

بررسی فلوتاسیون ذرات سیلیس بر اساس ویژگی زبری آنها

مهدی رحیمیⁱ، بهرام رضاییⁱⁱ، محمد رضا اصلانیⁱⁱⁱ

چکیده

زبری سطح جامد، بیانگر پستی و بلندی‌های روی آن است که در فرآیندهایی مانند فلوتاسیون می‌تواند نقش مهمی داشته باشد. در مقاله فوق زبری سطح ذرات سیلیس با اندازه‌گیری سطح ویژه ذرات بدست آمد. از آنجا که خردایش و آسیاکردن باعث ایجاد تغییراتی در ذرات می‌شود، محصولات آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای از نظر زبری مقایسه شدند. خاصیت ترشوندگی ذرات با زبری‌های مختلف و همچنین سینتیک فلوتاسیون آن‌ها با استفاده از سلول فلوتاسیون آزمایشگاهی تعیین شد. نتایج نشان دادند که محصول آسیای میله‌ای زبری بیش‌تری نسبت به محصول آسیای گلوله‌ای دارد. همچنین سینتیک فلوتاسیون ذرات، با افزایش زبری سطح آن‌ها افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی

فلوتاسیون، سینتیک، ویژگی زبری سطح، سیلیس، آسیای میله‌ای، آسیای گلوله‌ای.

Study of Silica Particles Flotation according to their Surface Roughness Characteristics

M. Rahimi, B. Rezai, M. R. Aslani

ABSTRACT

Surface roughness is due to fluctuations around a surface of solid which plays vital role in subsequent processes such as flotation. Grinding by different mills causes major changes in surface roughness of particles, which affect the flotation characteristics. In this study, surface roughness of silica particles was determined by measuring the specific surface area of particles. The wettability characteristics and flotation rate of particles with different surface roughness were determined using a laboratory flotation cell. Results have shown that rod mill product has higher surface roughness than ball mill product. Also flotation rate of particles increases with increasing the surface roughness of particles.

KEYWORDS

flotation, kinetics, surface roughness characteristics, rod mill, ball mill.

ⁱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی؛ rahimi.mehdi@yahoo.com

ⁱⁱ استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی؛ rezai@aut.ac.ir & brezai1@yahoo.com

ⁱⁱⁱ دانشجوی دوره دکترا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده مهندسی معدن؛ mr.aslani@yahoo.com



در رابطه فوق برای محاسبه A_{GEOM} ، فرض شده است که دانه‌های مواد معدنی شکل‌های منظم دارند و A_{BET} با به‌کار بردن ایزوترم جذب BET و محاسبه مساحت سطح ویژه به دست آمده است. سرانجام رابطه (۴) به‌وسیله بسیاری از محققان برای محاسبه زبری سطح ارائه شده است [۱۴-۱۲]:

$$r = A_{BET} d \left(\frac{D}{6} \right) \quad (4)$$

که در آن:

A_{BET} = مساحت سطح BET اندازه‌گیری شده (m^2/g)

d = چگالی جامد

D = میانگین قطر ذرات

r = زبری سطح ذره (بدون بعد)

آسیاها روش‌های شکست متفاوتی دارند. خردایش و آسیا کردن عاملی است که باعث ایجاد تغییراتی در خواص فیزیکی و شیمیایی مواد از قبیل توزیع ابعادی و شکل، مساحت سطح، تخریب و تغییر شبکه، تغییر شکل، انرژی آزاد سطح و قابلیت هدایت الکتریکی می‌شود. حد و اندازه این تغییرها، متأثر از ویژگی‌های مواد و آسیا، روش آسیا کردن، ورودی انرژی، دما و فشار محیط است [۱۵]. زیبک و همکاران (۲۰۰۵) در آزمایشات مختلف دیدند که خردایش به مدت یک دقیقه در آسیای حلقه‌ای اثر مهم بر روی خصوصیات مورفولوژی تالک دارد. آنها دیدند که یک دقیقه خردایش باعث افزایش زبری سطح و سطح ویژه ذرات می‌شود [۱۶]. یولسوی و همکاران (۲۰۰۳) سطح ویژه کلسیت خرد شده با استفاده از آسیاهای میله‌ای، گلوله‌ای و خودشکن برای رسیدن به یک ابعاد خاص را به روش جذب گاز نیتروژن اندازه‌گیری نمودند و با قرار دادن در رابطه (۴) زبری سطح کلسیت بدست آمده از آسیاهای مربوطه را محاسبه نمودند. نتایج گزارش شده نشان دادند که سطح ویژه و زبری سطح محصول آسیای میله‌ای بیشترین مقدار و سطح ویژه و زبری سطح آسیای خودشکن کمترین مقدار است [۱۷]. فنگ و همکاران اثر نوع خردایش خشک و تر را بر روی فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی کمپلکس بررسی نمودند. آن‌ها نمونه سولفیدی را پس از سنگ‌شکنی بوسیله آسیای میله‌ای به روش‌های خردایش خشک و تر خرد نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نمونه‌های خرد شده به روش خشک محصولی با زبری بیشتر دارند. سطوح نمونه‌های خرد شده به روش تر زبری کمتری دارند. همچنین نمونه‌هایی که به روش خشک خرد شده بودند، دارای کف پایدارتر، با بار بیشتر و سینتیک فلوتاسیون سریع‌تر هستند [۱۸].

زبری سطح جامد بر فرآیندهای بعدی مانند فلوتاسیون اثر می‌گذارد [۱۹]. هاگ (۱۹۸۰) بیان کرد که سرعت واکنش‌های

سیلیس یکی از فراوان‌ترین کانی‌های روی زمین است و فلوتاسیون مهم‌ترین روش برای فرآوری آن است. از آنجا که نقطه بار صفر سیلیس ۱/۸ است، فلوتاسیون کاتیونی سیلیس به وسیله آمین‌ها در pHهای بزرگ‌تر از ۱/۸ امکان‌پذیر است.

در فرآیند فلوتاسیون، بازیابی تجمعی ذرات در مقابل زمان، تابعی به عنوان سرعت یا سینتیک فلوتاسیون می‌دهد. مدل‌های تجربی زیادی به‌وسیله محققین برای سینتیک فلوتاسیون پیشنهاد شده است [۳-۱]. مدلی که بسیاری از محققین به آن رسیده‌اند، نشان می‌دهد که فلوتاسیون نسبت به درصد ذراتی که از منطقه پالپ^۱ فلوت می‌شود، فرآیندی مرتبه اول است و رابطه سینتیکی آن در یک سلول غیر پیوسته به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود [۸-۴]:

$$R = R^* (1 - e^{-kt}) \quad (1)$$

که در این رابطه متغیرها عبارتند از:

R = بازیابی تجمعی در هر زمان

R^* = بازیابی در زمان بسیار طولانی

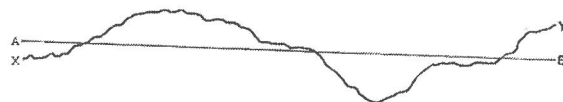
k = ثابت سینتیک مرتبه اول

t = زمان تجمعی از نقطه شروع

نمودار $(- \ln((R^* - R)/R^*))$ بر حسب زمان یک خط راست است که شیب آن برابر با ثابت سینتیک فلوتاسیون است.

زبری سطح به دلیل افت و خیزهای اطراف سطح جامد یعنی توپوگرافی سطح است که بر واکنش‌پذیری جامد اثر خواهد گذاشت [۹]. وجود عوارض (پستی و بلندی) سطح، باعث افزایش تراکم مکان‌های با انرژی بالا نسبت به سطح صاف و هموار همان ماده می‌شود [۱۰]. در شکل (۱)، اگر سطح واقعی XY باشد و AB نماینده سطح فرضی جامد با حجم هم ارز و سطح صاف باشد، رابطه (۲) زبری سطح را بیان می‌نماید [۱۱]:

$$r = \frac{\text{مساحت سطح واقعی } XY}{\text{مساحت سطح تعریف شده به وسیله } AB} \quad (2)$$



شکل (۱): مقطع عرضی سطح جامد [۱۱]

زبری سطح هم‌چنین به صورت رابطه (۳) تعریف شده است [۱۲]:

$$r = \frac{A_{BET}}{A_{GEOM}} \quad (3)$$

^۱ Pulp

سطحی ممکن است با افزایش زبری سطح زیاد شود [۱۰]. اکسترند (۲۰۰۴) با انجام آزمایش‌هایی به این نتیجه رسید که زاویه تماس در سطوح آبران زبر بزرگتر است زیرا آب نمی‌تواند در درون درزه‌ها نفوذ کند [۲۰]. کراسوسکا و همکاران (۲۰۰۷) سینتیک اتصال حباب به سطح ذرات آبران را بررسی نمودند. برای این کار آن‌ها صفحات تفلون آبران با زبری‌های مختلف را آماده کردند و زمان اتصال حباب به سطوح تفلون را اندازه‌گیری نمودند. آن‌ها دیدند که زمان اتصال برای صفحات تفلون با زبری بیشتر، کم‌تر بوده و حباب در زمان اولین برخورد متصل شد [۲۱].

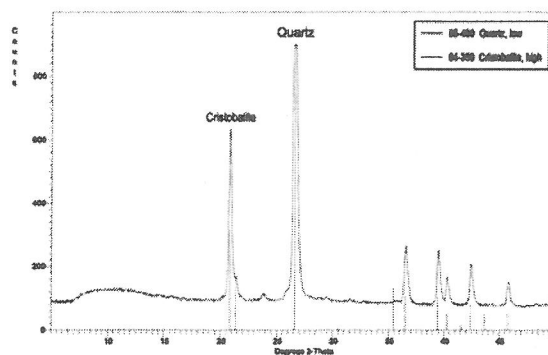
در روش‌های گفته شده، در بعضی تحقیقات برای بررسی اثر زبری سطح بر قابلیت ترشوندگی ذرات از روش اندازه‌گیری زاویه تماس استفاده شده است. همچنین در بعضی تحقیقات، اثر زبری بر قابلیت ترشوندگی ذرات بوسیله پایداری فیلم مایع میانی بررسی شده است. در برخی دیگر برای مطالعه اثر زبری سطح بر قابلیت ترشوندگی ذرات از روش میکروفلوتاسیون یا لوله هالیموند استفاده شده است.

در این تحقیق اثر زبری سطح ذرات بر قابلیت فلوتاسیون آن‌ها بررسی شده است. همچنین عامل زمان نیز در زمان بازیابی در نظر گرفته شده و بازیابی در زمان‌های گوناگون به دست آمده است که در تحقیقات اشاره شده در این مقاله، در نظر گرفته نشده است.

۲- آزمایش‌ها

۲-۱- مواد

کانی سیلیس استفاده شده از معدن سیلیس میزوج قزوین تهیه شد. آنالیزهای شیمیایی و کانی‌شناسی انجام شده به ترتیب به وسیله دستگاه‌های XRF و XRD بر روی نمونه شاهد نشان می‌دهد که این نمونه دارای ۹۸/۱ درصد SiO_2 بوده که بیانگر خلوص کافی کانی مورد مطالعه برای این تحقیق است، زیرا زبری سطح ممکن است تحت اثر ترکیب کانی‌شناسی ذرات نیز قرار گیرد.



شکل (۲): آنالیز کانی‌شناسی به روش XRD

برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون از کلکتوری^۱ با نام تجاری آرماک سی^۲ استفاده شد. این کلکتور ساخت شرکت آکزو نوبل^۳ است. نام شیمیایی این کلکتور آلکیل آمین استات^۴ است که یک کلکتور کاتیونی است.

۲-۲- روش

در این تحقیق ابتدا نمونه به وسیله سنگ‌شکن‌های فکی، مخروطی و استوانه‌ای و سپس آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای خرد شد. آسیای گلوله‌ای ساخت شرکت دنور^۵ بوده و دارای طول ۱۸۴ میلی‌متر، قطر داخلی ۲۰۰ میلی‌متر و حجم ۹۵۰۰ سانتی‌متر مکعب بوده است. زمان آسیای گلوله‌ای ۴۵ دقیقه و وزن نمونه ۱۰۰۰ گرم بود. آسیای میله‌ای ساخت شرکت دنور بوده، دارای طول ۳۶۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۱۵۰ میلی‌متر است. زمان آسیای میله‌ای ۵۵ دقیقه و وزن نمونه ۱۰۰۰ گرم بود.

آزمایش‌های فلوتاسیون در یک سلول آزمایشگاهی دنور، مدل D-۱۲ و با استفاده از سلول ۱/۵ لیتری انجام شد. برای انجام آزمایش‌های سینتیک فلوتاسیون، مقداری پودر سیلیس به وزن ۱۰۰ گرم از هر یک از محدوده‌های ابعادی محصولات آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای گفته شده به عنوان خوراک فلوتاسیون انتخاب گردید. به عبارت دیگر از هر محدوده ابعادی از محصول هر یک از آسیاها، ۱۰۰ گرم نمونه برداشت شده و با ۱۲۰۰ میلی‌لیتر آب به داخل سلول فلوتاسیون ۱/۵ لیتری ریخته شد تا پالپ مورد نظر برای آزمایش‌های فلوتاسیون تهیه گردد. این محدوده‌های ابعادی مورد نظر از محصول آسیاها، به وسیله الک کردن محصول آسیا بدست آمده بود.

برای آماده‌سازی اولیه نمونه، پالپ دارای نمونه به مدت ۲ دقیقه با دور ۱۰۰۰ دور در دقیقه به هم زده شد. سپس کلکتور به پالپ اضافه گردید. زمان آماده‌سازی کلکتور ۴ دقیقه در نظر گرفته شد. پس از اندازه‌گیری و تنظیم pH پالپ، شیر هوا باز شده و هر ۱۰ ثانیه کف‌ها جمع‌آوری گردید و سپس شیر هوا پس از ۷۰ ثانیه جمع‌آوری کف، بسته شد.

در این مطالعه برای تعیین کمی زبری از رابطه (۴) استفاده شد. در رابطه (۴) برای اندازه‌گیری زبری ذرات، سطح ویژه آن‌ها با استفاده از اطلاعات جذب گاز به روش ایزوترم BET و با استفاده از دستگاه Gimini III 2375 ساخت آمریکا، چگالی جامد و ابعاد ذرات اندازه‌گیری شد.

^۱ Collector

^۲ Armac C

^۳ Akzo Nobel Surface Chemistry AB

^۴ Coco-alkyl-amine-acetate)C-N; R22-R34-R50(

^۵ Denver

۳- نتایج و بحث‌ها

برای انجام آزمایش‌های سینتیک فلوتاسیون شرایط اولیه که در آن بازیابی فلوتاسیون بیشترین مقدار بود تعیین شد. با توجه به این‌که نقطه بار صفر (ZPC) سیلیس در حدود ۱/۸ است، در نتیجه فلوتاسیون کاتیونی آن در pHهای بیش‌تر از ۱/۸ امکان‌پذیر است. در این مطالعه pH سیلیس برابر با ۹ در نظر گرفته شد، چون در این pH بار سطحی سیلیس بیش‌ترین بار منفی را دارد و بازیابی در این pH بیشینه خواهد بود [۲۲]. برای تعیین غلظت بهینه کلکتور که بازیابی فلوتاسیون در آن بیشینه است، آزمایش‌های فلوتاسیون بر روی یک نمونه محصول آسیای گلوله‌ای (محصول ۴۵ دقیقه آسیای گلوله‌ای با d_{80} برابر با ۲۶۲ میکرون) انجام شد. جدول (۱) نتایج بازیابی فلوتاسیون در غلظت‌های مختلف کلکتور را نشان می‌دهد (نمونه برای تمام غلظت‌ها یکسان بود).

جدول (۱): نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون برای تعیین غلظت بهینه کلکتور

غلظت کلکتور (گرم در تن)	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰
بازیابی (%)	۶۸/۹۱۵	۹۴/۹۷	۹۸/۶۰۲۵	۹۷/۲۰۳۳

بنابراین آزمایش‌های سینتیک فلوتاسیون با شرایط گفته شده انجام شدند. همه آزمایش‌ها سه مرتبه تکرار شدند و قابلیت تکرارپذیری نتایج خوب بود.

۳-۱- نتایج زبری سطح ذرات

محصول آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای سیلیس، با سرند تر به مدت ۱۵ دقیقه سرند شده و در پایان محدوده‌های ابعادی ۲۱۲+۲۵۰- میکرون، ۱۸۰+۲۱۲- میکرون، ۱۲۵+۱۰۶- میکرون و ۷۵+۱۰۶- میکرون برای محاسبه زبری سطح و ثابت سینتیک فلوتاسیون انتخاب شدند. جدول (۲) نتایج اندازه‌گیری زبری سطح ذرات محدوده‌های ابعادی گفته شده را نشان می‌دهد.

جدول (۲): مقادیر سطح ویژه و زبری سطح برای پنج محدوده ابعادی از محصولات هر یک از آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای

آسیای میله‌ای		آسیای گلوله‌ای			
ابعاد (میکرون)	سطح ویژه (m^2/g)	زبری (بدون بعد)	ابعاد (میکرون)	سطح ویژه (m^2/g)	زبری (بدون بعد)
۲۵۰+۲۱۲	۰/۳۲۵۴	۳۲/۵۷۲	۲۵۰+۲۱۲	۰/۲۸۵۷	۲۸/۵۹۸
۲۱۲+۱۸۰	۰/۳۴۰۱	۲۸/۸۹۱	۲۱۲+۱۸۰	۰/۲۹۴۴	۲۵/۰۰۹
۱۵۰+۱۲۵	۰/۳۷۵۵	۲۲/۳۷۳	۱۵۰+۱۲۵	۰/۳۲۳۱	۱۹/۲۵۳
۱۲۵+۱۰۶	۰/۳۹۱۱	۱۹/۵۷۴	۱۲۵+۱۰۶	۰/۳۴۵۲	۱۷/۲۷۷
۱۰۶+۷۵	۰/۴۳۶۴	۱۷/۱۱۴	۱۰۶+۷۵	۰/۳۹۵۸	۱۵/۵۲۱۹

همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود، برای هر دو محصولات آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای با کاهش ابعاد ذره، سطح ویژه افزایش می‌یابد. همچنین برای یک محدوده ابعادی خاص، سطح ویژه آسیای میله‌ای بیش‌تر از گلوله‌ای است. برای هر دو آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای با کاهش ابعاد ذره، زبری سطح ذره کاهش می‌یابد. از آنجا که با کاهش ابعاد ذره سطح ویژه زیاد می‌شود، انتظار می‌رود که با کاهش ابعاد ذره زبری سطح ذره زیاد شود، اما طبق رابطه (۴) 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 اثر کاهش ابعاد بیش‌تر از افزایش سطح ویژه است و از این رو زبری سطح ذره کاهش می‌یابد. از طرف دیگر در جدول (۲) دیده می‌شود، برای یک ابعاد خاص، زبری سطح ذرات محصولات آسیای میله‌ای بیش‌تر از آسیای گلوله‌ای است زیرا ابعاد ذره ثابت است و سطح ویژه محصولات آسیای میله‌ای بیش‌تر از آسیای گلوله‌ای است. بالاتر بودن سطح ویژه و در نتیجه زبری سطح محصولات آسیای میله‌ای نسبت به آسیای گلوله‌ای به این دلیل است که آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای روش‌های خردایش متفاوتی دارند. در آسیاهای گلوله‌ای و میله‌ای به ترتیب از گلوله‌ها و میله‌ها به عنوان بار خردکننده یا واسطه خردایش استفاده می‌شود. گلوله‌ها و میله‌ها بر روی ذرات به ترتیب، بار نقطه‌ای و خطی اعمال می‌کنند. نیروی غالب شکست در آسیای گلوله‌ای، سایش، کلیواژ و لب‌پر شدن است در صورتی‌که ضربه، عامل اصلی شکست، در آسیای میله‌ای است که سبب زبری بیش‌تر ذرات می‌شود [۲۳].

۳-۲- اثر نوع خردایش بر فلوتاسیون

برای جداسازی موفق در فلوتاسیون، برخورد و اتصال حباب با ذره‌ها باید اتفاق بیفتد. به همین دلیل فیلم مایع میانی بین حباب و ذره در طول برخوردهای حباب و ذره جامد باید گسیخته شود. رفتار و پایداری فیلم به طور قوی به خصوصیات جامد مثل درجه آبرانی، یکنواخت بودن، زبری و بار الکتریکی بستگی دارد. اگر سطح جامد آب‌پذیر باشد، لایه مایع نازک بسیار پایدار است، ولی برای جامدات آبران فیلم مایع پایداری کم‌تری دارد و گسیخته می‌شود [۲۱].

برای بررسی اثر زبری سطح بر روی سینتیک فلوتاسیون ذرات، ثابت سینتیک فلوتاسیون محصولات آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای اندازه‌گیری شد. جدول (۳) نتایج فلوتاسیون را برای محدوده ابعادی ۲۱۲+۲۵۰ میکرون محصول آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای نشان می‌دهد. با توجه به رابطه (۴) برای محاسبه زبری، در مورد محدوده ابعادی ۲۱۲+۲۵۰ میکرون همه

جدول (۴): بازبایی در زمان‌های مختلف برای محدوده ابعادی ۱۸۰+۲۱۲- میکرون محصول آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای

آسیای گلوله‌ای			آسیای میله‌ای		
زمان تجمعی (ثانیه)	بازبایی (%)	بازبایی تجمعی (%)	زمان تجمعی (ثانیه)	بازبایی (%)	بازبایی تجمعی (%)
۱۰	۶۰/۲۹	۶۰/۲۹	۱۰	۶۵/۵۰۸	۶۵/۵۰۸۸
۲۰	۲۹/۴۱	۸۹/۷۰	۲۰	۲۵/۵۵۶	۹۱/۰۶۵۵
۳۰	۵/۹۳۲	۹۵/۶۳۴	۳۰	۵/۸۳۶۷	۹۶/۹۰۲۳
۴۰	۲/۳۹۹	۹۸/۰۳۳	۴۰	۲/۰۵۶۸	۹۸/۹۵۹
۵۰	۱/۱۵۳	۹۹/۱۸۷	۵۰	۰/۴۲۴۷	۹۹/۳۸۴
۶۰	۰/۳۷۹	۹۹/۵۶۶	۶۰	۰/۲۶۸۶	۹۹/۶۵۲۴
۷۰	۰/۲۰۶۳	۹۹/۷۷۲۳	۷۰	۰/۱۵۴۸	۹۹/۸۰۷
شناور نشده = ۰/۲۲۷۷			شناور نشده = ۰/۱۹۳		
$-\ln((R^*-R)/R^*)=kx+B$			$-\ln((R^*-R)/R^*)=kx+B$		
$k = ۶/۱۱۵۳۷ \text{ (min}^{-1}\text{)}$			$k = ۶/۳۹۷۰۶ \text{ (min}^{-1}\text{)}$		
$B = ۰/۰۶۱۴۴۹۸۵$			$B = ۰/۲۲۴۹۰۱$		
$r^2 = ۰/۹۹۵۹۸۴$			$r^2 = ۰/۹۹۱۱۱۹$		

جدول (۵) نتایج فلوتاسیون را برای محدوده ابعادی ۱۲۵+۱۵۰- میکرون محصول آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود، زبری سطح محدوده ابعادی ۱۲۵+۱۵۰- میکرون محصول آسیای میله‌ای برابر با ۲۲/۳۷۳ و زبری سطح محدوده ابعادی ۱۲۵+۱۵۰- میکرون محصول آسیای گلوله‌ای برابر با ۱۹/۲۵۳ است. در جدول (۵) دیده می‌شود که محصول آسیای میله‌ای که زبری سطح آن بیش‌تر است، سینتیک شناورسازی سریع‌تری دارد.

جدول (۶) نتایج فلوتاسیون را برای محدوده ابعادی ۱۰۶+۱۲۵- میکرون محصول آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود، زبری سطح محدوده ابعادی ۱۰۶+۱۲۵- میکرون محصول آسیای میله‌ای برابر با ۱۹/۵۷۴ و زبری سطح محدوده ابعادی ۱۰۶+۱۲۵- میکرون محصول آسیای گلوله‌ای برابر با ۱۷/۲۷۷ است. در جدول (۶) دیده می‌شود که محصول آسیای میله‌ای که زبری سطح آن بیش‌تر است، سینتیک شناورسازی سریع‌تری دارد.

عوامل ثابت هستند و فقط سطح ویژه متغیر است که ناشی از تغییر نوع خردایش و متفاوت بودن روش خردایش در آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای است. همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود، زبری سطح محدوده ابعادی ۲۱۲+۲۵۰- میکرون محصول آسیای میله‌ای برابر با ۳۲/۵۷۲ و زبری سطح محدوده ابعادی ۲۱۲+۲۵۰- میکرون محصول آسیای گلوله‌ای برابر با ۲۸/۵۹۸ است. در جدول (۳) دیده می‌شود که محصول آسیای میله‌ای که زبری سطح آن بیش‌تر است، سینتیک شناورسازی سریع‌تری دارد.

جدول (۴) نتایج فلوتاسیون را برای محدوده ابعادی ۱۸۰+۲۱۲- میکرون محصول آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود، زبری سطح محدوده ابعادی ۱۸۰+۲۱۲- میکرون محصول آسیای میله‌ای برابر با ۲۸/۸۹۱ و زبری سطح محدوده ابعادی ۱۸۰+۲۱۲- میکرون محصول آسیای گلوله‌ای برابر با ۲۵/۰۰۹ می‌باشد. با توجه به جدول (۴) محصول آسیای میله‌ای که زبری سطح آن بیش‌تر است، سینتیک شناورسازی سریع‌تری دارد.

جدول (۳): بازبایی در زمان‌های مختلف برای محدوده ابعادی ۲۱۲+۲۵۰- میکرون محصول آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای

آسیای گلوله‌ای			آسیای میله‌ای		
زمان تجمعی (ثانیه)	بازبایی (%)	بازبایی تجمعی (%)	زمان تجمعی (ثانیه)	بازبایی (%)	بازبایی تجمعی (%)
۱۰	۶۰/۴۶	۶۰/۴۶	۱۰	۶۱/۳۳	۶۱/۳۳
۲۰	۲۸/۴۵	۸۸/۹۱	۲۰	۳۱/۰۳	۹۲/۳۵۹
۳۰	۷/۹۸	۹۶/۸۹	۳۰	۴/۸۱۰	۹۷/۱۷۰
۴۰	۱/۹۹	۹۸/۸۸	۴۰	۱/۷۵۲	۹۸/۹۲۳
۵۰	۰/۳۴۵	۹۹/۲۳	۵۰	۰/۵۸۷	۹۹/۵۱۰
۶۰	۰/۲۹۷	۹۹/۵۰	۶۰	۰/۲۲۹	۹۹/۷۳۹
۷۰	۰/۲۰۱	۹۹/۷۰	۷۰	۰/۱۱۵	۹۹/۸۵۵
شناور نشده = ۰/۳۰			شناور نشده = ۰/۱۵		
$-\ln((R^*-R)/R^*)=kx+B$			$-\ln((R^*-R)/R^*)=kx+B$		
$k = ۶/۳۴۱۲۲۵ \text{ (min}^{-1}\text{)}$			$k = ۶/۷۵۰۳ \text{ (min}^{-1}\text{)}$		
$B = ۰/۱۴۹۳۷۷$			$B = ۰/۱۰۷۳۵۰۶$		
$r^2 = ۰/۹۷۹۶۵$			$r^2 = ۰/۹۸۷۶۵$		

جدول (۵): بازیابی در زمان‌های مختلف برای محدوده ابعادی ۱۵۰+۱۲۵- میکرون محصول آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای

آسیای گلوله‌ای			آسیای میله‌ای		
زمان تجمعی (ثانیه)	بازیابی (%)	بازیابی تجمعی (%)	زمان تجمعی (ثانیه)	بازیابی (%)	بازیابی تجمعی (%)
۱۰	۵۰/۵۶۶	۵۰/۵۶۶	۱۰	۶۰/۲۵	۶۰/۲۵
۲۰	۳۳/۱۰	۸۳/۶۶۰	۲۰	۲۸/۷۵	۸۹
۳۰	۹/۱۵۸	۹۲/۸۲۳	۳۰	۶/۶۷۷۶	۹۵/۶۷۸
۴۰	۴/۲۸۰	۹۷/۱۰۴	۴۰	۲/۰۹۴۷	۹۷/۷۷۲
۵۰	۱/۶۸۹۱	۹۸/۷۹۳	۵۰	۱/۱۳۵	۹۸/۹۰۷
۶۰	۰/۵۵۱	۹۹/۳۴۵	۶۰	۰/۴	۹۹/۳۰۸
۷۰	۰/۴۵۱	۹۹/۷۹۶	۷۰	۰/۲۳۲	۹۹/۵۴
شناور نشده = ۰/۲۰۳۹			شناور نشده = ۰/۴۶		
$-\ln((R^*-R)/R^*)=kx+B$			$-\ln((R^*-R)/R^*)=kx+B$		
$k=۵/۶۱۳۷۳ \text{ (min}^{-1}\text{)}$			$k=۵/۹۴۵۳ \text{ (min}^{-1}\text{)}$		
$B=-۰/۱۴۰۹۲۳$			$B=-۰/۱۵۶۱۶۱$		
$r^2=۰/۹۹۸۳۱۲۸$			$r^2=۰/۹۹۳۸۵$		

جدول (۷) نتایج فلوتاسیون را برای محدوده ابعادی ۱۰۶+۷۵- میکرون محصول آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۲)، زبری سطح محدوده ابعادی ۱۰۶+۷۵- میکرون محصول آسیای میله‌ای برابر با ۱۷/۱۱۴ و زبری سطح محدوده ابعادی ۱۰۶+۷۵- میکرون محصول آسیای گلوله‌ای برابر با ۱۵/۵۲۱۹ است. در جدول (۷) دیده می‌شود که محصول آسیای میله‌ای که زبری سطح آن بیشتر است، سینتیک شناورسازی سریع‌تری دارد.

همان‌طور که بررسی شد برای هر یک از محدوده‌های ابعادی، زبری سطح آسیای میله‌ای بیشتر از آسیای گلوله‌ای است. همچنین برای هر یک از محدوده‌های ابعادی، سینتیک فلوتاسیون برای محصول آسیای میله‌ای که زبری بیش‌تری نسبت به محصول آسیای گلوله‌ای دارد، افزایش پیدا می‌کند.

۳-۳- اثر ابعاد ذرات بر سینتیک فلوتاسیون

همان‌طور که در جدول (۲) دیده شد، برای هر یک از محصولات آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای به طور جدا از با کاهش ابعاد ذره، زبری سطح ذره کاهش می‌یابد.

جدول (۶): بازیابی در زمان‌های مختلف برای محدوده ابعادی ۱۰۶+۱۲۵- میکرون محصول آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای

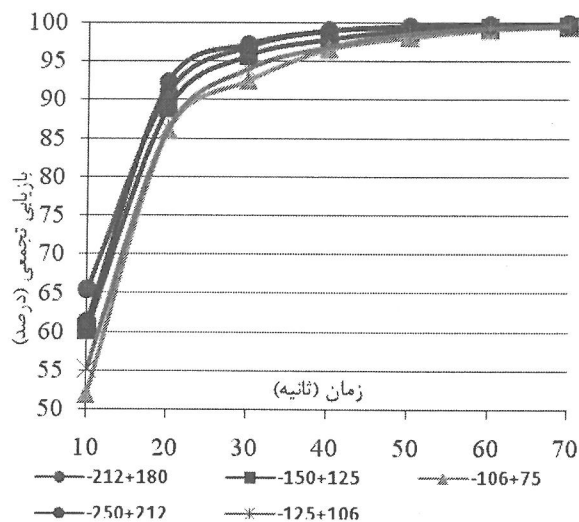
آسیای گلوله‌ای			آسیای میله‌ای		
زمان تجمعی (ثانیه)	بازیابی (%)	بازیابی تجمعی (%)	زمان تجمعی (ثانیه)	بازیابی (%)	بازیابی تجمعی (%)
۱۰	۴۸/۹۸۸۴	۴۸/۹۸۸۴	۱۰	۵۵/۳۱	۵۵/۳۱
۲۰	۳۲/۷۸	۸۱/۸۶۶۳	۲۰	۳۱/۱۸	۸۶/۴۹
۳۰	۱۰/۴۸	۹۲/۳۴۴۴	۳۰	۷/۴۸	۹۳/۹۶۹
۴۰	۳/۸۹۶	۹۶/۲۴۰۸	۴۰	۲/۸۳۴	۹۶/۸۰۳
۵۰	۲/۱۶۱	۹۸/۴۰۱۹	۵۰	۱/۶۶۸	۹۸/۴۷۱
۶۰	۰/۷۶۸	۹۹/۱۶۹۷	۶۰	۰/۷۳۵	۹۹/۲۰۶
۷۰	۰/۵۱۳	۹۹/۶۸۳۱	۷۰	۰/۳۱۴	۹۹/۵۲۰
شناور نشده = ۰/۳۱۶۹			شناور نشده = ۰/۴۸		
$-\ln((R^*-R)/R^*)=kx+B$			$-\ln((R^*-R)/R^*)=kx+B$		
$k=۵/۴۱ \text{ (min}^{-1}\text{)}$			$k=۵/۶۶ \text{ (min}^{-1}\text{)}$		
$B=-۰/۱۶۲$			$B=-۰/۰۲۷۶۵۴$		
$r^2=۰/۹۹۸۵۰$			$r^2=۰/۹۹۳۳۷۰$		

جدول (۷): بازیابی در زمان‌های مختلف برای محدوده ابعادی ۱۰۶+۷۵- میکرون محصول آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای

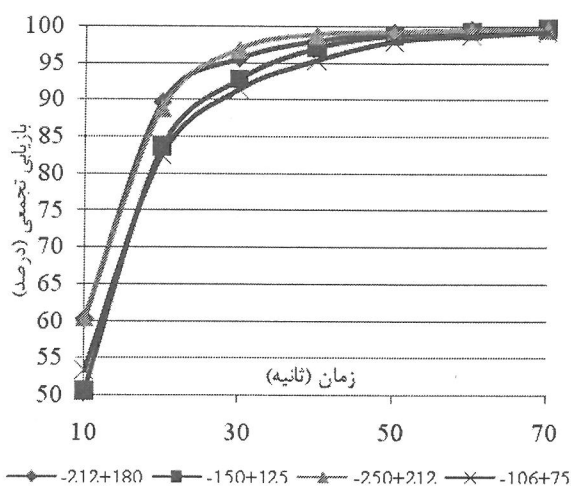
آسیای گلوله‌ای			آسیای میله‌ای		
زمان تجمعی (ثانیه)	بازیابی (%)	بازیابی تجمعی (%)	زمان تجمعی (ثانیه)	بازیابی (%)	بازیابی تجمعی (%)
۱۰	۵۳/۳۷	۵۳/۳۶۷۸	۱۰	۵۲	۵۲
۲۰	۲۹/۲۰	۸۲/۵۶۹۲	۲۰	۳۴	۸۶
۳۰	۸/۹۲۱	۹۱/۴۹۰۴	۳۰	۶/۴۷	۹۲/۴۷
۴۰	۳/۹۴۲	۹۵/۴۳۲۰	۴۰	۴/۰۵	۹۶/۵۲
۵۰	۲/۶۲۲	۹۸/۰۶۴۳	۵۰	۱/۴۸۱۹	۹۸/۰۰۲
۶۰	۰/۷۰۹	۹۸/۷۷۳۶	۶۰	۱/۰۰۸۳	۹۹/۰۱۰
۷۰	۰/۵۶۵	۹۹/۳۳۹	۷۰	۰/۴۰۲۷	۹۹/۴۱۱
شناور نشده = ۰/۶۶۱			شناور نشده = ۰/۵۸۹		
$-\ln((R^*-R)/R^*)=kx+B$			$-\ln((R^*-R)/R^*)=kx+B$		
$k=۵/۲۱۷۹ \text{ (min}^{-1}\text{)}$			$k=۵/۳۹۵۴۷ \text{ (min}^{-1}\text{)}$		
$B=-۰/۰۶۷۲۹۹$			$B=-۰/۰۲۹۶$		
$r^2=۰/۹۹۶۲۹$			$r^2=۰/۹۹۰۴۷۶$		

نتایج آزمایش‌های سینتیک فلوتاسیون برای محصولات آسیای میله‌ای نشان می‌دهد که سرعت فلوتاسیون با کاهش ابعاد ذره کاهش می‌یابد. بنابراین برای محصول آسیای میله‌ای با کاهش زبری سطح، سرعت فلوتاسیون کم می‌شود. شکل (۳) نمودار بازیابی تجمعی بر حسب زمان را برای محدوده‌های

مشترک مایع-گاز برای سطوح زبرتر نسبت به سطوح صاف و نرم مورد نیاز است. در آزمایش‌های جداسازی، کاهش خط تماس سه فاز اتفاق می‌افتد. این کاهش روی سطح زره سبب تر شدن و فرو رفتن زره در مایع می‌شود. آن‌ها همچنین بیان کردند که زبری سطح برای فرآیند جداسازی و بازیابی نهایی فلوتاسیون بیش‌تر از شکل زره اثر دارد [۲۶].



شکل (۳): بازیابی جمعیتی بر حسب زمان برای محدوده‌های ابعادی مختلف محصول آسیای میله‌ای



شکل (۴): بازیابی جمعیتی بر حسب زمان برای محدوده‌های ابعادی مختلف محصول آسیای گلوله‌ای

۴- نتیجه‌گیری

زبری سطح به دلیل پستی و بلندی‌های اطراف سطح جامد است که در فرآیندهایی مانند فلوتاسیون می‌تواند نقش مهمی داشته باشد. در این مطالعه، زبری سطح برای محدوده‌های ابعادی مختلف محصولات آسیای میله‌ای و گلوله‌ای بوسیله

ابعادی مختلف آسیای میله‌ای نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌های سینتیک فلوتاسیون برای محصولات آسیای گلوله‌ای نشان می‌دهد که سرعت فلوتاسیون با کاهش ابعاد زره کاهش می‌یابد. بنابراین برای محصول آسیای گلوله‌ای با کاهش زبری سطح، سرعت فلوتاسیون کم می‌شود. شکل (۴) نمودار بازیابی جمعیتی بر حسب زمان را برای محدوده‌های ابعادی مختلف آسیای گلوله‌ای نشان می‌دهد.

از مجموع مطالب این مطالعه نتیجه گرفته می‌شود که با کاهش زبری سطح ذرات، سینتیک شناورسازی ذرات کاهش پیدا می‌کند.

نتایج این تحقیق با نتایج فنگ و همکاران [۱۸]، اکسترند [۲۰]، کراسوسکا و همکاران [۲۱]، آنفرانس و کیچنر [۲۵]، احمد و همکاران [۲۶]، داکر و همکاران [۲۷] و اسپولز و همکاران [۲۸] سازگار است. نگوین (۱۹۹۷) اتصال حباب به سطح زره را به طور دقیق بررسی نمود. او پیشنهاد داد که سه فرآیند برای قبل از مرحله تماس برای اتصال زره به حباب باید اتفاق بیفتد [۲۴]:

- ۱- نازک شدن فیلم مایع میانی به ضخامت بحرانی برای شروع پاره شدن فیلم
 - ۲- پاره شدن فیلم مایع یعنی تشکیل شعاع بحرانی ترشوندگی تماس سه فاز
 - ۳- گسترش خط تماس سه فاز از شعاع بحرانی تا زمانی که اتصال پایدار به وجود آید.
- کراسوسکا و همکاران در مطالعات خود، دلیل اینکه زبری، اثر بحرانی بر زمان برخورد و اتصال حباب دارد را این‌طور بیان کردند [۲۱]:

- ۱- زبری سطح بالاتر یعنی وجود بلندی‌های بزرگ‌تر روی سطح که باعث افزایش احتمال پاره شدن فیلم مایع نازک شده که سبب پاره شدن سریع‌تر فیلم می‌شود.
- ۲- در سطوح زبرتر فضاهای خالی وسیع‌تری وجود دارد که باعث ایجاد میزان بیش‌تری گاز در آنجا می‌شود.

آنفرانس و کیچنر (۱۹۹۷) بیان کردند که زبری سطح باعث می‌شود که فیلم مایع حتی هنگامی که زاویه تماس کم است، راحت‌تر گسیخته شود. آن‌ها بیان کردند که در مورد ذرات صاف سرعت ربایش بوسیله حباب به عمل نیروهای دو لایه الکتریکی در طول نازک شدن فیلم مایع حساس‌تر است [۲۵].

احمد (۲۰۱۰) بیان کرد که زبری سطح، نقشی مهم در فرآیند جداسازی و کارایی فرآیند فلوتاسیون دارد. این رابطه به مقادیر بزرگ‌تر محیط تماس سه فاز برای ذرات زبر نسبت به ذرات صاف و نرم نسبت داده می‌شود. بنابراین زمان بیش‌تر یعنی نیروی جداسازی بزرگ‌تری برای جداسازی ذرات از فصل

دادند که برای هر یک از آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای، با کاهش ابعاد ذرات که زبری سطح محصولات هر دو آسیا کاهش می‌یابد، سینتیک شناورسازی محصولات هر دو آسیا کاهش می‌یابد. همچنین برای یک محدوده ابعادی خاص، محصول آسیای میله‌ای که سطح آن زبری بزرگتری دارد، سرعت شناور شدن آن نیز بیشتر است.

بنابراین سرعت فلوتاسیون ذرات با کاهش زبری سطح کاهش می‌یابد. زیرا زبری سطح باعث می‌شود که فیلم مایع حتی هنگامی که زاویه تماس کم است، راحت‌تر گسیخته شود.

اندازه‌گیری سطح ویژه ذرات با استفاده از اطلاعات جذب گاز به روش ایزوترم BET اندازه‌گیری شد. برای هر دو محصولات آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای دیده شد که با کاهش ابعاد ذرات، زبری سطح ذرات کاهش می‌یابد، اما سطح ویژه زیاد می‌شود. برای یک محدوده ابعادی خاص، محصول آسیای میله‌ای سطح ویژه بزرگتری نسبت به محصول آسیای گلوله‌ای دارد و در نتیجه در یک محدوده ابعادی خاص، زبری سطح محصول آسیای میله‌ای بزرگتر از محصول آسیای گلوله‌ای است. این موضوع به این دلیل است که آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای روش شکست متفاوتی دارند. نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون نشان

۵- مراجع

- [۱۳] Hodson, M.E.; "Micropore surface area variation with grain size in unweathered alkali feldspars: Implications for surface roughness and dissolution studies", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62, pp. 3429-3435, 1998
- [۱۴] Hicyilmaz, C.; Ulusoy, U.; Bilgen, S.; Yekeler, M.; "Flotation responses to the morphological properties of particles measured with three-dimensional approach", *International Journal of Mineral Processing*, 75, pp. 229-236, 2005.
- [۱۵] Orumwense, O.A.; Forssberg, E.; "Surface and structural changes in wet ground minerals", *Powder Technology*, 68, pp. 23-29, 1991.
- [۱۶] Zbik, M.; Smart, R.C.; "Influence of dry grinding on talc and kaolinite morphology: inhibition of nano-bubble formation and improved dispersion", *Minerals Engineering*, 18, pp. 969-976, 2005.
- [۱۷] Ulusoy, U.; Yekeler, M.; Hicyilmaz, C.; "Characterization of surface roughness of Calcite by BET and Surtronic 3+ Techniques", In: O' zbayog'lu, G. (Ed.), 18th International Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET, Antalya, Turkey, pp. 425-429, June 10-13, 2003.
- [۱۸] Feng, D.; Aldrich, C.; "A comparison of the flotation of ore from the Merensky Reef after wet and dry grinding", *International Journal of Mineral Processing*, 60, pp. 115-129, 2000.
- [۱۹] Oliver, J.F.; Huh, C.; Mason, S.G.; "An experimental study of some effects of solid surface roughness on wetting", *Coll. Surfaces 1*, pp. 79-104, 1980.
- [۲۰] Extrand, C.W.; "Criteria for ultralyophobic surfaces", *Langmuir*, 20, pp. 5013-5018, 2004.
- [۲۱] Krasowska, M.; Malysa, K.; "Kinetics of bubble collision and attachment to hydrophobic solids: I. Effect of surface roughness", *International Journal of Mineral Processing*, 81, pp. 205-216, 2007.
- [۲۲] Vieira, A.M.; Peres, A.E.C.; "The effect of amine type, pH, and size range in the flotation of quartz", *Minerals Engineering*, 20, pp. 1008-1013, 2007.
- [۲۳] Hicyilmaza, C.; Ulusoy, U.; Yekeler, M.; "Effects of the shapes properties of talc and quartz particles", *Applied Surface Science*, 233, pp. 204-212, 2004
- [۱] Polat, M.; Chander, S.; "First-order flotation kinetics models and methods for estimation of the true distribution of flotation rate constants", *International Journal of Mineral Processing*, 58 (1-4), pp.145-166, 2000.
- [۲] Kuopanportti, H.; Suorsa, T.; Dahl, O.; Niinimaki, J.; "A model of conditioning in the flotation of a mixture of pyrite and chalcopyrite ores", *International Journal of Mineral Processing*, 59 (4), pp. 327-338, 2000.
- [۳] Klimpel, R.R.; "Optimizing the industrial flotation performance of sulfide minerals having some natural floatability", *International Journal of Mineral Processing*, 58 (1-4), pp. 77-84, 2000.
- [۴] Xu, M.; "Modified flotation rate constant and selectivity index", *Minerals Engineering*, 11 (3), pp. 271-278, 1998.
- [۵] Oliveira, J.F.; Saraiva, S.M.; Pimenta, J.S.; Oliveira, A.P.A.; "Kinetics of pyrochlore flotation from Arax a mineral deposits", *Minerals Engineering*, 14 (1), pp. 99-105, 2001.
- [۶] Agar, G.E.; Chia, J.; Requis, C.L.; "Flotation rate measurements to optimize an operating circuit", *Minerals Engineering*, 11 (4), pp. 347-360, 1998.
- [۷] Jameson, G.J.; Nam, S.; Moo Young, M.; "Physical factors affecting recovery rates in flotation", *Miner. Sci. Eng.*, 9, pp. 103-108, 1977.
- [۸] Çilek, E.C.; "Estimation of flotation kinetic parameters by considering interactions of the operating variables", *Minerals Engineering*, 17 (1), 81-85, 2004.
- [۹] Szeleifer, I.; Shaul, A.B.; Gelbert, W.M.; "Chain statistics in micelles and bilayers: effects of surface roughness and internal energy", *J. Chem. Phys.*, 85 (9), pp. 5345-5358, 1986.
- [۱۰] Hogg, R.; "Characterization of mineral surfaces", in Somasundaran, P. (Ed.), *Fine Particle Processing*, vol. I. Society of Mining Engineers of AIME, New York, pp. 492-524, 1980.
- [۱۱] Jaycock, M.J.; Parfitt, G.D.; *Chemistry of Interfaces*, Ellis Horwood Publications, pp.156-161, 1981.
- [۱۲] Hodson, M.E.; Lee, M.R.; Parsons, I.; "Origins of the surface roughness of unweathered alkali feldspar grains", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, pp. 3885-3896, 1997.

- Ducker, W.A.; Pashley, R.M.; Ninham, B.W.; "The flotation of quartz using a double-chained cationic surfactant", J. Colloid Interface Sci ,128 (1), pp. 66-75, 1989 [۲۷]
- Shulze, H.J.; Stockelheuber, K.W.; Wenger, A.; " The influence of acting forces on the rupture mechanism of wetting films-nucleation or capillary waves", Colloids and Surfaces, A Physicochemical and Engineering Aspects, 192, pp. 61-72, 2001. [۲۸]
- Nguyen, A.V.; Schulze, H.J.; Ralston, J.; "Elementary steps in particle-bubble attachment", International Journal of Mineral Processing, 51, 183-195, 1997. [۲۴]
- Anfruns, J.F.; Kitchener, J.A.; "Rate of capture of small particles in flotation", Trans. IMM, Sec. C 86, C9-C15, 1997. [۲۵]
- Ahmed , M.M; "Effect of comminution on particle shape and surface roughness and their relation to flotation", International Journal of Mineral Processing, xxx (2010) xxx-xxx. [۲۶]