



بررسی آزمایشگاهی تاثیر سرعت آسیا، حجم شارژ، غلظت و حجم پرشدگی دوغاب بر سایش لاینرهای آسیاهای گردان

مسلم محمدی سلیمانی¹، مجید فولادی ماهانی^{2*}، مسعود رضایی زاده³، مهدی بحیرایی⁴

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر، کرمان

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر، کرمان

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی و فناوری پیشرفته، کرمان

4- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر، رفسنجان

* کرمان، صندوق پستی 7618868366، fooladi@uk.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 دی 1393

پذیرش: 12 بهمن 1393

ارائه در سایت: 11 اسفند 1393

کلید واژگان:

آسیای گردان

نرخ سایش

خردایش تر

غلظت دوغاب

حجم پرشدگی دوغاب

آسیا کردن یکی از مراحل مهم عملیاتی در فرآوری مواد معدنی است. جهت محافظت پوسته آسیا و انتقال انرژی به مواد و گلوله‌های داخل آسیا از لاینر استفاده می‌گردد. در طول کارکرد آسیا، لاینرها دچار سایش (کاهش جرم) شده و بازدهی آسیا را کاهش می‌دهند. شناخت و بررسی عواملی که باعث کاهش سایش لاینرها می‌شود، بسیار مهم است. در این پژوهش علاوه بر بررسی رفتار سایشی لاینرهای آسیا در شارژ و سرعت‌های مختلف، نرخ سایش براساس غلظت و حجم پرشدگی دوغاب نیز مورد بررسی قرار گرفته است. عامل عمده ضربه در آسیا، حرکت آبشاری بزرگ می‌باشد. این عامل و اثر تشکیل استخر دوغاب بر سایش نیز مطالعه شده است. برای این منظور از آسیای آزمایشگاهی به قطر یک و طول نیم متر استفاده گردید. آزمایش‌ها در سه سرعت 65٪، 75٪ و 85٪ سرعت بحرانی، برای شارژهای 15، 20، 25 و 30 درصد حجم آسیا، دوغاب‌هایی با 40٪، 50٪، 60٪، 70٪ و 100٪ جامد و حجم پرشدگی دوغاب بین 0/5 تا 3 انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در شارژ 20٪ و سرعت 75٪ بالاترین نرخ سایش اتفاق می‌افتد. همچنین در شرایط تر، با افزایش غلظت و حجم پرشدگی دوغاب در آسیا، سایش لاینر کاهش می‌یابد. در شرایط خشک، با افزایش خوراک در آسیا و افزایش نیروی نرمال، سایش لاینرها افزایش می‌یابد. از سویی سایش لاینرها در شرایط تر، بستگی به غلظت دوغاب بین 2 تا 4 برابر سایش در شرایط خشک می‌باشد.

Experimental study of mill speed, charge filling, slurry concentration, and slurry filling on the wear of lifters in tumbling mills

Moslem Mohammadi Soleymani¹, Majid Fooladi Mahani^{1*}, Massoud Rezaeizadeh², Mehdi Bahiraie³

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University, Rafsanjan, Iran

* P.O.B. 7618868366 Kerman, Iran, fooladi@uk.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 04 January 2015
Accepted 01 February 2015
Available Online 02 March 2015

Keywords:

Tumbling mill
Wear rate
Wet grinding
Slurry concentration
Slurry filling

ABSTRACT

Milling is one of the most important operational stages in processing the minerals. Lifters are usually used with mill liners to extend their life and to enhance the grinding and crushing efficiency. Lifters become worn and consequently their dimensions change during the course of operation. These changes in dimensions have a significant influence on the overall economic performance of the mills. Therefore, it is useful to know the relationship between the mill operation and the lifter profile, and the influence of lifter wear on the change in lifter profile. The wear is influenced by a range of parameters such as: media charge level, slurry filling, slurry concentration, and mill speed. In this work, the influences of these operating parameters were investigated using a pilot mill (1000 × 500 mm). To this end, a Copper ore was used to prepare slurry at 40%, 50%, 60%, 70%, and 100% solids concentration by mass. The tests covered a range of slurry filling (U) from 0.5 to 3 with solid charge between 15% and 30% of mill volume and 3 different speeds 65%, 75% and 85% of critical speed. It is found that the mill charge and the mill speed significantly affect the wear rate. For wet condition, increase in the slurry concentration and slurry filling leads to a remarkable decrease in the amount of the wear. By increase in the feed filling (in dry condition) the wear increases too. Wear rate in wet conditions is 2-4 times that of dry condition.

1- مقدمه

تا 5 متر است که از صفحات فولادی ساخته شده و توان مصرفی آن تا 22

مگاوات می‌رسد. خوراک آسیا یعنی همان ماده ریخته شده درون آسیا به

آسیای گردان شامل یک لوله استوانه‌ای دوار به قطر 2/5 تا 12 متر و طول 3

Please cite this article using:

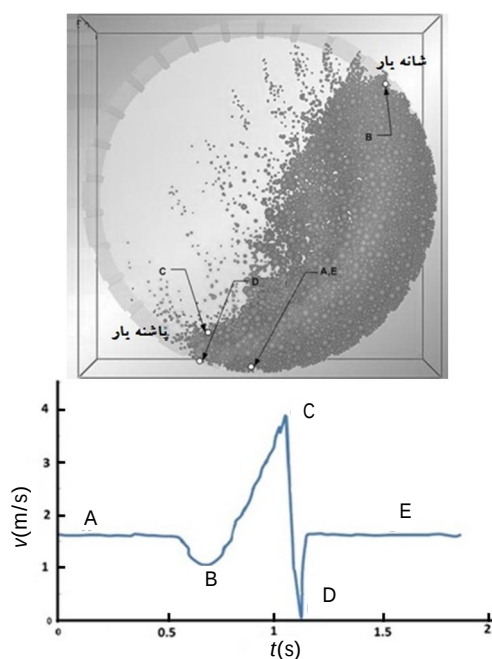
M. Mohammadi Soleymani, M. Fooladi Mahani, M. Rezaeizadeh, M. Bahiraie, Experimental study of mill speed, charge filling, slurry concentration, and slurry filling on the wear of lifters in tumbling mills, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 265-271, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

سال 1998 با روش المان گسسته²، کالالا و همکاران [7] در سال 2005 به کمک یک روش تحلیلی، برای پیش‌بینی سایش مدل‌هایی ارائه کرده‌اند. بنیسی و همکاران [8,9] با استفاده از یک ابزار مخصوص، نرخ سایش لاینرها در یک آسیای واقعی به قطر 10 متر را بررسی نمود. رازیوسکی [10] در سال 2005 نشان داد که گلوله‌ها در داخل آسیا به دلیل ایجاد ضربه موجب سایش می‌شوند، اما این سایش ناچیز است. براساس نظر رازیوسکی عامل اصلی سایش بواسطه ذرات ساییده در نواحی تماس می‌باشد و رابطه (1) را ارائه نمود.

$$\dot{m} = \rho \frac{\tan \beta_F}{\pi H_r} \mu F \dot{x} \quad (1)$$

ρ دانسیته فلز، β زاویه سایش، F نیروی نرمال در ناحیه تماس، H_r سختی فلز، μ ضریب اصطکاک، و $\dot{x}$ سرعت لغزشی می‌باشد. او همچنین نشان داد که در شرایطی که نیروی نرمال و سرعت نسبی ثابت باشند، ضریب اصطکاک و زاویه سایش اثر قابل ملاحظه‌ای ندارند و از طرفی سختی فلز در شرایط کاری آسیا معمولاً تغییر نمی‌کند. رضایی‌زاده و همکاران [11] با محاسبه تحلیلی نیروی نرمال و محاسبه سرعت نسبی با روش المان گسسته، مدل بالا را بهبود بخشیدند. شکل 1 پروفیل سرعت ذرات در یک آسیای به قطر یک متر به همراه تغییرات سرعت گلوله را در یک سیکل حرکتی نشان می‌دهد. زمانی که ذره در تماس کامل با پوسته است و به سمت بالا حرکت می‌کند سرعت آن نزدیک به سرعت پوسته آسیا بوده و سرعت نسبی به سمت صفر میل می‌کند (نقطه A). هنگامی که گلوله به شانه بار (نقطه B) نزدیک می‌شود، سرعت آن بدلیل لغزش و غلتش روی لاینر افت پیدا می‌کند. سپس گلوله وارد ناحیه پرواز (حرکت آبخاری) می‌شود و در ناحیه C گلوله با سرعت ماکزیمم در پاشنه بار فرود می‌آید و سرعت آن به سرعت آسیا نزدیک می‌شود. در نقطه B و D سرعت ذرات کمتر از سرعت آسیا می‌باشد. سرعت ذرات در عمق ناحیه پاشنه کمتر از 0/5 متر بر ثانیه می‌باشد. به عبارتی سرعت نسبی در ناحیه بین C و D به شدت تغییر کرده و بیشترین تغییرات را دارد.

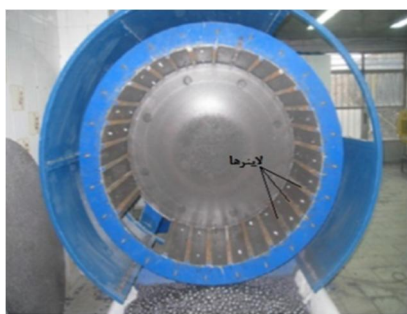


شکل 1 پروفیل بار و تغییرات سرعت ذرات داخل آسیا [11]

منظور خردایش می‌تواند سنگ معدن تنها (آسیای خودشکن) و یا سنگ معدن همراه با واسطه خردایش (آسیای نیمه خودشکن) باشد. واسطه خردایش علاوه بر گلوله (آسیای گلوله‌ای) می‌تواند میله (آسیای میله‌ای) هم باشد. در آسیا مواد بر اثر ترکیبی از فرآیندهای ضربه و سایش از ابعادی در حدود 5 تا 250 میلی‌متر به ابعادی در حد 10 تا 300 میکرون می‌رسند. به منظور حفاظت آسیا از سایش، سطوح داخلی آن آسترگذاری می‌شود. درون آسیا پروفیل‌های فولادی با مقطع معمولاً چهارضلعی بنام لاینر (بالابر) در جهت طولی، برای حمل بار درون آسیا تا ارتفاع مشخص، تعبیه شده است. لاینرهای آسیا، تحت اثر دوران، خوراک را تا نقطه رهایی (زاویه شانه) بالا می‌برند. حین بالا آمدن مواد و در اثر سایش آن‌ها روی یکدیگر، بخشی از خردایش انجام می‌گیرد. ذرات خوراک تحت اثر وزن خود از نقطه رهایی بصورت یک پرتابه رها می‌شوند و در انتهای مسیر به یکدیگر برخورد کرده و انرژی جنبشی بدست آمده از مرحله قبل را با سقوط بر روی پاشنه بار صرف خردایش می‌کنند. مواد داخل آسیا تا رسیدن به سایز مد نظر و خروج از شبکه انتهایی در داخل آسیا باقی می‌ماند [2,1]. در طول کارکرد آسیا، لاینرها دچار سایش شده و بازدهی آسیا را کاهش داده و باعث توقف آسیا بدلیل تعویض و تعمیر آن‌ها و افزایش هزینه‌های فرآوری می‌گردند. از طرفی با سایش لاینرها و تغییر شکل هندسی آن‌ها، حرکت پروفیل بار مواد داخل آسیا و توان مصرفی آن نیز تغییر می‌کند. بنابراین شناخت و بررسی عوامل موثر بر سایش لاینرها بسیار مهم است.

سایش فرآیندی است که در آن، کاهش جرم مواد، در اثر حرکت دو سطح بر روی هم و جدا شدن ذرات از سطح در اثر اصطکاک صورت می‌گیرد. عوامل مختلفی نظیر سختی نسبی سطوح تماس، مسافت لغزش، سرعت لغزش، نیرو یا فشار در سطوح تماس، نحوه بارگذاری، اصطکاک، درجه حرارت، چقرمگی و ... می‌توانند در سایش موثر باشند. به دلیل ماهیت سایش، روش جامعی برای سنجش مقاومت به سایش مواد وجود ندارد. انجمن تست و مواد امریکا¹، استاندارد بر مبنای مقدار حجم کاسته شده از ماده را برای مقاوم سنجی ماده به سایش پیشنهاد داده است [3]. در نظر گرفتن حجم کاسته شده به جای جرم، معیار دقیق‌تری است، به ویژه وقتی که مقایسه مقاومت به سایش چند ماده با چگالی‌های متفاوت مد نظر باشد.

بطور کلی می‌توان سه مرحله برای سایش برحسب زمان در نظر داشت. مرحله نخست در شروع استفاده از ماده می‌باشد و سرعت سایش بالا است. در این مرحله با گذشت زمان سایش کاهش یافته و به مرحله دوم سایش می‌رسد. سایش مرحله دوم با سرعت ثابت ادامه می‌یابد و بیشتر عمر کاری ماده در این مرحله است. در مرحله سوم بر اثر سایش نمونه در مرحله‌های پیشین، مقاومت ماده کم شده و سایش به آسانی و با سرعت بالا، ماده را نابود می‌سازد. مکانیزم سایش بر پنج دسته‌ی سایش ساییده (خراشان)، سایش چسبان، سایش خستگی، سایش ورقه‌ای و سایش اکسایشی (خوردگی) می‌باشد. سایش ساییده یا خراشان نیز به انواع خراش تحت تنش پایین، خراش تحت تنش بالا و خراش با ضربه تقسیم می‌شود [3]. در لاینر آسیاهای گردان خشک بیشتر سایش تنش پایین یا لغزشی و سایش ناشی از ضربه‌ای اتفاق می‌افتد، هرچند سایش چسبان و خستگی نیز وجود دارد. سایش خوردگی مختص آسیاهای گردان با شرایط تر (مرطوب) می‌باشد [4]. روش‌های مختلفی جهت بررسی نرخ سایش لاینرها پیشنهاد شده است. رازیوسکی [5] در سال 1997 با استفاده از روش آزمایشگاهی، کلیری [6] در



شکل 2 شماتیک آسیای نیمه صنعتی موجود در مجتمع مس سرچشمه

جدول 1 شرایط انجام آزمایش‌ها

قطر	1000 میلی‌متر
طول	500 میلی‌متر
آسیا	سرعت آسیا (rpm) 27، 31 و 35 دور بر دقیقه
سرعت آسیا (N_c)	65% و 85% سرعت بحرانی
تعداد	60 عدد
لاینرها	ارتفاع 14 میلی‌متر
(بالابر)	زاویه پیشانی 14/5 درجه
شکل	دو زنگه با ضخامت پایه 22 میلی‌متر
ماده	گلوله فولادی
واسطه	قطر گلوله 25 میلی‌متر
خردایش	چگالی گلوله (kg/m^3) 7800
حجم شارژ (J)	15%، 20%، 25% و 30% حجم آسیا
ماده (اندازه)	سنگ معدن مس (1mm-)
چگالی کانسنگ (kg/m^3)	2700
خوراک	غلظت خوراک (SC) 40%، 50%، 60%، 70% و 100% (وزنی)
آسیا	چگالی خوراک (kg/m^3) 1340، 1460، 1610، 1790 و 2700
حجم پر شدگی (U)	بین 0/5 تا 3 برابر حجم مفید گلوله‌ها

برای بررسی اثر سایش، دو عدد از لاینرهای آسیا با لاینری با ابعاد $14 \times 22 \times 500$ میلی‌متر از جنسی با قابلیت مقاومت در برابر ضربه و سایش، جایگزین شد (شکل 3). این لاینرها دارای محل‌های مشخصی برای جایگذاری نمونه بود که می‌توانست حین کار آسیا، نمونه‌ها را به خوبی حفظ کند. برای نگهداری نمونه‌ها از پیچ‌های سر آلن استفاده شد و به منظور اثر نگذاشتن بر روی نمونه‌ها، بین نمونه و نوک پیچ یک لایه محافظ قرار داده شد. نمونه‌ها با مقطع 10×10 میلی‌متر به طول 30 میلی‌متر از فولاد نرم انتخاب شدند. به منظور جلوگیری از افزایش دما و تغییر خواص سطحی نمونه‌ها در حین ساخت آن‌ها از فرایندهای کار سرد استفاده گردید. نمونه‌ها به منظور بهبود پرداخت سطح و دارا بودن صافی سطح یکسان، کاملاً سمباده زده شدند. سختی نمونه‌ها قبل و بعد از هر آزمایش با استفاده از دستگاه سختی سنج با متد راکول C اندازه‌گیری می‌شود که تغییرات محسوسی مشاهده نگردید.



شکل 3 نمایی از لاینر و نمونه‌های استفاده شده در تحقیق

در تحقیق دیگری، رضایی‌زاده و همکاران [12] در سال 2010 یک آسیای آزمایشگاهی که قادر به کار در دو محیط مرطوب و خشک بود را برای بررسی تاثیرات سرعت، درصد پرشدگی آسیا، سایز سنگ معدن و جنس لاینر بر سایش استفاده نمودند. آن‌ها همچنین به روش المان گسسته توزیع ذرات در داخل آسیا را مورد بررسی قرار دادند و متوجه شدند که در سرعت‌های پایین (65% بحرانی) ذرات درشت در نزدیک پوسته آسیا متمرکز می‌شوند و با افزایش سرعت تا حدود 75% توزیع یکنواخت می‌گردد. در سرعت‌های بالاتر ذرات بزرگتر در قسمت مرکزی بار متمرکز می‌شوند. این بدان معناست که اثر ضربه در ناحیه پاشنه، تاثیر بیشتری در سایش دارد [13].

سرعت بحرانی در آسیا به سرعتی گویند که در این سرعت محتویات داخل آسیا به خاطر نیروی گریز از مرکز به دیواره آن می‌چسبند و به شعاع آسیا وابسته است. آسیاها بستگی به شرایط مختلف با سرعتی بین 60 تا 90 درصد سرعت بحرانی دوران می‌کنند [1].

تیری [14] به سایش ناشی از بارهای ضربه‌ای پرداخت. تاثیر تغییر شکل هندسی لاینرها در اثر سایش بر رفتار محتویات داخل آسیا و سایر پارامترهای عملکردی آسیا بررسی شده است [15-17]. اثر تعداد لاینرها بر سایش در تحقیقات دیگری نیز مورد بررسی قرار گرفته است [18-20].

در خصوص تاثیر پارامترهایی چون غلظت دوغاب و حجم پرشدگی دوغاب بر سایش، تاکنون پژوهشی مشاهده نشده است که در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود.

2- مواد و روش تحقیق

طراحی و ساخت یک مدل آزمایشگاهی از یک دستگاه یکی از روش‌های بررسی پارامترهای موثر در عملکرد آن دستگاه می‌باشد. این روش بخصوص در مواردی که کار کردن با نمونه واقعی جهت بررسی عملکرد آن پرهزینه و دشوار باشد اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. از طرف دیگر بعلا وجود متغیرهای زیادی که در عملکرد آسیا موثر هستند استفاده از مدل آزمایشگاهی ضروری به نظر می‌رسد. در شکل 2 نمایی از آسیای آزمایشگاهی با مقیاس یک دهم آسیای واقعی در مس سرچشمه، آورده شده است. این آسیا به قطر 100 و طول 50 سانتی‌متر می‌باشد. تعداد لاینرها 60 عدد و به ارتفاع 14 میلی‌متر با زاویه پیشانی 14/5 درجه می‌باشد. آسیا قابلیت استفاده از گلوله‌های با سایز متفاوت را دارد که در این تحقیق تنها از گلوله 25 میلی‌متر به عنوان بار جامد و همچنین واسطه خردایش با شارژ 15% تا 30% استفاده گردید. یک دستگاه آنالیز کننده توان جهت اندازه‌گیری توان آسیا برحسب kW استفاده شده است. موتور آسیا نیز قابلیت تغییر کنترل دور بصورت پیوسته تا 100% سرعت بحرانی، را دارد.

برای اندازه‌گیری بارهای ضربه‌ای وارد شده به پاشنه بار از یک عدد نیروسنج¹ کوارتزی که بر روی بدنه آسیا نصب شده استفاده می‌شود. محدوده اندازه‌گیری سنسور کوارتزی با خاصیت پیزوالکتریک از 44 تا 22400 نیوتن با دقت یک نیوتن می‌باشد. سیگنال خروجی از نیروسنج بصورت کالیبره شده توسط یک دستگاه اندازه‌گیری می‌شود. بر روی نیروسنج یک صفحه فلزی با ابعاد $450 \times 22 \times 6$ میلی‌متر جهت اندازه‌گیری بهتر ضربات استفاده شده است. یک دوربین سرعت بالا برای عکس‌برداری و فیلم‌برداری از محتویات داخل آسیا با سرعت 60-1200 فریم بر ثانیه (fps) استفاده شده که قادر به ذخیره کردن عکس و فیلم جهت آنالیز رفتار بار داخل آسیا در هر زمان دلخواه را دارد. جدول 1 شرایط انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

1- Load cell

از آنجا که چگالی لاینرها ثابت است در نتیجه تفاوت جرمی آنها معیاری مناسب برای اندازه گیری سایش می باشد. به منظور اندازه گیری سایش، جرم نمونه ها قبل از انجام آزمایش توسط یک ترازوی دقیق (GR-200) با دقت یک ده هزارم ثبت شده و پس از جای گذاری در لاینر و انجام آزمایش، نمونه ها را از لاینر خارج کرده و دوباره جرم آن اندازه گیری می شود. با محاسبه تفاوت این دو جرم یا کاهش جرم، می توان نرخ سایش سطح نمونه را با استفاده از رابطه (2) اندازه گرفت. برای آن که بتوان سایش را از سطح و چگالی مستقل کرد از یک پارامتر بی بعدی به نام نرخ سایش استفاده می شود، که بیانگر نسبت ارتفاع ساییده شده به ارتفاع اولیه یا تغییرات جرم به جرم اولیه می باشد.

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{m_1} = \frac{\Delta h}{h_1} \quad (2)$$

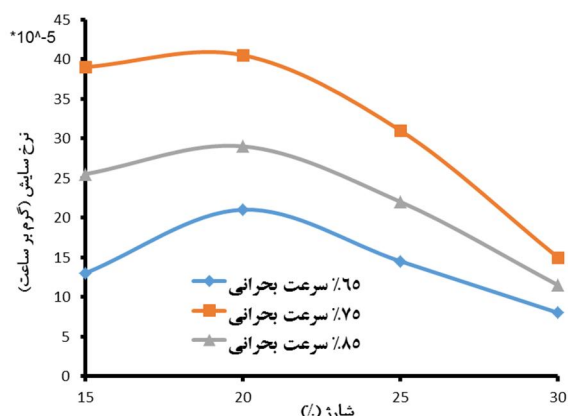
مراحل انجام آزمایش ها این گونه است که در ابتدا آسیا با شارژ جامد معین پر شده و سپس خوراک را اضافه کرده و با سرعت های متفاوت آزمایش انجام می شود. برای هر شرایط آزمایشگاهی اجازه داده می شود که آسیا یک ساعت کار کند و نرخ سایش محاسبه می گردد. در مرحله بعدی مقدار دوغاب بیشتری ریخته می شود و دوباره آسیا با سرعت های متفاوتی آزمایش می شود. در هر مرحله مقدار دوغاب بیشتر شده و آزمایش ها با سرعت های متفاوت تکرار می شوند تا حجم دوغاب در آسیا به 3 برابر حجم مفید جامد (حجم گلوله ها بدون در نظر گرفتن فضاهای خالی بین آن ها) برسد. مفهوم حجم پرشدگی دوغاب در آسیا (U) ابتدا توسط استین [21] تعریف گردید. در حین انجام آزمایش ها دمای دوغاب پیوسته اندازه گیری می شود که تغییرات آن بین 30 تا 34 درجه سانتی گراد مشاهده گردید.

3- نتایج و بحث

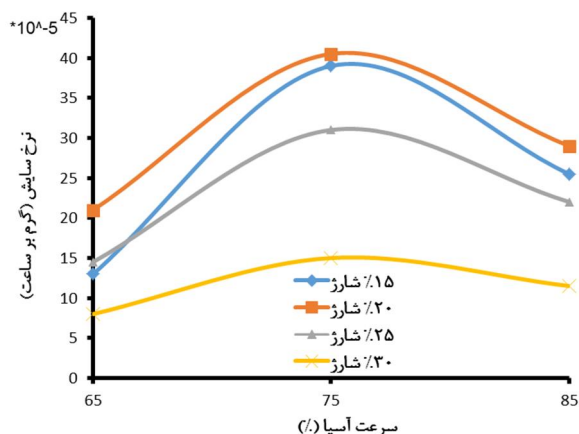
یکی از عوامل بررسی شده در این پژوهش تاثیر درصد پرشدگی شارژ آسیا بر سایش است. پرشدگی به کسری از فضای درون آسیا که توسط بار درون آن اشغال می شود، اطلاق می گردد. به عبارت دیگر در مقطع دایره ای شکل آسیا، به نسبت سطح اشغال شده توسط بار درون آسیا به سطح کل آسیا پرشدگی گفته می شود. براساس میزان شارژ آسیا، نیروی اعمال شده به لاینرها و همچنین حرکت نسبی بین ذرات و پوسته آسیا تغییر خواهد کرد، و در نتیجه نرخ سایش لاینرها تغییر می نماید. شکل 4 تغییرات نرخ سایش برحسب درصد پرشدگی شارژ (15 تا 30 درصد) را در سرعت های متفاوت نشان می دهد.

با توجه به شکل 4 می توان مشاهده نمود که نرخ سایش برای تمام سرعت ها، ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. میزان کاهش جرم لاینرها در شارژ 20٪، مقدار بیشینه خود را داراست. افزایش نرخ سایش تا قبل از نقطه اوج به علت افزایش برخورد ها و همچنین کم بودن بار در پاشنه و برخورد مستقیم ذرات با لاینر می باشد. بعد از گذر از نقطه اوج، نرخ سایش با افزایش شارژ کاهش می یابد. با افزایش شارژ آسیا و انتقال پاشنه بار به سمت بالا، برخورد مستقیم گلوله و لاینر کاهش یافته و در نتیجه سهم سایش ناشی از ضربه کم می شود. با افزایش شارژ آسیا، زاویه شانه تقریباً ثابت مانده، اما ارتفاع پاشنه افزایش می یابد و در نتیجه گلوله ها ارتفاع پرواز کمتری را طی می کنند و اثر ضربه نیز کاهش می یابد. از طرفی با افزایش وزن بار داخل آسیا و افزایش فشار روی لاینرها، لغزش و جابجایی ذرات در مجاورت لاینرها کم شده و نرخ سایش کاهش می یابد.

درصدی از سایش، مربوط به ضربه ناشی از حرکت آبشاری می باشد. سایش تنش پایین در حجم پرشدگی های متفاوت اگرچه با افزایش سرعت،



شکل 4 نرخ سایش برحسب درصد پرشدگی شارژ در سرعت های متفاوت
(U = 1, SC = 40%)



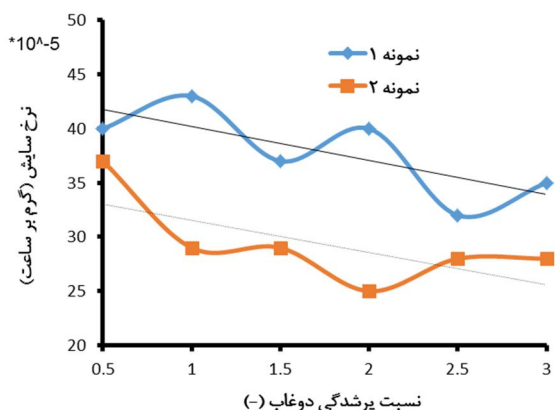
شکل 5 نرخ سایش برحسب سرعت در شارژ های متفاوت
(U = 1, SC = 40%)

استخر جذب و میرا می‌گردند. با کاهش بارهای ضربه‌ای سهم سایش ناشی از ضربه کاهش یافته و با ثابت بودن تقریبی سایش ناشی از لغزش و خوردگی، سایش کل نیز کاهش می‌یابد. البته با افزایش دوغاب و بیشتر شدن وزن مواد داخل آسیا، باید نیروی عمودی اعمال شده بر لاینرها افزایش یابد، اما از سویی دیگر با تشکیل استخر دوغاب و اعمال نیروهای شناوری (ارشمیدس) بر مواد داخل آسیا، نیروی نرمال کاهش می‌یابد. در نتیجه می‌توان تاثیر نیروی نرمال را نادیده گرفت.

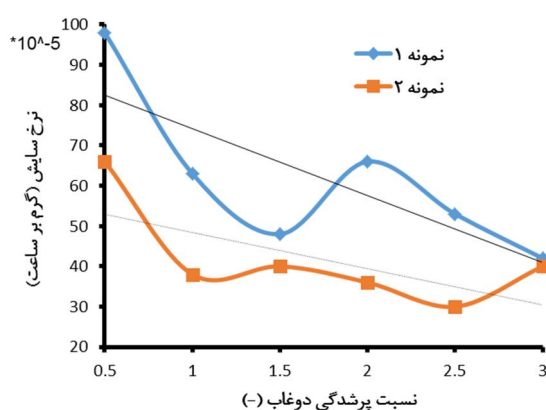
با توجه به شکل 6 واضح است که سایش در جامد 40% بیشترین مقدار را نسبت به غلظت‌های دیگر دارد. هر قدر دوغاب چگالی و لزجت کمتری داشته باشد، ذرات راحت‌تر و با سرعت بیشتری از میان گلوله‌ها و از روی لاینرها عبور کرده و سرعت نسبی افزایش یافته و در نتیجه آن سایش نیز زیاد می‌شود. هر چند که کاهش سایش لاینرهای آسیا مطلوب صنایع معدنی می‌باشد، ولی کاهش نرخ سایش به واسطه تشکیل استخر دوغاب بر پارامترهای دیگر آسیا چون بارهای ضربه‌ای، توان، پروفیل بار، دانه بندی محصول و ... نیز اثر گذار است، که در اغلب موارد این تاثیر منفی می‌باشد. استخر دوغاب ایجاد شده در آسیا در جذب انرژی گلوله‌ها بسیار موثر است. به عبارت دیگر با تشکیل استخر دوغاب انرژی بارهای ضربه‌ای کم شده و سهم ضربه در خردایش بارهای داخل آسیا کاهش پیدا می‌کند. شکل 7 نشان می‌دهد که با افزایش U از 0/5 به 1/5 و سپس 2/5، اندازه نیروهای ضربه‌ای کاهش می‌یابد. با افزایش غلظت دوغاب از 40% به 70%، اندازه نیروهای ضربه‌ای با توجه به شکل 8 نیز کاهش می‌یابد. این بارهای ضربه‌ای توسط یک

در سرعت‌های بیشتر از 75% سرعت بحرانی، مسیر حرکت آبخاری بدلیل بالا رفتن زاویه شانه تغییر کرده و به سمت انتهای پاشنه پیشروی می‌کند. در نتیجه ارتفاع سقوط، سرعت برخورد و نیروی ضربه‌ای کاهش می‌یابد. در این حالت ذرات و گلوله‌ها مستقیماً با آستر برخورد داشته، اما به دلیل کاهش در فشار و سرعت، سایش کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت، نیروهای گریز از مرکز افزایش یافته و در نتیجه سرعت نسبی بین مواد و لاینرها کم شده و نرخ سایش کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت در یک شارژ معین، زاویه شانه بالا آمده، در حالی که زاویه پاشنه تقریباً ثابت است. این عامل منجر به باریک شدن و کشیده شدن بار شده و باعث کاهش ضخامت ناحیه لغزش می‌شود.

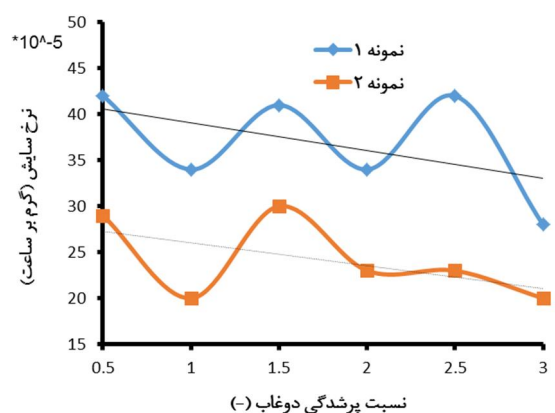
تغییرات نرخ سایش بر حسب حجم پرشدگی دوغاب (U) و برای غلظت‌های مختلف در شکل 6 نشان داده شده است. از آن‌جا که تکرار آزمایش‌ها بسیار سنگین، پرهزینه و وقت‌گیر می‌باشد این نمودارها فقط برای دو نمونه ترسیم شده که سطح مقطع نمونه اول اندکی بیشتر از نمونه دوم می‌باشد. همان‌گونه که از شکل 6 پیداست با افزایش حجم دوغاب داخل آسیا و تشکیل استخر، سایش کاهش می‌یابد. در دوغابی با جامد 40 درصد، مقدار سایش با افزایش مقدار U به 3، تقریباً به نصف کاهش می‌یابد. نرخ سایش با افزایش حجم پرشدگی دوغاب و برای غلظت‌های 50، 60 و 70 درصد جامد، نیز حداقل 25% کاهش می‌یابد. با تهیه فیلم و عکس از محتویات داخل آسیا، مشاهده گردید که با افزایش حجم دوغاب در داخل آسیا، برای $U \geq 1$ در داخل آسیا استخر دوغاب تشکیل شده و در نتیجه بارهای ضربه‌ای توسط



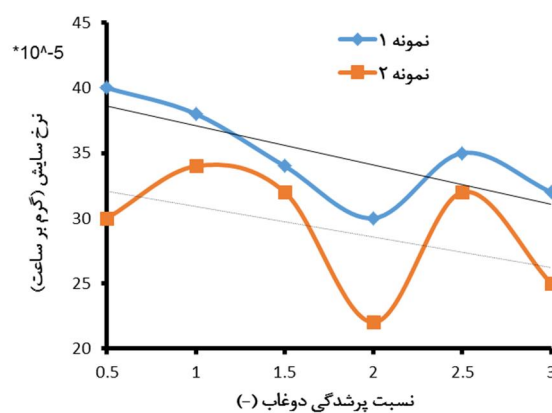
ب) دوغاب با جامد 50%



الف) دوغاب با جامد 40%

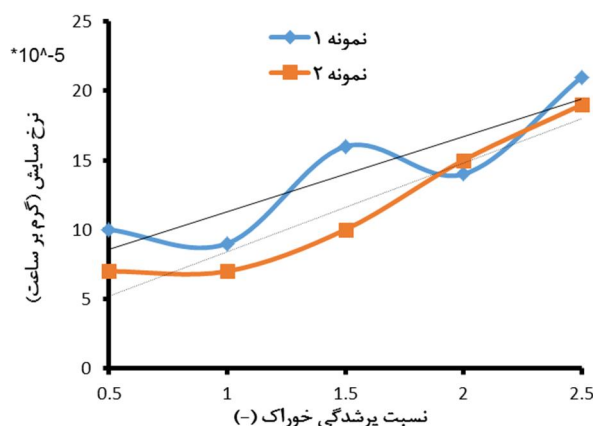


د) دوغاب با جامد 70%



ج) دوغاب با جامد 60%

شکل 6 نرخ سایش بر حسب حجم پرشدگی دوغاب و غلظت‌های متفاوت ($J = 20\%, N_c = 75\%$)

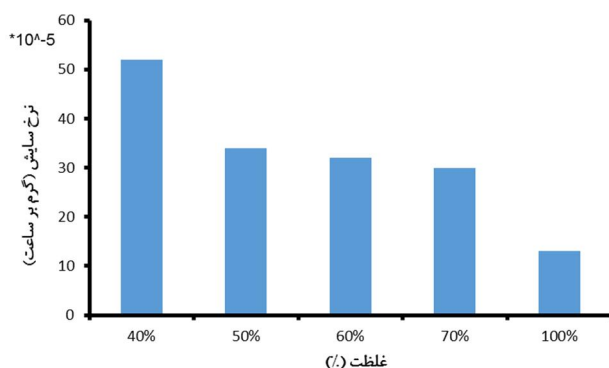


شکل 9 نرخ سایش بر حسب حجم پرشدگی خوراک جامد در حالت خشک ($J = 20\%, N_C = 75\%$)

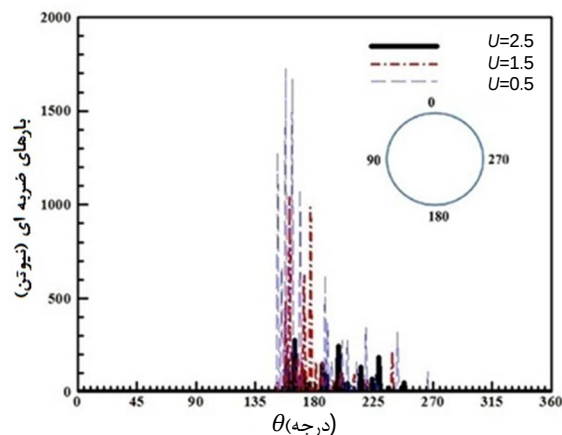
40، 50، 60 و 70 درصد جامد را نشان می‌دهد. سایش در حالت خشک تقریباً یک چهارم سایش در حالت تر با دوغاب 40% جامد است.

4- نتیجه گیری

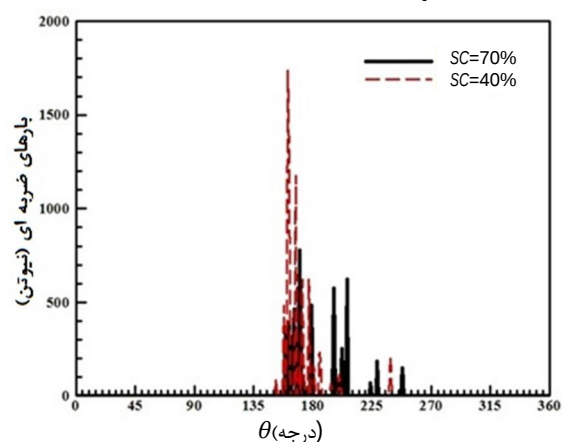
- درصد پرشدگی حدود 20 درصد برای کل محتویات آسیا، یک پرشدگی بحرانی محسوب می‌شود. باید سعی بر آن شود آسیا در حجم پرشدگی‌های بیشتر از این کار کند. با افزایش انباشتگی در پاشنه بار، نرخ سایش هم کاهش می‌یابد.
- در سرعت‌های خیلی بالا، چون برخورد مستقیم با لاینر صورت می‌گیرد علاوه بر شدت ضربه بالا، فرکانس برخورد نیز بیشتر است که به معنای برخورد با انرژی بالاتر و خطر شکست یا حداقل تغییر شکل پلاستیک لاینرها را در پی خواهد داشت.
- بالاترین سایش لاینرها در سرعت 75 درصد سرعت بحرانی رخ می‌دهد.
- در شرایط تر، با افزایش حجم پرشدگی دوغاب در آسیا (U)، سایش لاینرها به علت تشکیل استخر دوغاب، کاهش می‌یابد.
- سایش لاینرها در شرایط تر با افزایش درصد جامد و بالا رفتن چگالی و لزجت دوغاب، روند نزولی دارد.
- در شرایط خشک، با افزایش حجم پرشدگی در آسیا و افزایش نیروی عمودی، سایش لاینرها افزایش می‌یابد.
- مشخص شد که سایش لاینرها در شرایط تر، بستگی به غلظت دوغاب بین 2 تا 4 برابر سایش در شرایط خشک می‌باشد.



شکل 10 میانگین نرخ سایش برای شرایط تر و خشک



شکل 7 نیروهای ضربه‌ای در یک دور چرخش آسیا و حجم پرشدگی دوغاب متفاوت ($J = 20\%, N_C = 75\%, SC = 40\%$)



شکل 8 نیروهای ضربه‌ای در یک دور چرخش آسیا و برای دوغاب 40 و 70 درصد جامد ($J = 20\%, N_C = 75\%, U = 1$)

عدد نیروسنج که در زیر یکی از لاینرها نصب شده، برای یک دور چرخش آسیا ثبت گردید. ساعت 12 به عنوان نقطه صفر دستگاه انتخاب شده و تمامی زاویه‌های شکل‌های 7 و 8 براساس آن اندازه گیری شده است. با توجه به نمودارها، با افزایش سطح استخر تشکیل شده و همچنین با افزایش غلظت دوغاب (افزایش چگالی دوغاب)، استخر مانند یک ضربه‌گیر (دمپر) عمل کرده و بارهای ضربه‌ای بیشتر کاهش یافته و سهم سایش ناشی از ضربه کم می‌شود. از طرفی با افزایش غلظت دوغاب، سطوح داخلی آسیا و سطح لاینرها توسط دوغاب اندود شده و یک لایه محافظ در برابر سایش ایجاد می‌گردد. رفتار سایش در شرایط خشک با شرایط تر کاملاً متفاوت است. با توجه به شکل 9 در شرایط خشک، با افزایش نسبت پرشدگی خوراک در آسیا، سایش لاینرها افزایش می‌یابد. در حالت خشک دیگر استخر تشکیل نمی‌شود و با افزایش خوراک و بیشتر شدن وزن مواد داخل آسیا، نیروی عمودی اعمال شده بر لاینرها افزایش یافته و نرخ سایش را زیاد می‌کند.

مقایسه شرایط تر و خشک نشان می‌دهد که نرخ سایش در شرایط تر به دلیل وجود سایش ناشی از خوردگی و همچنین افزایش سرعت نسبی بین مواد و لاینرها، به صورت قابل ملاحظه‌ای بیشتر از حالت خشک است.

در شرایط تر، مواد راحت‌تر و با سرعت بیشتری از بین گلوله‌ها و همچنین از روی لاینرها حرکت می‌نمایند. چگالی دوغاب هر چه بیشتر باشد، سرعت نسبی کمتر شده و سایش کم می‌شود. نمودار ستونی شکل 10 میانگین نرخ سایش برای حالت خشک (100% جامد) و دوغابی با غلظت‌های

5- فهرست علائم

سرعت بحرانی آسیا که در این سرعت محتویات داخل آسیا به خاطر نیروی گریز از مرکز به دیواره آن می‌چسبند و به شعاع آسیا وابسته است	CV (rpm)
درصدی از فضای درون آسیا که توسط بار درون آن اشغال شده یا نسبت سطح اشغال شده توسط بار درون آسیا به سطح کل آسیا (%)	J
نرخ سایش یا تغییرات جرم به جرم اولیه (gr/hour)	$\dot{m}$
سرعت چرخش آسیا که بستگی به شرایط مختلف بین 60 تا 90 درصد سرعت بحرانی است (%)	Nc
غلظت دوغاب یا درصد وزنی ذرات جامد در دوغاب (%)	SC
نسبت حجم پر شدگی دوغاب یا حجم اشغال شده در آسیا توسط دوغاب تقسیم بر حجم مفید گلوله‌ها (-)	U
حجم مفید گلوله‌ها یا حجم گلوله‌ها بدون در نظر گرفتن فضاهای خالی بین آن‌ها (L)	V ₀

6- تقدیر و تشکر

از مسئولان مجتمع مس سرچشمه خصوصاً کارکنان واحد تحقیق و توسعه و کارخانه تغلیظ به خاطر حمایت‌های بی‌دریغ از این تحقیق تشکر به عمل می‌آید.

7- مراجع

- [1] R.P. King, *Modeling and simulation of mineral processing systems*, Elsevier, 2001.
- [2] F.C. Bond, *Crushing and grinding calculations*, Allis-Chalmers Manufacturing Company, 1961.
- [3] *Annual Book of ASTM Standards: Wear and Erosion, Metal Corrosion* v.03.02, American Society for Testing & Materials, Aug 2004.
- [4] A. Di Renzo, F.P. Di Maio, Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes, *Chemical Engineering Science*, 59(3), pp. 525-541, 2004.
- [5] P. Radziszewski, Ball charge dynamics and liner wear simulation, *Canadian Mineral Processors Conference*, Ottawa, 1997.
- [6] P.W. Cleary, Predicting charge motion, power draw, segregation and wear in ball mills using discrete element methods, *Minerals Engineering*, 11(11), pp. 1061-1080, 1998.

- [7] J.T. Kalala, M. Bwalya, M.H. Moys, Discrete element method (DEM) modelling of evolving mill liner profiles due to wear. Part II. Industrial case study, *Minerals Engineering*, 18(15), pp. 1392-1397, 2005.
- [8] S. Banisi, M. Hadizadeh, 3-D liner wear profile measurement and analysis in industrial SAG mills, *Minerals Engineering*, 20(2), pp. 132-139, 2007.
- [9] M. Yahyaei, S. Banisi, Spreadsheet-based modeling of liner wear impact on charge motion in tumbling mills, *Minerals Engineering*, 23(15), pp. 1213-1219, 2010.
- [10] P. Radziszewski, R. Varadi, T. Chenje, L. Santella, A. Sciannamblo, Tumbling mill steel media abrasion wear test development, *Minerals Engineering*, 18(3), pp. 333-341, 2005.
- [11] M. Rezaeizadeh, M. Fooladi, M.S. Powell, S.H. Mansouri, N.S. Weerasekara, A new predictive model of lifter bar wear in mills, *Minerals Engineering*, 23(15), pp. 1174-1181, 2010.
- [12] M. Rezaeizadeh, M. Fooladi, M.S. Powell, N.S. Weerasekara, An experimental investigation of the effects of operating parameters on the wear of lifters in tumbling mills, *Minerals Engineering*, 23(7), pp. 558-562, 2010.
- [13] M. Rezaeizadeh, *Investigating the kinematic and Dynamics of Mill Contents with DEM and Experimental Methods*, PhD Thesis, Mech. Eng. Dept., Bahonar Un., Kerman, 2010. (In Persian)
- [14] T. Teeria, Impact wear in mineral crushing, *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Engineering*, Estonian Academy Publishers, 2006.
- [15] S. Hart, Optimisation of the Cadia Hill SAG mill circuit, *SAG Conference*, University of British Columbia, 2001.
- [16] J.T. Kalala, M. Breetzke, M.H. Moys, Study of the influence of liner wear on the load behaviour of an industrial dry tumbling mill using the Discrete Element Method (DEM), *International Journal of Mineral Processing*, 86(1-4), pp. 33-39, 2008.
- [17] L.A. Vermeulen, D.D. Howat, Effects of lifter bars on the motion of en-masse grinding media in milling, *International Journal of Mineral Processing*, 24(1-2), pp. 143-159, 1988.
- [18] S. Bird, Evolution of sag mill shell liner design at Kennecott Utah copper concentrator, *International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology Conference*, pp. 256-269, 2001.
- [19] M. Kendrick, J. Marsden, Candelaria post expansion evolution of SAG mill liner design and milling performance, *International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology Conference*, pp. 270-287, 2001.
- [20] W. Meekel, A. Adams, K. Hanna, Mill liner development at highland valley copper, *International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology Conference*, pp. 224-240, 2001.
- [21] L.G. Austin, R.R. Klimpel, P.T. Luckie, *Process engineering of size reduction: ball milling*, Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1984.