مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1395، دوره 16، شماره 7، ص‌ص 392-398

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر پروفیل لاینر بر خردایش آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه

محمد رزانی[1]، ابوالفضل معصومی[2*]، مسعود رضایی زاده[3]، محمد نوع پرست[4]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی و فن آوری پیشرفته کرمان، کرمان
4- استاد، مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران
* تهران، صندوق پستی 11155-4563، amasomi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 23 اردیبهشت 1395
پذیرش: 07 تیر 1395
ارائه در سایت: 24 مرداد 1395

کلید واژگان:
آسیای نیمه خودشکن
پروفیل لاینر
خردایش
روش اجزای محدود

چکیده

امروزه در اکثر پروژه های معدنی با توجه به لزوم معدنکاری در حجم بالا استفاده از آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن به دلیل ویژگیهای خاص این تجهیزات نسبت به روش های دیگر مرسوم، اولویت پیدا کرده است. معمولا درصد ناچیزی از انرژی مصرف شده صرف خردایش می گردد، از طرفی خردایش در آسیا به عواملی نظیر سختی، ابعاد و شکل هندسی سنگ و گلوله، سرعت چرخش آسیا و پروفیل و هندسه لاینر بستگی دارد. لذا دستیابی به رابطه عوامل فوق و مصرف انرژی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از آنجایی که روش های آزمایشگاهی نمی‌تواند همه پارامترهای موثر بر عملکرد آسیا را به طور هم زمان بررسی کنند و پرهزینه و وقت گیر می باشند در این تحقیق اثر پروفیل لاینر با تغییر ارتفاع و زاویه لاینر بر قابلیت خردایش آسیا به روش عددی بررسی شده و ارتفاع و زاویه بهینه لاینر با محاسبه تنش های حاصل از برخورد ذرات به لاینر معرفی شده است. نتایج نشان می دهد لاینر با ارتفاع 140 میلیمتر و زاویه 15 درجه بیشترین میزان تنش و خردایش را دارد. نتایج مدل اجزای محدود آسیای واقعی مجتمع مس سرچشمه با نتایج آسیای آزمایشگاهی ارزیابی شده و صحت نتایج بدست آمده تایید شده است.

Experimental and numerical investigation of liner profile impacts on comminution performance of SAG mill in Sarcheshmeh Copper Complex

Mohammad Razani[1], Abolfazl Maesoumi[1*], Masoud Rezaeizadeh[2], Mohammad Noparast[3]

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran
3- Department of Mineral Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
* P.O.B. 111554563, Tehran, Iran, amasomi.ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 May 2016
Accepted 27 June 2016
Available Online 14 August 2016

Keywords:
SAG mill
liner profile
grinding
FEM method

ABSTRACT

Today, in most of the mining projects, especially with high operating capacity, using of AG and SAG mills become more common, due to their special features, comparing with other conventional grinding mills. Usually in comminution process a small percentage of energy is merely consumed by grinding and crushing processes. Also, the comminution process is dependent on many parameters such as: ore hardness, charge volume, size and geometry of ore, charge and size of balls, percentage of critical velocity of mill and liner profile. Therefore, achieving the optimum mentioned factors and consumed energy is of particular importance. Since, it is impossible to consider interaction of all effective parameters simultaneously, by employing experimental methods because of their high expenses and being time consuming, so in this research the effect of liner profile on comminution process was investigated by changing the height and angle of liners using numerical method (finite element methods, FEM). In this approach the height and angle of liners were determined by estimating the stress of the particles impacts with liners. The results showed that a liner with a height of 140 mm and an angle of 15 degrees has the maximum impact and breakage of particles. The results achieved from FEM model for the Sarcheshmeh Copper Complex SAG mill were in good agreement with the measured data from experimental SAG mill.

1- مقدمه

آخرین مرحله فرآیند خردایش، آسیا کردن است. در این مرحله کاهش ابعاد ذرات طی دو مکانیزم ترکیبی ضربه و سایش در حضور و یا نبود آب و معمولا در ظروف استوانه‌ای شکل که حول محور خود به صورت افقی می چرخند، انجام می‌گیرد. این دستگاه‌ها که به آسیاهای گردان معروفند، محتوی بار خردکنند مانند میله، گلوله فولادی، سنگ هایی از جنس مقاوم یا قطعاتی از خود مواد معدنی هستند که با چرخش آسیا باعث نرم کردن مواد می‌شوند. بدنه داخلی آسیا از حفاظ‌های مقاومی با سطح مقطع چهار ضلعی به نام لاینر (بالابر) تشکیل شده است که نه تنها بدنه داخل آسیا را در مقابل ضربه و سایش محافظت می‌کنند، بلکه باعث حمل محتویات داخل آسیا تا ارتفاع

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. Razani, A. Maesoumi, M. Rezaeizadeh, M. Noparast, Experimental and numerical investigation of liner profile impacts on comminution performance of SAG mill in Sarcheshmeh Copper Complex , *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 392-398, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.21.6]

مشخص شده و خردایش را نیز افزایش می‌دهند و از لغزیدن محتویات آسیا در سطح جدار داخلی آسیا جلوگیری می‌کنند. شکل 1 هندسه (ارتفاع و زاویه لاینر) و شرایط برخورد را نشان می‌دهد. لاینرهای آسیا در اثر دوران، خوراک را تا نقطه رهایی (زاویه شانه) بالا می برند. ذرات خوراک تحت اثر وزن خود از نقطه رهایی به صورت یک پرتابه رها شده و در انتهای مسیر به یکدیگر برخورد کرده و انرژی جنبشی ذرات در پاشنه بار صرف خردایش می شود. در شکل 2 پروفیل بار داخل آسیا و چگونگی توزیع آن نشان داده شده است. مواد داخل آسیا تا رسیدن به اندازه مورد نظر باقی مانده و در نهایت از آسیا خارج می‌شوند [2,1]. سرعت گردش آسیا از عوامل مهمی است که در مکانیزم نرم کردن و مصرف انرژی آسیا نقش بسزایی دارد. در سرعت های کم به دلیل ریزش گلوله‌ها در فواصل بسیار کوتاه میزان ضربه وارده به مواد بسیار ناچیز است و مکانیزم نرم شدن بیشتر بر اثر اصطکاک مواد با بار خرد کننده و بدنه آسیا انجام می‌گیرد. اگر آسیا با سرعت بیشتری دوران کند، بار خرد کننده به وسیله حفاظ‌های بدنه آسیا به نقاط بالاتر منتقل شده و از ارتفاع بیشتری بر روی مواد سقوط می کنند و در نتیجه مکانیزم نرم شدن بیشتر در اثر ضربه انجام می‌گیرد و تأثیر مکانیزم سایش حداقل است. اگر سرعت آسیا از یک حد مشخص افزایش یابد محتویات داخل آسیا به دلیل نیروی گریز از مرکز به دیواره آسیا چسبیده و حرکت سقوط آزاد اتفاق نمی‌افتد، به این سرعت، سرعت بحرانی آسیا گویند. سرعت بحرانی به شعاع آسیا بستگی دارد و آسیاها معمولا با سرعتی معادل 60 تا 90 درصد سرعت بحرانی دوران می کنند [1]. در آسیاها عموما از تجربه و سعی و خطا برای طراحی پارامترهای عملیاتی و عملکردی استفاده می‌شود که معمولا پرهزینه و زمان بر است. استفاده از روش‌های نوین ترکیبی نظیر شبیه‌سازی آزمایشگاهی به همراه تکنیک‌های بهینه‌سازی و مدل‌سازی عددی این امکان را فراهم می‌کند تا بدون ایجاد هزینه‌های گزاف بتوان بهترین طرح ممکن را ایجاد کرد. رضایی‌زاده و همکارانش [3] در سال 2010 به کمک نتایج آزمایشگاهی تاثیر پارامترهای عملکردی آسیا بر بارهای ضربه‌ای را در شرایط خشک بررسی کردند. آنها به کمک یک آسیای آزمایشگاهی بارهای ضربه‌ای که تحت تاثیر تعدادی از پارامترها از قبیل درصد پرشدگی آسیا، تعداد و سرعت آسیا می‌باشد را بررسی کردند. در نهایت نشان دادند که با افزایش سرعت، افزایش تعداد لاینر و کاهش درصد پرشدگی، بارهای ضربه‌ای و فرکانس آنها افزایش می‌یابد. ابراهیمی‌نژاد و فولادی [4] در سال 2009 به بررسی حرکت یک تک گلوله در آسیای نیمه خودشکن خشک با روش تحلیلی پرداختند. آنها پارامترهای مختلف بر روی بارهای ضربه‌ای را بررسی کردند. سلیمانی و همکاران [5] با استفاده از روش آزمایشگاهی اثر پارامترهای سرعت آسیا و میزان شارژ و حجم دوغاب را بر بارهای ضربه‌ای در یک آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی بررسی کردند و نتیجه گرفتند با افزایش سرعت، بارهای ضربه‌ای افزایش و با افزایش میزان شارژ و افزایش غلظت دوغاب بارهای ضربه‌ای کاهش می‌یابد. جورجویچ و همکاران [7,6] با استفاده از روش المان گسسته اثر ارتفاع و سرعت آسیا را روی توان کششی آسیا و انرژی مخصوص و بارهای ضربه‌ای در یک آسیای خودشکن به قطر 5 متر بررسی نمودند و نشان دادند تعداد و ارتفاع لاینر، سرعت آسیا و درصد پرشدگی آسیا تاثیر زیادی در بارهای ضربه‌ای دارند. راجامانی [8] در سال 2000 با استفاده از روش المان گسسته خردایش مواد را در آسیای بزرگ بررسی کرد. جانسن و همکاران [9] در سال 2011 با ترکیب مدل اجزای محدود و المان گسسته اثر متقابل گلوله و سنگ را بر بدنه آسیا بررسی نمود. تانو [10] در سال 2005 با استفاده از روش کالیبراسیون مکانیکی رابطه بار وارده به لاینر و شکست لاینر را بررسی نمود. جانسن و همکاران [11] در سال 2012 با استفاده از روش اجزای محدود فشار و تنش های ایجاد شده در آسیای با ابعاد کوچک را محاسبه نمودند و نشان دادند با این روش می‌توان تنش‌های ایجاد شده در آسیای واقعی را پیش‌بینی نمود. بنیسی و هادی زاده [12] با اندازه‌گیری سایش لاینر با استفاده از شابلون روند سایش لاینر در آسیای واقعی را بررسی نمودند. یاحقی و همکاران [13] با بررسی سایش لاینر در حالت سه بعدی مدلی برای پیش‌بینی سایش لاینر معرفی نمودند. اون و کلیری [14] در سال 2015 با استفاده از روش المان گسسته اثر ارتفاع و پرشدگی آسیا بر فشار اعمال شده در ناحیه پاشنه بار را بررسی نمودند. با بررسی تحقیقات انجام گرفته مشاهده می‌شود که تا کنون مطالعه ای در مورد اثر پروفیل لاینر بر نیروها و تنش‌های ایجاد شده به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام نگرفته است. در این تحقیق اثر پروفیل لاینر (ارتفاع و زاویه) بر تنش های ایجاد شده (بر اساس معیار ون مایسز) و میزان خردایش خوراک در اثر برخورد گلوله و سنگ معدن به لاینر به روش عددی و آزمایشگاهی بررسی شده است و سرعت چرخش و ارتفاع لاینر و زاویه بهینه برای ایجاد حداکثر میزان خردایش معرفی شده است.

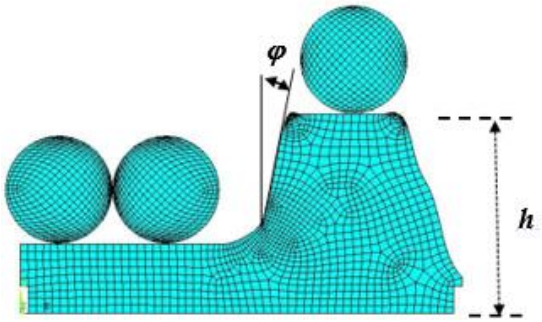

Fig. 1 Height and face angle of liner

شکل1 ارتفاع و زاویه لاینر

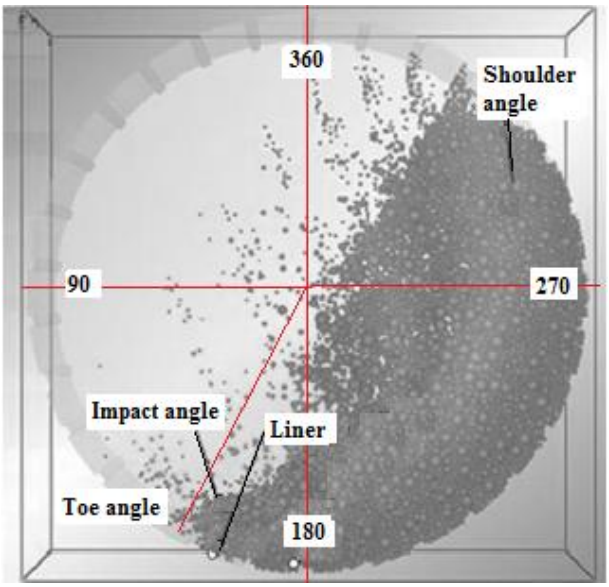

Fig. 2 Definition of the load behavior in a SAG mill [3]

شکل2 حرکت بار درون آسیای نیمه خودشکن [3]

2- بارهای ضربه ای

توزیع انرژی داخل آسیا ناشی از شکل پروفیل بار داخل آن است. شکل پروفیل داخل آسیا به سرعت آسیا و هندسه لاینرها و ابعاد ذرات و چگالی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.21.6]

آنها در آسیا بستگی دارد. از لحاظ سطح انرژی، سطوح انرژی داخل آسیا را می توان به سه سطح انرژی کم و متوسط و زیاد تقسیم بندی نمود. معمولا انرژی متوسط و زیاد ناشی از بارهای ضربه‌ای داخل آسیا می‌باشند. یکی از مکانیزم‌های خردایش در آسیا، استفاده از بارهای ضربه‌ای می‌باشد. بارهای ضربه‌ای هنگامی بوجود می‌آیند که ذرات توسط لاینر بالا آورده شده و وارد حرکت آبشاری می‌شوند و سپس در اثر سقوط مستقیم بر روی بار، باعث شکست سایر ذرات می‌گردند. هنگام برخورد گلوله به پاشنه بار، می‌توان نیروی آن را به یک مولفه مماسی و یک مولفه نرمال تقسیم کرد که مولفه نرمال اثر شکنندگی و مولفه مماسی اثر سایشی دارد. درون آسیا به زاویه‌ای که اولین برخورد ذرات به لاینر اتفاق می افتد زاویه آستانه گویند و این زاویه نقش مهمی در پدیده خردایش دارد [15-18]. کنترل پارامترهای عملکردی آسیا در ایجاد محدوده برخورد مناسب ذرات در ناحیه پاشنه بار و زاویه آستانه مناسب بسیار مهم می باشد که در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است.

3- مواد و روش تحقیق

به منظور محاسبه تنش های ایجاد شده در اثر برخورد محتویات داخل آسیا در ناحیه پاشنه بار از روش اجزای محدود استفاده شده است. برای تحلیل برخورد گلوله به لاینر و سنگ معدن در آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه از زیر مجموعه آنالیز صریح نرم افزار انسیس استفاده شد. در مدلسازی رفتار گلوله صلب و لاینر الاستیک و سنگ معدن ترد و ابعاد آسیا و لاینرها و سرعت آسیا با اندازه واقعی در نظر گرفته شد. در جدول 1 شرایط مدل اجزای محدود نشان داده شده است. جهت بررسی اثر تغییر زاویه لاینر بر تنش های ایجاد شده، ارتفاع لاینر مقدار ثابت 146 میلیمتر (ارتفاع لاینر آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه) در نظر گرفته شد و زاویه لاینر از مقدار 5 درجه تا 25 درجه متغییر است. جهت بررسی اثر تغییر ارتفاع لاینر بر تنش های ایجاد شده، زاویه لاینر مقدار ثابت 14 درجه (زاویه لاینر آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه)در نظر گرفته شد و ارتفاع لاینر از مقدار 66 میلیمتر تا 246 میلیمتر متغییر است. در هر مرحله تنش‌های ناشی از برخورد ذرات با سطح لاینر محاسبه شد.

4- اعتبار سنجی مدل اجزای محدود

به منظور بررسی صحت نتایج مدل اجزای محدود از مدل آزمایشگاهی استفاده شد. آسیای آزمایشگاهی با مقیاس یک دهم اندازه آسیای واقعی ساخته شد (شکل 3). آسیا قابلیت استفاده از لاینرهای با ارتفاع مختلف را دارد. در جدول 2 خصوصیات آسیای آزمایشگاهی نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری بارهای ضربه‌ای وارد شده به پاشنه بار از یک عدد نیروسنج که روی لاینر آسیا نصب شده استفاده شد. محدوده اندازه‌گیری نیروسنج با خاصیت پیزوالکتریک از 44 تا 22400 نیوتن با دقت یک نیوتن است. سیگنال‌های خروجی نیروسنج به صورت کالیبره شده توسط نمایشگر نشان داده می‌شود (شکل 3). به منظور بررسی اثر ارتفاع لاینر بر بارهای ضربه ای و میزان خردایش سنگ معدن از لاینرهایی با ارتفاع 6 و 8 و 12 و 14 میلیمتر استفاده شد. در شکل 4 این لاینرها نشان داده شده است. مراحل انجام آزمایش‌ها به این صورت است که ابتدا لاینرهای با ارتفاع 6 میلیمتر داخل

جدول 1 پارامترهای مدل اجزای محدود آسیا

Table 1 Mill parameters for FEM model

آسیا	طول (m)	4.878
	قطر (m)	9.754
	سرعت ($rads^{-1}$)	2.86-4.18
	سرعت (N_c)	%65-%95 سرعت بحرانی
لاینر (بالابر)	تعداد	60
	ارتفاع (m)	0.066-0.246
	زاویه پیشانی (^{o})	5-25
	مدول یانگ (MPa)	200
	قطر گلوله (m)	0.12
	چگالی گلوله (kgm^{-3})	7800
خوراک	مدول یانگ (MPa)	200
	ماده	سنگ معدن مس
	چگالی سنگ (kgm^{-3})	2900-2780
	اندازه (mm)	13.2-65
المان	مدول یانگ (MPa)	71
	نوع المان	تماسی
	نوع تماس	گره با گره

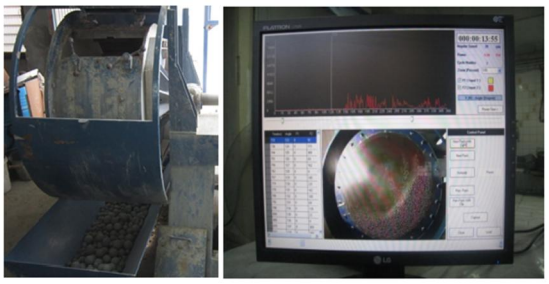

Fig. 3 The experimental pilot SAG mill

شکل 3 آسیای آزمایشگاهی استفاده شده

جدول 2 شرایط عملیاتی آسیای آزمایشگاهی

Table 2 Conditions of implementing the experiments

آسیا	طول (m)	0.5
	قطر (m)	1
	سرعت ($rads^{-1}$)	3.3
	سرعت (N_c)	%75 سرعت بحرانی
لاینر (بالابر)	تعداد	60
	ارتفاع (m)	0.006-0.014
	زاویه پیشانی (^{o})	25
	قطر گلوله (m)	0.03
خوراک	ماده	سنگ معدن مس
	اندازه (mm)	13.2-16
	مقدار (kg)	75

آسیا نصب شده و آسیا با سنگ معدن با اندازه 13.2 تا 16 میلیمتر و گلوله های 30 میلیتری مجموعا 25 درصد حجم آسیا پر شد. آسیا به مدت 15 دقیقه با 75 درصد سرعت بحرانی کار کرده و بارهای ضربه‌ای توسط نیروسنج اندازه گیری شد. در پایان کار، محصول آسیا آنالیز سرندی شد و مقدار درصد تجمعی عبوری از سرندی به اندازه 1.46 میلیمتر (یک دهم میانگین اندازه ذرات اولیه سنگ) بدست آمد. این پارامتر را اندیس خردایش (t_{10}) نامند و بیانگر میزان خردایش سنگ معدن است. این آزمایش با لاینرهای به ارتفاع 8 و 12 و 14 نیز انجام شد و نیروها و مقادیر اندیس خردایش محاسبه شد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.21.6]

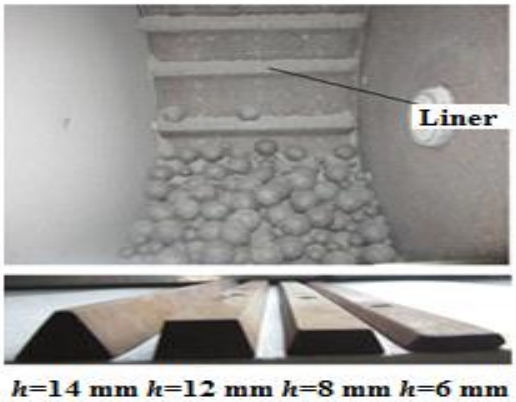

Fig. 4 Liners used and position of lifters in experiment SAG mill

شکل4 لاینر های استفاده شده و موقعیت آنها درآسیای آزمایشگاهی

از آنجا که مدل آزمایشگاهی با مقیاس یک دهم مدل اصلی ساخته شده است، ابتدا برای اعتبار سنجی مدل اجزای محدود نتایج تنش مربوط به لاینر با ارتفاع 146 میلیمتر مدل اجزای محدود با نتایج مربوط به لاینر با ارتفاع 14 میلیمتر مدل آزمایشگاهی با هم مقایسه شد (شکل 5). با داشتن نیروهای گرفته شده از نیروسنج و سطح مقطع لاینر تنش عمودی لاینر در مدل آزمایشگاهی قابل محاسبه است. شکل 5 نشان می دهد که نتایج مدل اجزای محدود و مدل آزمایشگاهی همخوانی خوبی دارند.

همانطور که در شکل 5 نشان داده شده است نتایج حاصل از مقایسه دو روش عددی (A) و آزمایشگاهی (B) نشان می‌دهد که موقعیت برخورد در محل پاشنه در زاویه 160 تا 230 قرار دارد و نشان می دهد موقعیت زاویه‌ای تنش حداکثر و محدوده شروع زاویه آستانه برای دو روش یکسان است و این نتیجه اعتبار حل عددی را تایید می نماید. ضمنا در این حالت سرعت هر دو آسیا 75 درصد سرعت بحرانی می باشد.

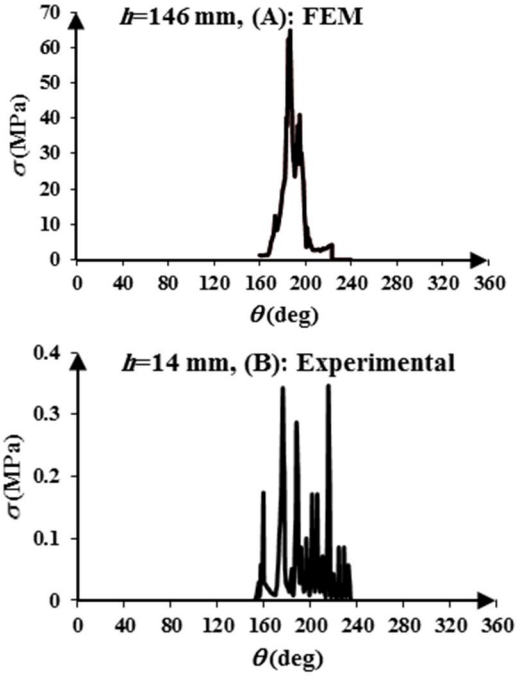

Fig. 5 Comparison of von-Mises stress for FEM and Experimental SAG mill

شکل 5 مقایسه نتایج مدل اجزای محدود و آسیای آزمایشگاهی

5- نتایج و بحث

5-1- بررسی اثر ارتفاع لاینر

در آسیا بارهای ضربه‌ای قوی منجر به شکست و خردایش مواد در ناحیه پاشنه می‌شود. بارهای ضربه‌ای تابعی از جرم و سرعت ذرات می باشند لذا هر عاملی که باعث تغییر سرعت ذرات گردد بارهای ضربه‌ای را نیز تغییر می دهد [19]. یکی از عوامل بررسی شده در این پژوهش اثر تغییر ارتفاع لاینر بر تنش‌های ناشی از برخورد محتویات آسیا در پاشنه بار با استفاده از روش اجزای محدود است. بدیهی است دلیل استفاده از این تغییر، دستیابی به بهترین شرایط پروفیل بار و تنش‌های برخورد حداکثر جهت افزایش خردایش می‌باشد. در شکل‌های 6 و 7 اثر تغییر ارتفاع لاینر بر تنش ناشی از برخورد ذرات به لاینر در مدل اجزای محدود، نشان داده شده است. در شکل 7 سرعت چرخش آسیا از 65 تا 95 درصد سرعت بحرانی متغییر است.

با توجه به شکل 6 افزایش ارتفاع لاینر باعث افزایش میزان تنش نرمال می‌شود. افزایش بیشتر ارتفاع لاینر باعث حمل بار تا ارتفاع بالاتر شده و ارتفاع سقوط را در حرکت پرتابی افزایش می‌دهد و بارهای ضربه‌ای شدیدتری ایجاد می‌کند. لاینر با ارتفاع کم توانایی بالا بردن ذرات را نداشته و باعث کاهش بارهای ضربه ای می شود. نکته مهم دیگری که در شکل 6 نشان داده شده این است که با افزایش ارتفاع لاینر ذرات در زاویه کمتری نسبت به افق به بدنه آسیا برخورد کرده و زاویه آستانه (θ شروع محدوده تنش نرمال در محور X ها) کاهش می‌یابد بنابراین افزایش ارتفاع لاینر محدوده برخورد ذرات به لاینر را افزایش می‌دهد و باعث افزایش خردایش می‌شود. معمولا سعی بر

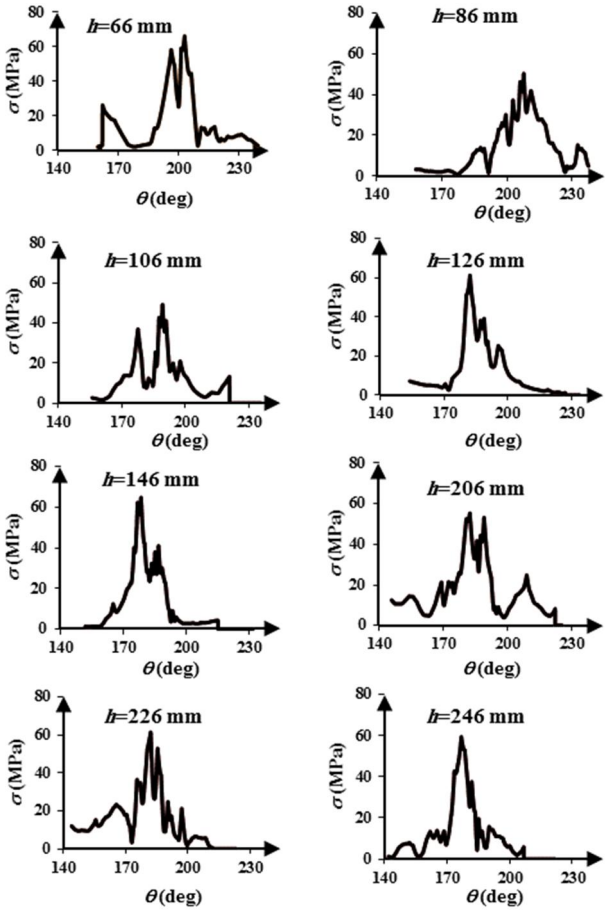

Fig. 6 Von-Mises stress for various liner height, FEM model

شکل 6 تغییرات تنش نرمال برای ارتفاع مختلف در مدل اجزای محدود

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.21.6]

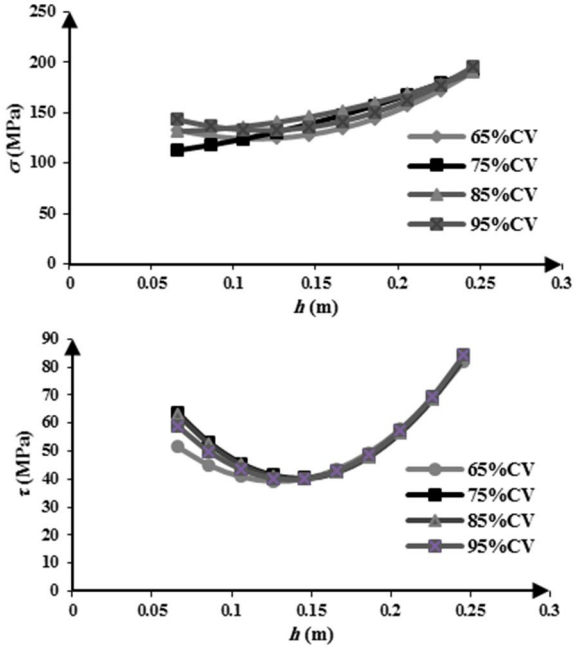

Fig. 7 Shear and von-Mises stress for various liner height

شکل 7 تغییرات تنش برشی و نرمال برای ارتفاع مختلف و سرعت متفاوت

این است که ارتفاع لاینر به گونه‌ای طراحی شود که آستانه برخورد در محدوده پاشنه بار قرار گیرد تا از برخورد نامناسب که منجر به شکست لاینر و اتلاف انرژی می شود جلوگیری شود.

سرعت آسیا تاثیر زیادی در مقدار و موقعیت بارهای ضربه‌ای در داخل آسیا دارد. با توجه به شکل 7 با افزایش سرعت آسیا بارهای ضربه‌ای افزایش می‌یابد. در سرعت‌های چرخش متفاوت با افزایش ارتفاع لاینر تنش قائم افزایش می‌یابد. هم‌زمان با افزایش سرعت آسیا (بیشتر از 75 درصد سرعت بحرانی) شانه بار به سمت بالا حرکت نموده و ذرات دیرتر سقوط کرده و زودتر به بدنه آسیا برخورد کرده و با برخورد مستقیم به لاینر باعث شکست لاینر می شود. در شکل 7 همچنین تغییرات تنش برشی با تغییر ارتفاع لاینر نشان داده شده است. تنش برشی باعث سایش لاینر می شود. شکل 7 نشان می دهد کمترین تنش برشی در سرعت های چرخش متفاوت مربوط به لاینر با ارتفاع 140 میلیمتر است. در نتیجه ارتفاع و سرعت چرخش بهینه برای جلوگیری از شکست لاینر و داشتن حداکثر تنش نرمال برای خردایش بیشتر و کمترین میزان تنش برشی برای سایش کمتر لاینر به ترتیب 140 میلیمتر و 75درصد سرعت بحرانی است.

5-2- بررسی اثر زاویه لاینر

یکی دیگر از عوامل موثر در پروفیل بار داخل آسیا زاویه پیشانی لاینر می باشد. این زاویه بر میزان بارهای ضربه‌ای داخل آسیا و سایش لاینر تاثیر فراوانی دارد [20]. به منظور ارزیابی میزان اثر این زاویه و دستیابی به یک زاویه‌ی مناسب با حداقل سایش لاینر و حداکثر خردایش ناشی از بارهای ضربه ای تاثیر تغییر زاویه پیشانی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل های 8 و 9 اثر افزایش زاویه لاینر بر تنش نرمال در مدل اجزای محدود، نشان داده شده است.

شکل 8 نشان می‌دهد که با افزایش زاویه لاینر تا 15 درجه تنش نرمال افزایش یافته و با افزایش بیشتر زاویه لاینر به دلیل برخورد ذرات پایین‌تر از ناحیه پاشنه بار و کاهش سرعت ذرات تنش نرمال کاهش می یابد. شکل 9 نشان می‌دهد که در سرعت های چرخش متفاوت بیشترین مقدار تنش برشی و نرمال مربوط به زاویه پیشانی 15 درجه است. با توجه با اینکه در محدوده زاویه برخورد ذرات به لاینر انباشتگی مواد وجود دارد، تنش برشی در این محدوده باعث سایش ذرات شده، در نتیجه زاویه پیشانی 15 درجه به دلیل داشتن بیشترین مقدار تنش برشی و نرمال مناسب ترین زاویه برای طراحی لاینر است.

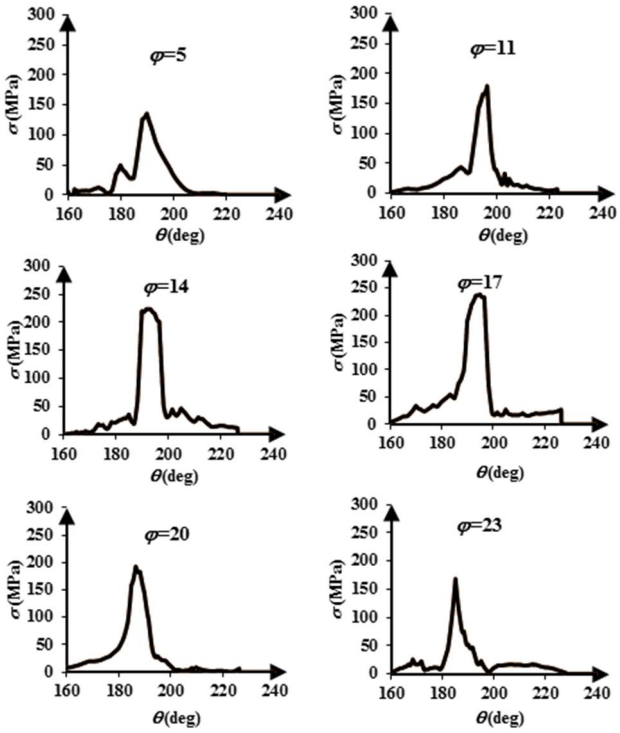

Fig. 8 Von-Mises stress for various liner angle, FEM model

شکل 8 تغییرات تنش نرمال برای زاویه های مختلف در مدل اجزای محدود

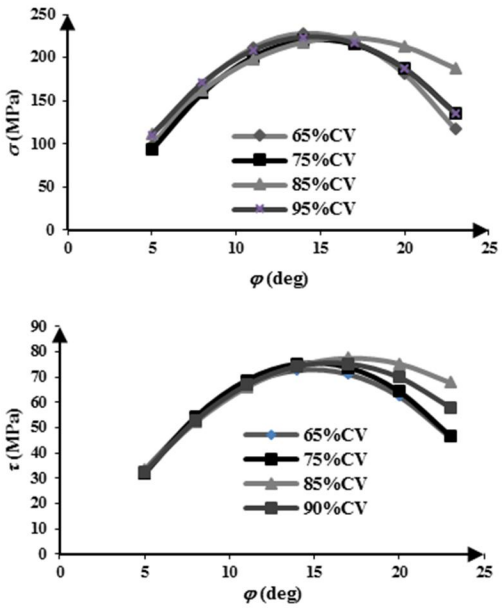

Fig. 9 Shear and von-Mises stress for various liner angle

شکل 9 تغییرات تنش برشی و نرمال برای ارتفاع مختلف در سرعت متفاوت

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.21.6]

5-3- بررسی آزمایشگاهی اثر ارتفاع لاینر

برای محاسبه بارهای ضربه‌ای در آسیای آزمایشگاهی از یک عدد نیروسنج که در زیر لاینر در ناحیه پاشنه بار نصب شده است استفاده شد. نیروهای بدست آمده برای یک دور چرخش آسیا ثبت شده است. ساعت 12 به عنوان نقطه صفر دستگاه انتخاب شده و تمامی زوایای θ بر اساس آن اندازه‌گیری شده است. این آزمایش با لاینرهای با ارتفاع 6 و 8 و 12 و 14 میلیمتر انجام شد و در شکل 10 بارهای ضربه‌ای اندازه‌گیری شده بوسیله نیروسنج در آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی نشان داده شده است. با توجه به شکل 10 شدت و فرکانس بارهای ضربه‌ای اندازه‌گیری شده در پاشنه بار توسط نیروسنج با افزایش ارتفاع لاینر افزایش یافته و خردایش ماده معدنی افزایش می یابد و در نتیجه صحت نتایج گرفته شده از روش اجزای محدود برای آسیای واقعی را نیز نشان می‌دهد. به منظور بررسی میزان خردایش ماده معدنی به روش فیزیکی، بعد از اتمام هر آزمایش محصول آسیا به وسیله سرند 1.46 میلیمتر دانه بندی شده و مقدار اندیس خردایش برای ارتفاع لاینر 6 تا 14 میلیمتر محاسبه شده است. در شکل 11 اندیس خردایش بدست آمده از نتایج دانه بندی محصول آسیا برای لاینرهای با ارتفاع مختلف نشان داده شده است.

شکل 11 نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع لاینر درصد تجمعی عبوری محصول از سرند 1.46 میلیتر افزایش یافته که نشان دهنده تولید محصول ریزدانه تر و در نتیجه افزایش قابلیت خردایش آسیا با افزایش ارتفاع لاینر است.

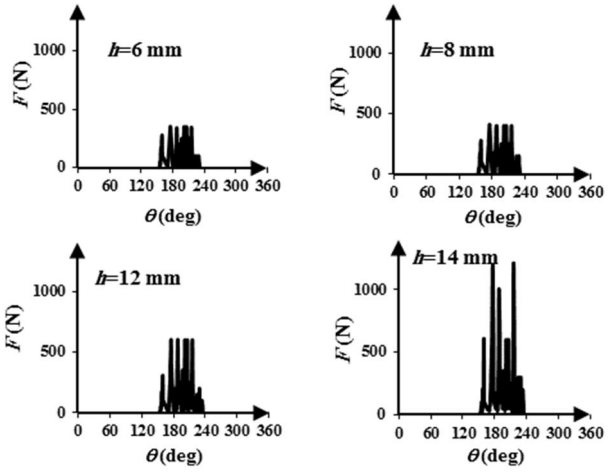

Fig. 10 Impact force magnitude by load cell sensor, Experimental SAG mill

شکل 10 نیروی اندازه گیری شده توسط نیروسنج در آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی

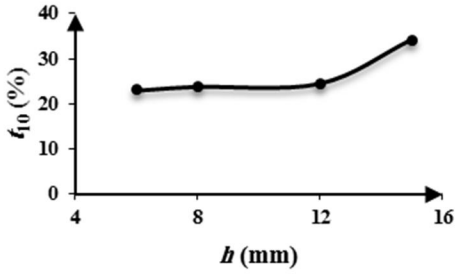

Fig. 11 T_{10} for different liner height

شکل 11 اندیس خردایش برای ارتفاع مختلف لاینر

6- نتیجه گیری

- با افزایش ارتفاع لاینر تنش نرمال ایجاد شده در اثر برخورد ذرات در پاشنه بار افزایش یافته و خردایش زیاد می شود.
- با افزایش ارتفاع لاینر زاویه آستانه برخورد کاهش و محدوده برخورد ذرات به بدنه آسیا افزایش می یابد.
- با افزایش ارتفاع لاینر از یک حد معین (140 mm) به دلیل برخورد ذرات در ناحیه بالاتر از پاشنه تنش قائم کاهش یافته و خردایش کم می شود.
- ارتفاع لاینر 140 میلیمتر دارای زاویه آستانه مناسب بوده و می تواند تنش نرمال مناسب جهت خردایش را فراهم نماید.
- ارتفاع لاینر 140 میلیمتر کمترین میزان تنش برشی و در نتیجه کمترین سایش لاینر را ایجاد می‌کند.
- زاویه پیشانی لاینر 15 درجه بیشترین مقدار تنش برشی و نرمال را ایجاد نموده و بیشترین میزان خردایش را ایجاد می کند.
- دانه‌بندی محصول با افزایش ارتفاع لاینر ریزتر شده که نشان دهنده افزایش خردایش با افزایش ارتفاع لاینر است.
- با استفاده از نتایج بدست آمده بهترین ارتفاع و زاویه لاینر جهت داشتن حداکثر خردایش به ترتیب 140 mm و 15 درجه است.

7- تقدیر و تشکر

از مسئولان مجتمع مس سرچشمه، خصوصا کارشناسان واحد تحقیق و توسعه و مسئولان موسسه آموزش عالی کار به خاطر حمایت های بی‌دریغ از این تحقیق تشکر به عمل می‌آید.

8- مراجع

[1] R. P. King, Modeling and simulation of mineral processing systems, pp. 300-305, *Butterworth-Heinemann* , USA, 2001.
[2] F. C. Bond, *Crushing and grinding calculations*, British Chemical Engineering, Vol. 6, No. 6, pp. 250-257, 1961.
[3] M. Rezaeizadeh, M. Fooladi, S. Powell, Experimental observations of lifter parameters and mill operation on power draw and liner impact loading, *Minerals Engineering*, Vol. 23, No. 1, pp. 1182–1191, 2010.
[4] S. Ebrahimi-Nejad, M. Fooladi-Mahani, Optimizing the characteristics of the motion of steel balls and their impact on shell liners in SAG mills, *Iranian Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 6-22, 2009.
[5] M. M. Soleymani, M. Fooladi Mahani, M. Rezaeizadeh, Experimental study the impact forces of tumbling mills in wet grinding, *Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 1-11, 2015.
[6] N. Djordjevic, R. Morrison, B. Loveday, Modelling comminution patterns within a pilot scale AG/SAG mill, *Minerals Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp.1505-1516, 2006.
[7] N. Djordjevic, F. N. Shi, R. Morrison, Determination of lifter design, speed and filling effects in AG mills by 3D DEM, *Minerals Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 1135-1142, 2004.
[8] R. K. Rajamani, Semi-Autogenous mill optimization with DEM simulation software, *Mineral and Metallurgical Processing*, pp. 209-245, 2000.
[9] P. Jonsen, B. Palsson, K. Tano, A. Berggren, Prediction of mill structure behaviour in a tumbling mill, *Minerals Engineering*, Vol. 24, No. 1, pp. 236–244, 2011.
[10] K. Tano, *Continuous Monitoring of Mineral Processes with Special Focus on Tumbling Mills – A Multivariate Approach*, PhD Thesis, Luleå University of Technology, Sweden, 2005.
[11] P. Jonsén, I. Bertil, H. Häggblad, A novel method for full-body modelling of grinding charges in tumbling mills, *Minerals Engineering*, Vol. 33, No. 1, pp. 2–12, 2012.
[12] S. Banisi, M. Hadizadeh, 3-D liner wear profile measurement and

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.21.6]

analysis in industrial SAG mills. *Minerals Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 132–139, 2006.
[13] M. Yahtaei, S. Banisi, M. Hadizadeh, Modification of SAG mill liner shape based on 3-D liner wear profile measurements, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 23, No. 15, pp. 111-115, 2009.
[14] P. Owen, P. W. Cleary, The relationship between charge shape characteristics and fill level and lifter height for a SAG mill, *Minerals Engineering*, Vol. 83, No. 1, pp. 19–32, 2015.
[15] M. S. Powell, G. N. Nurick, A study of charge motion in rotary mills Part 1—extension of the theory, *Minerals Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 259-268, 1996.
[16] R. Rajamani, A. Joshi, B. Mishra, Simulation of industrial SAG mill charge motion in 3D space, In: *Proceedings 2002 SME Annual Meeting*, SME Publication, Phoenix, Arizona, 2002.
[17] M. A. Van Nierop, A discrete element method investigation of the charge motion and power draw of an experimental two-dimensional mill, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 61, No. 2, pp. 77-92, 2001.
[18] 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*, Vol. 24, No. 1, pp. 143-159, 1988.
[19] M. S. Powell, N. S. Weerasekara, S. Cole, R. D. Laroche, J. Favier, DEM modelling of liner evolution and its influence on grinding rate in ball mills. *Minerals Engineering*, Vol. 24, No. 1, pp. 341-351, 2011.
[20] P. W. Cleary, P. J. Owen, D. I. Hoyer, S. Marshall, Prediction of mill liner shape evolution and changing operational performance during the liner life cycle: Case study of a Hicom mill. *International Journal of Numerical. Method in Engineering*. Vol. 81, No. 1, pp. 1157-1179, 2010.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.21.6]