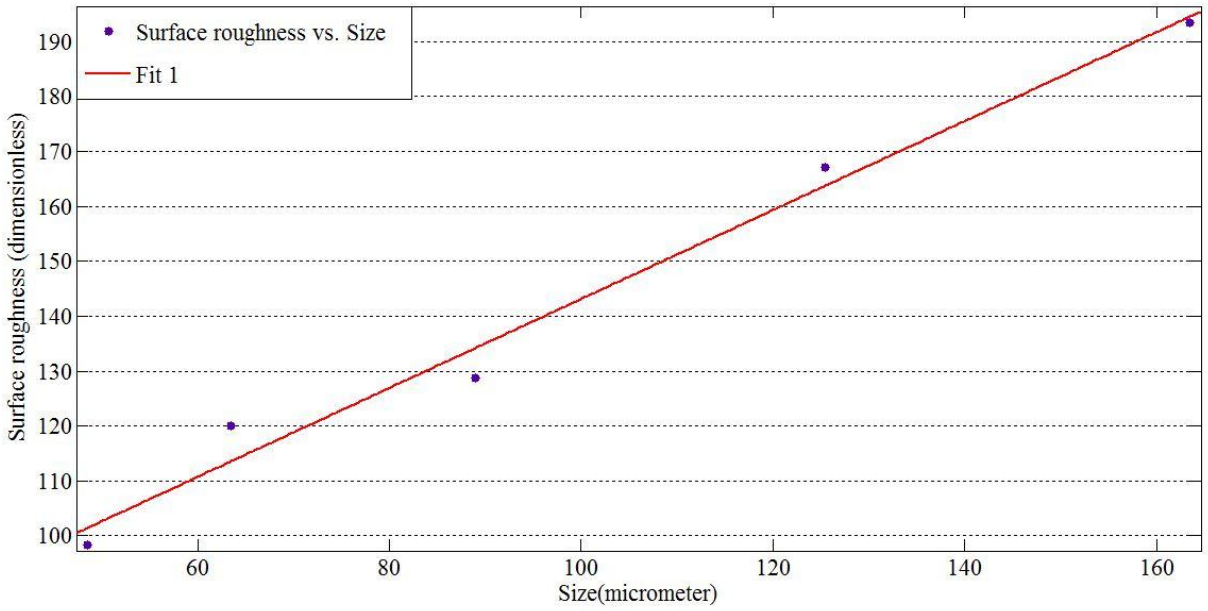
$$S.R = ۰.۱۱۰۵ * S + ۵.۲۹۶$$ ضریب همبستگی برابر ۰/۹۸۴۳ (۹)



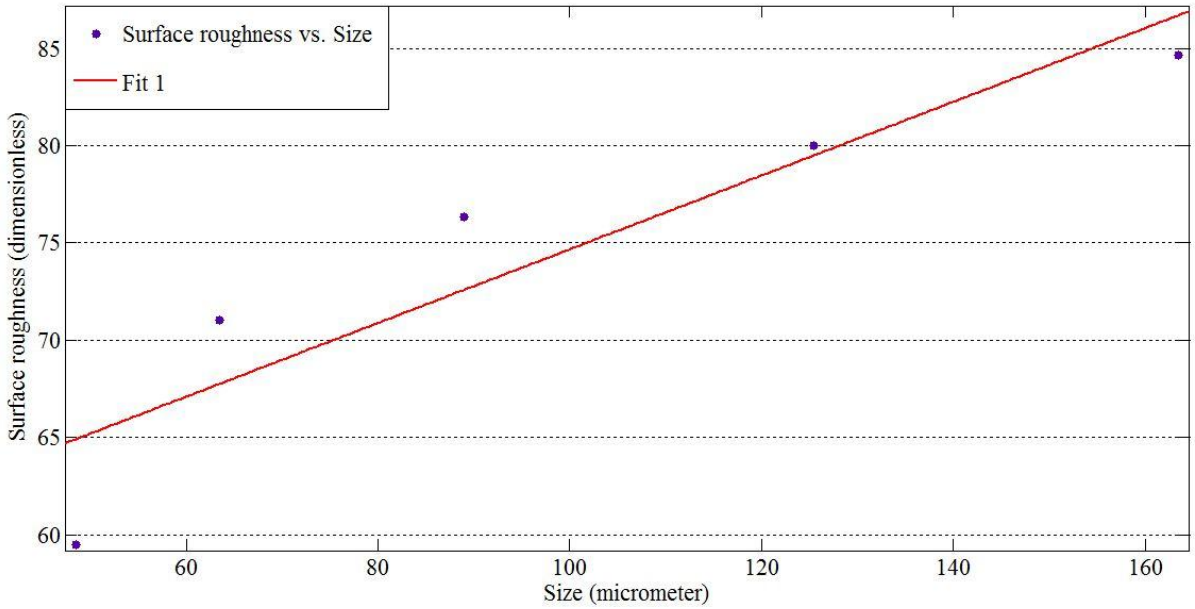
شکل (۴): مقایسه اندیس باند ذرات باریت، پیریت و کوارتز بر حسب kwh/st

www.SID.ir

Archive of SID



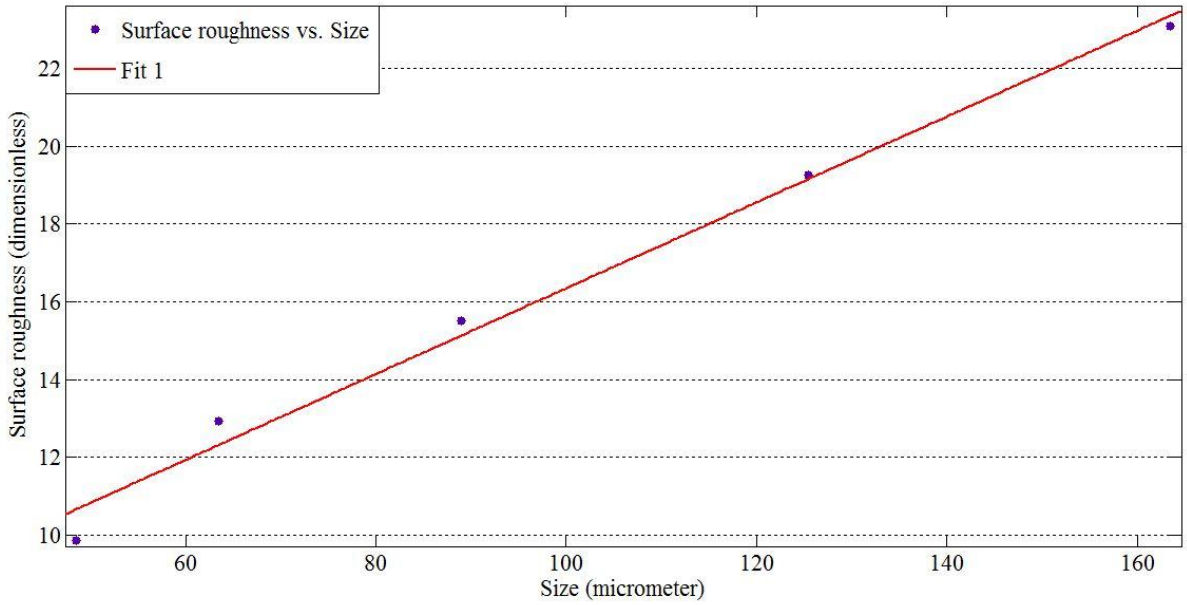
شکل (۵): نمودار خطی زبری سطحی ذرات باریت در محدوده ابعادی ۴۴ تا ۱۴۷ میکرون



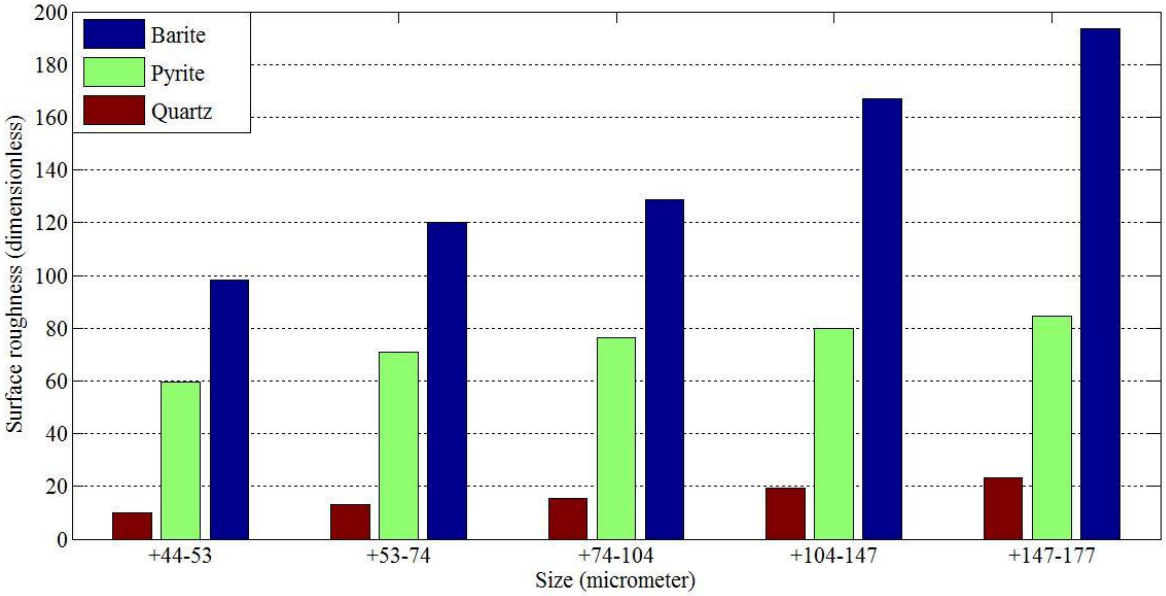
شکل (۶): نمودار خطی زبری سطحی ذرات پیریت در محدوده ابعادی ۴۴ تا ۱۴۷ میکرون

www.SID.ir

Archive of SID



شکل (۷): نمودار خطی زبری سطحی ذرات کوارتز در محدوده ابعادی ۴۴ تا ۱۴۷ میکرون



شکل (۸): ارتباط بین ابعاد، زبری سطح و اندیس کار

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مطالعات زبری سطح ذرات باریت، پیریت و کوارتز با توجه به اندیس کار مختلف به ترتیب ۴/۷۳، ۸/۹۳ و ۱۳/۵۷ kwh/st در پنج محدوده ابعادی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که:

۱- زبری سطح ذرات خرد شده توسط آسیای گلوله‌ای برای هر سه نوع ماده‌معدنی، با کاهش ابعاد کاهش می‌یابد. انتظار می‌رود که با کاهش ابعاد، زبری سطح ذرات افزایش یابد ولی زبری سطح ذرات، هم به ابعاد و هم به سطح ویژه وابسته است. با کاهش ابعاد ذرات، سطح ویژه نیز زیاد شده ولی ابعاد کاهش می‌یابد و تأثیر کاهش ابعاد بیشتر از تأثیر

www.SID.ir

Archive of SID

افزایش سطح ویژه می باشد، بنابراین زبری سطح ذره نیز کاهش می‌یابد.

۲- در تمام محدوده‌های ابعادی، زبری سطح باریت بیشتر از پیریت و پیریت بیشتر از کوارتز به دست آمده است که احتمالا ناشی از اندیس‌کار مختلف این ذرات است. یعنی باریت با کمترین اندیس‌کار، دارای بیشترین زبری سطح بوده و بالعکس کوارتز با بیشترین اندیس‌کار، دارای کمترین زبری سطح می‌باشد.

۳- مدلسازی‌های خطی باریت، پیریت و کوارتز به‌ترتیب به‌صورت معادلات S.R = ۰.۸۰۹۸ * S + ۶۲.۱۵ ، S.R = ۰.۱۸۹۴ * S + ۵۵.۷۴ و S.R = ۰.۱۱۰۵ * S + ۵.۲۹۶ می‌باشد. همچنین ضریب همبستگی حاصل از این مدلسازی‌ها به ترتیب ۰/۹۸۳۶، ۰/۸۴۱۴ و ۰/۹۸۴۳ (بدون بعد) به دست آمده که نشان دهنده روند تقریبا خطی زبری سطح در برابر ابعاد ذرات می‌باشد.

۴- بیشترین زبری سطح، مربوط به ذرات با کمترین اندیس کار و بالاترین محدوده ابعادی می باشد. یعنی باریت در بالاترین محدوده ابعادی بررسی شده (۱۴۷+۱۷۷- میکرون)، بیشترین زبری سطح را دارد.

۶- مراجع

[۱] رحیمی، م.، رضایی، ب.، "تأثیر ویژگی‌های زبری و توپولوژی سطح ذرات کوارتز، محصول آسیاهای مختلف بر روی قابلیت شناورسازی آن"، کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی. پلی تکنیک تهران، ۱۳۸۹.

[۲] Oliver, J., Huh, C. and Mason, S., "An experimental study of some effects of solid surface roughness on wetting", Colloids and surfaces, vol. 1, pp. 79-104, 1980.

[۳] Forssberg, E., Sundberg, S. and Hongxin, Z., "Influence of different grinding methods on floatability", International Journal of Mineral Processing, vol. 22, pp. 183-192, 1988.

[۴] Forssberg, E. and Zhai, H., "Shape and surface properties of the particles liberated by autogenous grinding", Scand. J. Metall, vol. 14, pp. 25-32, 1985.

[۵] Hicyilmaz, C., Ulusoy, U., Bilgen, S. and Bilgen, M., "Flotation responses to the morphological properties of particles measured with three-dimensional approach", International Journal of Mineral Processing, vol. 75, pp. 229-236, 2005.

[۶] Lanaro, F. and Tolppanen, P,. "characterization of coarse aggregates", Engineering Geology, vol. 65, pp. 17-30, 2003.

[۷] Ahmed, M. M., "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, 2010.

[۸] Hicyilmaz, C., Ulusoy, U., Bilgen, S., Yekeler, M. and Akdogan, G., "Response of rough and acute surfaces of pyrite with ۳-D approach to the flotation", Journal of Mining Science, vol. 42, pp. 393- 402, 2006.

[۹] Preuss, M. and Butt, H. J., "Measuring the contact angle of individual colloidal particles", Journal of colloid and interface science, vol. 208, pp. 468- 477, 1998.

[۱۰] Hicyilmaz, C., Bilgen, S., Ulusoy, U. and Akdogan, G., "An experimental study on the influence of shape and surface characteristics of particles on flotation", V. Southern Hemisphere Meeting on Mineral Technology, Buenos Aires, Argentina, 2002.

[۱۱] Napier, M. T. and Wills, B. A., "Mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery", Butterworth-Heinemann, 2011.

[۱۲] Packham, D. E., "Surface energy, surface topography and adhesion", International journal of adhesion and adhesives, vol. 23, pp. 437- 448, 2003.

[۱۳] Hogg, R., "Characterization of mineral surfaces, in Somasundaran, P. (Ed), Fine Particle Processing", vol. I. Society of Mining Engineers of AIME, New

www.SID.ir

Archive of SID

York, pp. 524- 492, 1980.

[۱۴] White, A. F., Blum, A. E., Schulz, M. S., Bullen, T. D., Harden, J. W. and Peterson, M. L., "Chemical weathering rates of a soil chronosequence on granitic alluvium: I. Quantification of mineralogical and surface area changes and calculation of primary silicate reaction rates", Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 60, pp. 2550-2533, 1996.

[۱۵] Hodson, M. E., Lee, M.R. and Parsons, I., "Origins of the surface roughness of unweathered alkali feldspar grains", Geochimica et cosmochimica acta, vol. 61, pp. 3855- 3896, 1997.

www.SID.ir