



## ارائه آزمون آزمایشگاهی جدید برای تعیین انرژی و قابلیت خردایش خوراک آسیای مجتمع مس سرچشمه

محمد رزانی<sup>۱\*</sup>، ابوالفضل معصومی<sup>۲</sup>، مسعود رضایی زاده<sup>۳</sup>، محمد نوع پرست<sup>۴</sup>

\* نویسنده مسئول [razani.m@ut.ac.ir](mailto:razani.m@ut.ac.ir)

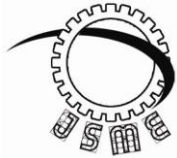
واژه‌های کلیدی	چکیده
آزمون آسیای نیمه خودشکن انرژی قابلیت خردایش سختی و دانه‌بندی سنگ	از جمله عواملی که معمولاً در آسیاها اندازه‌گیری آن دشوار می‌باشد، تعیین قابلیت خردایش خوراک و توزیع ابعاد به صورت واقعی و در زمان کوتاه است. در صورت دستیابی به راه حلی سریع و مناسب جهت تعیین این پارامترها می‌توان رابطه‌ای مناسب بین انرژی و سختی و دانه‌بندی پیدا نمود. سختی خوراک یکی از عوامل بسیار موثر در خردایش مواد معدنی در فرآیند فرآوری مواد معدنی می‌باشد و این پارامتر به عواملی نظیر خواص مکانیکی مواد معدنی و شرایط برخورد وابسته است. استفاده بهینه از انرژی جهت خردایش مواد معدنی در آسیاها از اهداف اصلی این تحقیق می‌باشد. در ارائه گردید. امروزه از آزمون آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی جهت بررسی شرایط مدار خردایش در زمان تغییر توزیع دانه بندی خوراک، اندازه گلوله و سرعت آسیا و تخمین انرژی لازم برای خردایش کامل در آسیای خودشکن و نیمه خودشکن، استفاده می‌شود. در این تحقیق یک آزمون آسیای نیمه خودشکن جدید جهت اندازه‌گیری انرژی و قابلیت خردایش خوراک، پیشنهاد شده و اثر پارامترهای مختلف بر دانه بندی و سختی خوراک بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد تفاوت عدد سختی (A×b) بدست آمده از روش پیشنهادی جدید و آزمون بار افتان استاندارد ۱/۹ درصد است. همچنین با استفاده از روش پیشنهادی جدید می‌توان انرژی لازم جهت خردایش و دانه‌بندی محصول را با دقت بالایی تخمین زد.
تاریخ ارسال: ۱۳۹۵/۰۴/۱۹	
تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۱/۲۵	
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱/۲۷	

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. مربی، دانشکده مکانیک، دانشگاه کار، تهران، ایران.

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی و فن آوری پیشرفته کرمان، کرمان، ایران.

۴- استاد، دانشکده معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران.



Journal of  
Solid Mechanics  
in Engineering

## Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



### New laboratory scale grinding method to predict energy and the feed grindability of mill of Sarcheshmeh Copper Complex

Mohammad Razani<sup>1</sup>, Abolfazl Maesoumi<sup>2</sup>, Masoud Rezaeizadeh<sup>3</sup>, Mohammad Noparast<sup>4</sup>

\* Corresponding Author: [razani.m@ut.ac.ir](mailto:razani.m@ut.ac.ir)

---

#### Abstract:

One of the factors which are usually difficult to be measured in mills is the grindability and distribution of feed under real situation and in a short time. In the condition of achieving a fast and convenient way to determine these parameters, the proper relationship between energy, hardness and particle size distribution can be obtained. Feed hardness is one of the most important factors in grinding of minerals in mineral-processing process, and this parameter depends on factors, such as the mechanical properties of minerals and collision conditions. The efficient use of energy during grinding of minerals in mills is one of the main objectives of this research. This research tried to provide an experimental method based on real collision conditions in a mill. Nowadays, SAG design test is used for evaluation of grinding circuit in the time of change in feed particle size distribution, size of the ball and the speed of mill, and for the prediction of energy required for complete grinding in AG and SAG mills. In this study, a new SAG design test for measuring the amount of specific energy and feed grindability was suggested and the effect of various parameters on product size distribution and hardness results was assessed. Results show the deviation of the  $A \times b$  estimated by new method with values of drop weight tests were less than 1.9 percent. This new model can also be used to accurately predict the specific energy and particle size distribution.

---

---

#### Key words:

Laboratory semi-autogenous  
Energy  
Grindability  
Particle size and Feed  
hardness

---

---

1- PhD Student, School of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran.

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

2- Professor, School of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran.

## ۱- مقدمه

بنینی [۳] و ابل و همکاران [۴] با اضافه کردن وسایل اندازه‌گیری جانبی به دستگاه بار افتان، خواص خردایشی مواد معدنی را بررسی نمودند. مزیت این روش نزدیک بودن مکانیزم خردایش به آسیای نیمه خودشکن و معایب این روش نیاز به حجم نمونه زیاد و وقت گیر بودن به دلیل تکرار زیاد ضربات و واقعی نبود شرایط برخورد به دلیل تخت بودن بار افتان است. در آزمون آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی از آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی با ابعاد مشخص جهت محاسبه سختی خوراک استفاده می‌شود. دبی و همکاران [۵]، بنت و همکاران [۶] و کوسیک و همکاران [۷] با استفاده از این آزمون، برای محاسبه سختی خوراک جهت طراحی آسیای نیمه خودشکن و خودشکن استفاده کرده‌اند. از معایب این روش می‌توان نیاز به حجم زیاد نمونه، پرهزینه بودن ساخت آسیای آزمایشگاهی و زمان بر بودن آزمون و عدم امکان بررسی هم زمان پارامترهای موثر در خردایش، نام برد. در روش المان گسسته با استفاده از روش‌های عددی و شبیه‌سازی خردایش مواد درون آسیا، میزان انرژی و سختی خوراک اندازه‌گیری می‌شود. موریسون [۸] در سال ۲۰۰۴ با استفاده از روش المان گسسته، آسیای آزمایشگاهی به قطر ۱/۸ متر و طول ۰/۶ متر را شبیه‌سازی کرد و مکانیزم‌های مختلف خردایش خوراک را بررسی نمود. مورل [۹] در سال ۲۰۰۹ با بررسی آزمایشگاهی خواص خوراک، انرژی مخصوص آسیا را محاسبه کرد و نحوه خردایش مواد مخروطی شکل و رولی را مقایسه کرد. متی [۱۰] در سال ۲۰۱۰ با استفاده از روش المان گسسته اثر شکل ذرات در خردایش را بررسی نمود و انرژی خردایش را برای ذرات با اشکال مختلف محاسبه کرد. پاول [۱۱] در سال ۲۰۱۱ با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی و مقایسه نتایج با روش المان گسسته خردایش ریز خوراک را بررسی کرد و اثر خواص خوراک و پارامترهای حرکت آسیا و میزان پرشدگی آسیا را بر محصول آسیا بررسی کرد. در روش المان گسسته به دلیل فرضیات ساده کننده‌ای که برای حل معادلات عددی در نظر گرفته می‌شود نتایج حاصل از نتایج واقعی فاصله می-

ارزیابی روشهای قابلیت خردایش و انرژی شکست معیاری برای تخمین سختی سنگ معدن می‌باشد و با توجه به اینکه مکانیزم خردایش در آسیاهای مختلف با یکدیگر متفاوت است، لذا دستیابی به یک روش مناسب جهت تخمین قابلیت خردایش (سختی) سنگ از اهمیت زیادی برخوردار است. روشهای محاسبه قابلیت خردایش و سختی خوراک عمدتاً بر اساس رابطه بین کاهش اندازه ذرات و مقدار انرژی مصرفی بیان می‌شوند و شامل آزمون اندیس کار باند، شاخص توان آسیای نیمه خودشکن<sup>۱</sup>، آزمون بار افتان استاندارد<sup>۲</sup>، آزمون آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی<sup>۳</sup> و روش المان گسسته<sup>۴</sup> است. اندیس کار گلوله‌ای معمولاً در یک سیکل بسته و تحت شرایط استاندارد در آزمایشگاه تعیین می‌شود. مقدار این اندیس در روند عملی طراحی آسیاهای نیمه خودشکن و خودشکن و محاسبه انرژی مورد نیاز برای خردایش در این آسیاها کاربرد چندانی ندارد چون مکانیزم خردایش در آنها متفاوت از آسیاهای گلوله‌ای و یا میله‌ای است [۱]. از معایب دیگر این روش طولانی بودن مدت زمان آزمایش است. هدف اصلی آزمون شاخص توان آسیای نیمه خودشکن، دستیابی به رابطه‌ای جهت تعیین توان مورد نیاز در آسیاهای نیمه خودشکن صنعتی با توجه به اندازه محصول نهایی و سختی سنگ می‌باشد. ابعاد آسیای استفاده شده ۳۰۲ × ۱۰۲ میلی‌متر با گلوله‌هایی به قطر ۲۵ میلی‌متر است [۲]. مزیت این روش مقدار نمونه کم (۲ kg) می‌باشد. از معایب این روش کم بودن قطر آسیای استفاده شده و سایشی بودن مکانیزم خردایش است. در آزمون بار افتان استاندارد، بعد از سقوط وزنه بر روی نمونه و دانه‌بندی محصول، سختی سنگ اندازه‌گیری می‌شود. برجیوس و

<sup>1</sup> Bond Work Index(BWI)

<sup>2</sup> SAG Power Index(SPI)

<sup>3</sup> Drop Weight Test(DWT)

<sup>4</sup> SAG design

<sup>5</sup> Discrete Elements Methods(DEM)

انرژی و دانه‌بندی محصول با دقت بیشتر و سادگی و سرعت بالاتر نسبت به روش‌های پیشنهادی موجود و امکان بررسی عوامل دیگر مثل سرعت آسیا و هندسه بالابرها بر میزان خردایش مواد، اشاره نمود.

## ۲- نمونه برداری از خوراک

نمونه‌های انتخاب شده جهت انجام آزمون از نواحی فعال معدن مس سرچشمه انتخاب شد. ابتدا آزمون باند و اندیس توان آسیای نیمه خودشکن بر روی نمونه‌های انتخابی انجام شد و نرم‌ترین و سخت‌ترین نمونه معرفی شده است. در جدول (۱) خواص نمونه‌های انتخابی نشان داده شده است.

## ۳- آزمون بار افتان

آزمون بار افتان در مرکز تحقیقاتی JKMRC استرالیا برای ارزیابی ویژگی‌های شکست ضربه‌ای مواد معدنی در یک آسیای خودشکن و نیمه خودشکن در سال ۱۹۹۲ معرفی شده است [۱۸].

جدول (۱) خواص نمونه‌های انتخاب شده

شماره نمونه	مقدار (ton)	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )	اندیس باند ( $\text{kwht}^{-1}$ )	اندیس توان ( $\text{kwht}^{-1}$ )
۱	۱۰	۲۸۵۰	۱۰/۸۷	۱۱/۳۱
۲	۱۰	۲۷۵۰	۱۴/۷۰	۷/۵۳
۳	۱۰	۲۸۱۰	۱۰/۳۷	۷/۱۳
۴	۱۰	۲۸۸۰	۱۳/۰۵	۱۳/۲۴
۵	۱۰	۲۹۸۰	۱۲/۹۰	۲۶/۰۹
۶	۱۰	۲۸۳۰	۱۰/۵۵	۹/۹۱
۷	۱۰	۲۹۱۰	۱۵/۳۲	۲۳/۰۹

محدوده اندازه‌ای ذرات سنگ از ۱۳/۲ میلی‌متر تا ۶۱ میلی‌متر و محدوده انرژی پیشنهادی از ۰/۱ تا ۲/۵ کیلو وات ساعت بر تن متغیر است [۱۸]. پس از انتخاب سطوح انرژی مناسب برای انجام آزمایش، با استفاده از رابطه (۱) می‌توان ارتفاع سقوط وزنه به ازاء یک سطح انرژی ویژه مشخص ( $E_{cs}$ ) را محاسبه نمود.

$$E_{cs} = \frac{0.0272 M_d (h_i - h_f)}{\bar{m}} \quad (1)$$

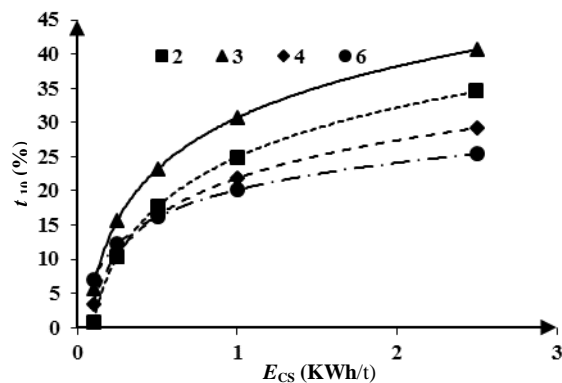
گیرد. مورل [۱۲] در سال ۲۰۰۳ یک آزمون شکست جدید ارائه نمود. مزیت این روش پیشنهادی نیاز به مقدار نمونه کم است. شی [۱۳] در سال ۲۰۰۴ خواص شکست زغال سنگ را در سطوح مختلف انرژی اندازه‌گیری کرد. دانه‌بندی محصول حاصل نشان داد که با افزایش انرژی مقدار ذرات ریز بیشتری تولید می‌شود. تاواریس [۱۴] در سال ۲۰۰۹ با استفاده از آزمون بار افتان و همچنین اضافه کردن وسایل جانبی به دستگاه آزمون بار افتان اثر پارامترهای مختلف، نظیر اندازه ذرات سنگ، اشکال مختلف و انرژی مخصوص خردایش و اندازه گلوله را با پیشنهاد مدل آزمایشگاهی و ریاضی بررسی نمود و الگویی برای پیش‌بینی انرژی شکست ذرات معرفی نمود. خمالو و همکاران [۱۵] نشان دادند که مهم‌ترین خاصیت بنیادی در بررسی رفتار مواد انرژی مخصوص خردایش است. باریوس و همکاران [۱۶] اثر اندازه و انرژی را برای ذرات تخت با رها سازی گلوله با اندازه‌های مختلف بر روی نمونه برای سطح انرژی پایین بررسی نمود و مدل ریاضی برای انرژی و تابع شکست معرفی نمود. نتایج نشان داد که اندازه گلوله در نتایج حاصل تأثیری ندارد. جنس و همکاران [۱۷] اثر پارامترهای عملیاتی و طراحی بر نرخ شکست خوراک با شکل‌های مختلف را بررسی نمود. با توجه به وابستگی سختی به نحوه خردایش سنگ معدن، و مصرف بسیار زیاد انرژی جهت خردایش در معادن، ارائه یک روش سریع با دقت بالا جهت پیش‌بینی و محاسبه سختی و انرژی لازم و دانه‌بندی محصول از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق سعی بر این است که با معرفی یک آزمون آسیای نیمه خودشکن جدید، اثر پارامترهای مختلف بر دانه‌بندی و سختی خوراک بررسی شود. نتایج نشان می‌دهد که بین نتایج دانه‌بندی و انرژی آزمون بار افتان و زمان کارکرد آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی همخوانی نزدیکی وجود دارد و با استفاده از آزمون جدید می‌توان سختی و دانه‌بندی محصول را با دقت بالایی تخمین زد. از مزایای روش پیشنهادی جدید می‌توان به واقعی بودن شرایط برخورد گلوله‌ها به سنگ معدن و امکان پیش‌بینی سختی و

داده شده است. نتایج دانه‌بندی محصول بار افتان در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۱) دستگاه بار افتان گلوله‌ای طراحی و ساخته شده

شکل (۲) نشان می‌دهد که بیشترین اندیس خردایش مربوط به نمونه شماره ۳ و کمترین اندیس خردایش مربوط به نمونه شماره ۶ می‌باشد. در جدول (۲) ضریب  $A \times b$  بدست آمده از آزمون بار افتان گلوله‌ای برای نمونه‌ها نشان داده شده است. با توجه به جدول (۲) بیشترین مقدار ضریب  $A \times b$  مربوط به نمونه شماره ۳ و کمترین مقدار ضریب  $A \times b$  مربوط به نمونه شماره ۷ است. و هرچه ضریب  $A \times b$  کوچکتر باشد نمونه سخت است.



شکل (۲) تغییرات  $t_{10}$  برای سطوح انرژی مختلف برای هفت نمونه

به منظور محاسبه حداقل انرژی شکست لازم برای نمونه‌های انتخاب شده از آزمون بار افتان گلوله‌ای استفاده شد. این کار با رها کردن گلوله بر روی نمونه از ارتفاع‌های مختلف و بدست آوردن حداقل ارتفاع سقوط گلوله جهت شکستن نمونه انجام شد. با داشتن حداقل ارتفاع و جرم گلوله و جرم

پس از انجام آزمایش بر روی ۵۷۰ ذره از هفت نمونه انتخابی، از هر محدوده ابعادی در هر یک از سطوح انرژی، نمونه‌های مربوط جمع آوری شده و سپس درصد تجمعی عبوری از سرندهای استاندارد ۰/۸۵ تا ۵۰/۸ میلیمتر بدست می‌آید، به این کار دانه‌بندی محصول گویند. مهم‌ترین عدد بدست آمده از نمودار دانه‌بندی مقدار درصد تجمعی عبوری از سرندی به اندازه یک‌دهم میانگین هندسی ابعاد اولیه ذرات تحت آزمایش قرار گرفته می‌باشد. این مقدار با  $t_{10}$  نمایش داده خواهد شد که بیانگر درجه خردایش و یا اندیس خردشدگی می‌باشد. رابطه (۲) بیانگر ارتباط بین اندیس خردشدگی ( $t_{10}$ ) و انرژی ویژه شکست ( $E_{CS}$ ) است.

$$t_{10} = A(1 - e^{-bE_{CS}}) \quad (2)$$

مقادیر  $A$  و  $b$  مرتبط با سختی کانسنگ در برابر شکست ضربه‌ای و عامل  $A \times b$  نشانگر قابلیت خردایش نمونه در آسیاهای نیمه خودشکن است [۱۸]. از این حاصل ضرب می‌توان برای اندازه‌گیری مقاومت شکست سنگ در برابر ضربه (مقاومت خردایش در اثر ضربه) استفاده کرد. آزمون بار افتان گلوله‌ای با انتخاب ۵۷۰ ذره از محدوده اندازه‌ای ۱۳/۲ تا ۶۵ میلیمتر برای هفت نمونه انتخابی (مجموعاً ۳۹۹۰ ذره) انجام شد. در شکل (۱) دستگاه بار افتان گلوله‌ای طراحی و ساخته شده نشان داده شده است. از ویژگی‌های دستگاه ساخته شده می‌توان به قابل تنظیم بودن ارتفاع سقوط وزنه‌ها از چند سانتی‌متر تا بیش از ۴ متر و قابل تغییر بودن جرم بار سقوط کننده از ۱ تا ۵۰ کیلوگرم اشاره نمود. با توجه به تعداد تکرار زیاد ضربات برای تکمیل یک آزمایش، برای بالا بردن وزنه‌ها تا ارتفاع لازم از موتور

الکتریکی و پیچ محاسبه و حداقل انرژی لازم برای شکست نمونه

استفاده شد. دستگاه شامل سیستم کنترل از راه دور با قابلیت تنظیم سرعت و جهت حرکت وزنه‌ها می‌باشد. همچنین برای بالا بردن ایمنی دستگاه و جلوگیری از پرتاب قطعات سنگ، جداره بیرونی دستگاه با ورقه‌های پلاستیکی پوشش

انرژی جهت خردایش ناشی از ضربه برای خوراک سنگ معدن مس با ابعاد ۱۳/۲ تا ۶۵ میلیمتر کافی می‌باشد [۲۰]. در شکل (۴) این آسیا نشان داده شده است.

جدول (۳) شرایط عملیاتی آسیای آزمایشگاهی

۱	طول (m)	
۰/۵	قطر (m)	
۳/۳	سرعت ( $\text{rads}^{-1}$ )	آسیا
۷۵٪ سرعت بحرانی	سرعت ( $N_c$ )	
۱۵	تعداد	
۰/۰۵	ارتفاع (m)	
۳۰	زاویه پیشانی ( $^\circ$ )	لاینر (بالابر)
دوزنقه	شکل	
۰/۰۳ و ۰/۰۲۵	قطر گلوله (m)	
۷۸۰۰	چگالی گلوله ( $\text{kgm}^{-3}$ )	
۲۵٪	حجم شارژ (J)	
سنگ معدن مس	ماده	
۲۹۰۰-۲۷۸۰	چگالی سنگ ( $\text{kgm}^{-3}$ )	خوراک
۱۳/۲-۶۵	اندازه (mm)	
۷۵	مقدار (kg)	
۲۰-۱۵-۱۰	زمان کارکرد (دقیقه)	

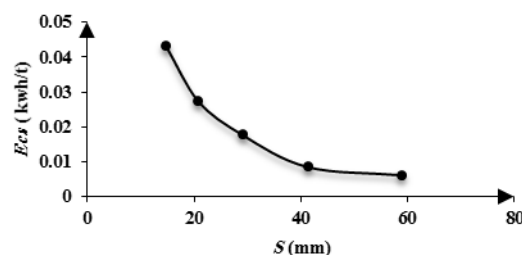
## ۶- بررسی اثر زمان کارکرد آسیا بر دانه بندی محصول ابعاد آسیای

به منظور بررسی اثر زمان کارکرد آسیا بر دانه بندی محصول و پیدا کردن رابطه بین انرژی مخصوص شکست ذرات و زمان کارکرد آسیای آزمایشگاهی، با استفاده از روابط سینماتیکی مربوط به حرکت ذرات درون آسیا [۲۱]، مقدار ۷۵ کیلوگرم خوراک از محدوده اندازه‌های ۱۳/۲ تا ۶۵ میلیمتر به همراه گلوله‌های ۶۰ و ۳۰ میلیمتر (مجموعاً ۲۵ درصد پرشدگی آسیا) درون آسیا ریخته شده و آسیا با ۷۵ درصد سرعت بحرانی به مدت ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ و ۲۵ دقیقه دوران می‌کند. در پایان هر مرحله زمانی، محصول آسیا با سرندهای استاندارد ۰/۸۵ میلیمتر تا ۶۰ میلیمتر الک شده و درصد تجمعی عبوری از این سرندها بدست آمده و نتایج حاصل با نتایج آزمون‌های موجود مقایسه شده است.

متوسط ذرات خرد شده با استفاده از رابطه (۱) حداقل انرژی لازم برای شکست نمونه محاسبه شده است. در شکل (۳) حداقل انرژی مخصوص محاسبه شده بر حسب کیلو وات ساعت بر تن برای اندازه‌های مختلف ذرات نشان داده شده است.

جدول (۲) ضرایب A و b برای هفت نمونه

نمونه	b	A	A×b
نمونه ۱	۱/۹۹	۲۹/۹۲	۵۹/۵۷
نمونه ۲	۱/۲۴	۳۵/۸۴	۴۳/۳۶
نمونه ۳	۱/۷۵	۳۹/۲۶	۶۸/۷۰
نمونه ۴	۱/۶۴	۲۸/۵۰	۲۸/۵۰
نمونه ۵	۱/۸۱	۲۶/۳۵	۴۶/۷۴
نمونه ۶	۲/۷۳	۲۳/۲۷	۶۳/۵۲
نمونه ۷	۱/۴۹	۲۶/۶۰	۳۹/۶۳



شکل (۳) حداقل انرژی ویژه لازم برای آزمون بار افتان

با توجه به شکل (۳) با افزایش اندازه نمونه حداقل انرژی لازم برای شکستن نمونه کاهش می‌یابد.

## ۵- طراحی و ساخت آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی

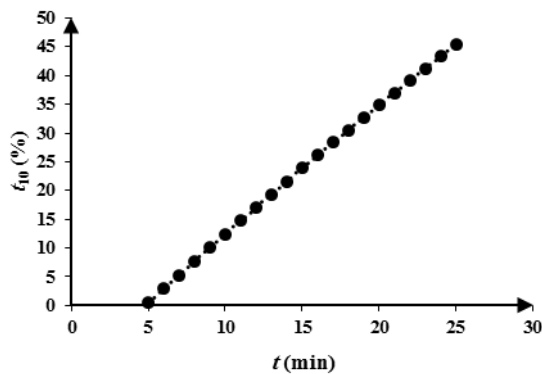
ابعاد آسیای آزمایشگاهی با استفاده از معادلات حاکم بر حرکت محتویات آسیا و به کمک پارامترهای بی بعد جهت بررسی متغیرهای مختلف بر روی قابلیت خردایش خوراک طراحی و ساخته شده است. شرایط عملیاتی آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی در جدول (۳) نشان داده شده است. ماکزیمم سرعتی که یک ذره در هنگام سقوط بر پاشنه بار در آسیای به قطر یک متر به آن می‌رسد، تقریباً ۴ متر بر ثانیه است [۱۹]. در این هنگام یک گلوله به قطر ۶۰ میلیمتر و جرم ۸۸۰ گرم، انرژی تقریبی ۷ ژول دارد. این

## ۷- نتایج و بحث

یکی از پارامترهایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت اثر زمان کارکرد آسیا بر اندازه ذرات محصول آسیا بود. در ادامه به بررسی اثر پارامترهای دیگر بر انرژی و دانه بندی پرداخته شده است. از آنجا که نحوه برخورد گلوله به سنگ معدن درون آسیا با شرایط برخورد در آزمون بار افتان گلوله ای یکسان است از روابط آزمون بار افتان برای مقایسه دانه بندی و انرژی استفاده شده است [۲۲].

### ۷-۱- بررسی رابطه اندیس خردایش و زمان کارکرد آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی

به منظور بررسی رابطه اندیس خردایش با زمان کارکرد آسیا، بعد از کارکرد آسیا به مدت ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ و ۲۵ دقیقه در پایان هر محدوده زمانی، با آنالیز سرنندی محصول مقادیر اندیس خردایش بدست آمد. در شکل (۷) تغییرات اندیس خردایش نسبت به زمان کارکرد آسیا نشان داده شده است.



شکل (۷) تغییرات اندیس خردایش نسبت به زمان کارکرد آسیا نشان می دهد با افزایش زمان کارکرد آسیا به دلیل یکنواخت شدن اندازه ذرات، اندیس خردایش افزایش یافته و محصول ریزتر می شود. همچنین تغییرات اندیس خردایش نسبت به زمان به صورتی خطی ( $R^2=1$ ) است.

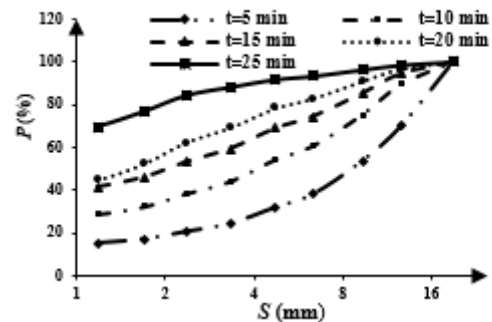
### ۷-۲- بررسی رابطه انرژی و زمان کارکرد آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی

یکی از پارامترهای موثر در بهینه سازی انرژی مصرفی آسیا، تخمین مناسب انرژی شکست مخصوص خوراک است. به منظور بررسی رابطه انرژی لازم و زمان کارکرد آسیا، با

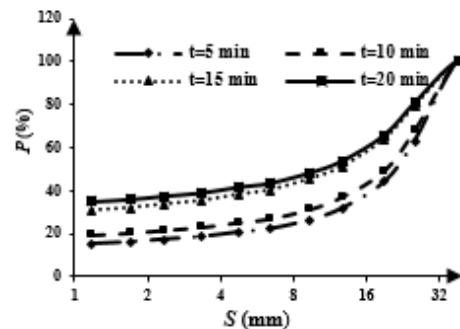
نتایج دانه بندی محصول آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی در شکل های (۵) و (۶) نشان داده شده است.



شکل (۴) آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی استفاده شده



شکل (۵) درصد تجمعی عبوری برای زمان های مختلف کارکرد آسیا برای ذرات با اندازه اولیه کوچک



شکل (۶) درصد تجمعی عبوری برای زمان های مختلف کارکرد آسیا برای ذرات با اندازه اولیه بزرگ

شکل های (۵) و (۶) نشان می دهد با افزایش زمان کارکرد آسیا دانه بندی محصول آسیا ریزتر شده است. برای محدوده اندازه ای کوچکتر در بازه های زمانی مختلف تغییر دانه بندی به دلیل ریز بودن خوراک اولیه زیاد است اما برای محدوده اندازه ای بزرگتر در بازه های زمانی ۵ تا ۱۵ دقیقه به دلیل وجود ذرات با لبه های تیز سرعت تغییر دانه بندی بیشتر بوده و با گذشت زمان به دلیل یکنواخت شدن ذرات تغییرات دانه بندی نسبت به زمان کاهش می یابد.

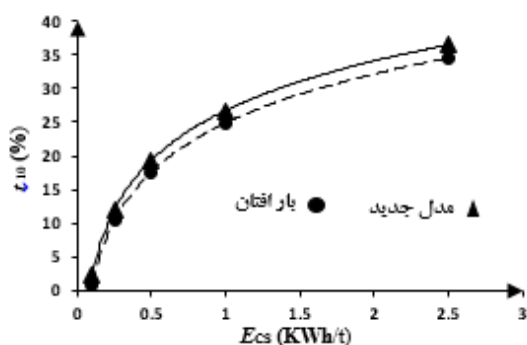


### ۷-۳- معرفی آزمون آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی جدید

بعد از محاسبه رابطه زمان کارکرد آسیای آزمایشگاهی و انرژی شکست مخصوص ذرات خوراک می‌توان روش انجام آزمون جدید را بیان نمود. مقدار ۷۵ کیلوگرم خوراک از محدوده اندازه‌ای ۱۳/۲ تا ۶۵ میلیمتر به همراه گلوله‌های ۶۰ و ۳۰ میلیمتر (مجموعاً ۲۵ درصد پرشدگی آسیا) درون آسیای با مشخصات جدول (۳) ریخته و آسیا با ۷۵ درصد سرعت بحرانی به مدت ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ دقیقه دوران می‌کند. در پایان هر مرحله زمانی، محصول آسیا دانه‌بندی شده و مقدار اندیس خردایش بدست می‌آید. با داشتن مقادیر اندیس خردایش و سطوح انرژی و استفاده از رابطه (۲) به روش حداقل مربعات خطا ضرایب A و b بدست می‌آید.

### ۷-۴- ارزیابی نتایج آزمون آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی جدید با بار افتان

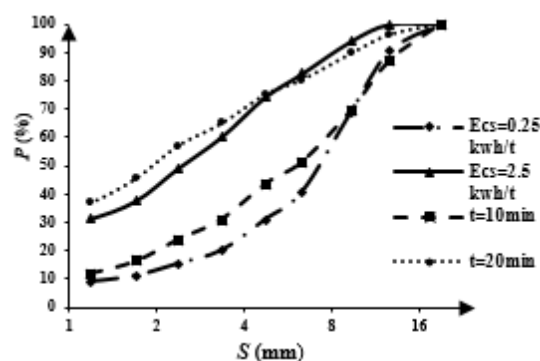
به منظور ارزیابی صحت نتایج آزمون آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی جدید، از آزمون بار افتان استفاده شده است. در شکل (۱۰) اندیس خردایش حاصل از دو آزمون بار افتان و آزمون جدید پیشنهادی با هم مقایسه شده است.



شکل (۱۰) مقایسه اندیس خردایش آزمون جدید و بار افتان گلوله‌ای

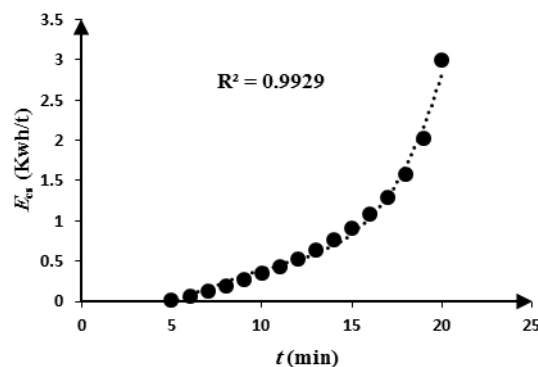
شکل (۱۰) نشان می‌دهد که اندیس خردایش آزمون جدید همخوانی خوبی با نتایج آزمون بار افتان دارد. در شکل

داشتن رابطه اندیس خردایش و زمان کارکرد آسیا (شکل (۷)) و استفاده از رابطه (۱) می‌توان رابطه انرژی و زمان کارکرد آسیا را محاسبه نمود. در شکل (۸) نتایج دانه‌بندی آزمون بار افتان و آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی برای محدوده‌های اندازه‌ای مختلف در سطوح انرژی مخصوص پایین (۰/۲۵ کیلو وات ساعت بر تن) و بالا (۲/۵ کیلو وات ساعت) و زمانهای ۱۰ و ۲۰ دقیقه با هم مقایسه شده است.



شکل (۸) مقایسه درصد تجمعی عبوری برای سطوح انرژی و زمانهای مختلف کارکرد آسیا

شکل (۸) نشان می‌دهد زمان کارکرد ۱۰ و ۲۰ دقیقه آسیای آزمایشگاهی به ترتیب معادل سطح انرژی ۰/۲۵ و ۲/۵ کیلو وات ساعت بر تن است. در شکل (۹) رابطه انرژی ویژه آسیا و زمان کارکرد آسیا نشان داده شده است.



شکل (۹) رابطه انرژی ویژه و زمانهای مختلف کارکرد آسیا

شکل (۹) نشان می‌دهد با افزایش زمان کارکرد به دلیل تولید ذرات با اندازه کوچکتر بیشتر، انرژی لازم در واحد حجم ذرات برای شکستن ذرات باقی مانده افزایش می‌یابد و در نتیجه انرژی ویژه آسیا با شدت بیشتری افزایش می‌یابد.



جدول ۳ با دقت خوبی می‌توان انرژی و قابلیت خردایش خوراک و دانه بندی محصول را تخمین زد.

### ۹- فهرست علائم

$E_{CS}$	انرژی ویژه (kwh/t)
$M_d$	جرم بار افتان (kg)
$m$	جرم متوسط ذرات (g)
$h_i$	ارتفاع اولیه سقوط بار افتان (cm)
$h_f$	ضخامت مواد باقیمانده (cm)
$t_{10}$	اندیس خردشدگی (%)
$A \times b$	مرتبط با شکست نمونه در اثر ضربه
$S$	اندازه ذرات (mm)
$P$	درصد تجمعی عبوری (%)
$t$	زمان کارکرد آسیا (min)

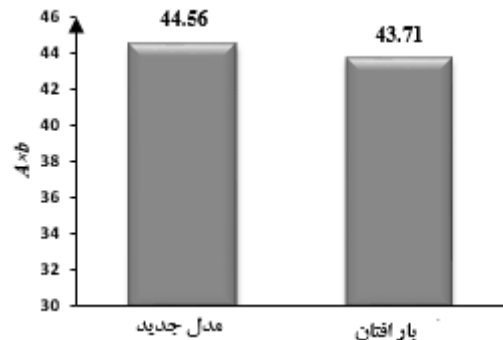
### ۱۰- تشکر و قدردانی

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.

### مراجع:

- [1] Bond F. C., Crushing and grinding calculations. *Br. Chem. Eng.* vol. 6, 1961, pp. 378-385.
- [2] Amelunxen P., Berrios P., Rodriguez E., The SAG grindability index test. *Miner. Eng.* vol. 55, 2014, pp. 42-51.
- [3] Bourgeois F. S., Banini G. A., A portable load cell for in-situ ore impact breakage testing. *Int. J. Miner. Process.* vol. 65, 2012, pp. 31-54.
- [4] Abel F., Rosenkranz F. J., Kuyumcu H. Z., *Stamped coal cakes in coke making technology Part 1— A parameter study on stampability.* Iron Mak. Steelmak, vol. 65, 2009, pp. 321-326.
- [5] Dobby G., Bennett C., Kosick G. *Advances in SAG Circuit Design and Simulation Applied to the Mine Block Model.* In Proceedings of the International Conference on Autogenous and Semi-Autogenous Grinding Technology, vol. 4, 2001, pp. 221-234.

(۱۱) مقدار ضریب  $A \times b$  آزمون جدید با آزمون بار افتان مقایسه شده است.



شکل (۱۱) مقایسه ضریب  $A \times b$  آزمون جدید با آزمون بار افتان

شکل (۱۱) نشان می‌دهد مقدار  $A \times b$  بدست آمده از آزمون بار افتان و مدل جدید به ترتیب ۴۳/۷۱ و ۴۴/۵۶ است و در نتیجه تفاوت عدد سختی مدل جدید و بار افتان ۱/۹ درصد است، که نشان دهنده صحت و دقت مدل پیشنهادی جدید است. در نتیجه می‌توان با استفاده از آزمون آسیای نیمه‌خودشکن آزمایشگاهی معرفی شده دانه‌بندی و قابلیت خردایش آسیای نیمه‌خودشکن را با دقت و سرعت بالایی تخمین زد.

### ۸- نتیجه‌گیری

- با افزایش اندازه ذرات، انرژی مخصوص لازم برای شکست آنها کاهش می‌یابد.
- با افزایش زمان کارکرد آسیا دانه‌بندی محصول ریزتر شده و این کاهش اندازه برای محدوده اندازه کوچکتر با سرعت بیشتری است.
- چگونگی تغییرات زمان کارکرد آسیا و دانه‌بندی محصول و انرژی مخصوص ذرات خوراک مورد بررسی قرار گرفت.
- زمان کارکرد ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ دقیقه آسیای معرفی شده به ترتیب معادل سطوح انرژی ۰/۲۵ و ۱ و ۲/۵ کیلو وات ساعت بر تن است.
- با استفاده از آزمون آسیای نیمه‌خودشکن آزمایشگاهی جدید با انتخاب شرایط عملیاتی

- investigation of the effects of operating parameters on the wear of lifters in tumbling mills, *Minerals Engineering*, vol. 23, 2010, pp. 558-562.
- [20] Tavares, L. M., Carvalho R., Guerrero J. C., Simulating the Bond rod mill grindability test. *Miner. Eng.* vol. 26, 2012, pp. 99-101.
- [21] Razani M., Masomi M., Rezaeizadeh M., *Investigation wear lifter impacts on SAG mill grindability using experimental and numerical methods*. International Conference on research in science and technology, Malaysia, 2015.
- [22] Tavares L.M., Carvalho R., Impact work index prediction from continuum damage model of particle fracture. *Miner. Eng.* vol. 20, 2007, pp. 1368-1375.
- [6] Bennett C., Dobby G. S., Kosick G., *The keys to effective production forecasting and SAG circuit optimization*, In Proceedings of the International Conference on Autogenous and Semi-Autogenous Grinding Technology, vol. 1, 2001, pp. 289-300, 2001.
- [7] Kosick G., Dobby G., Bennett C., *CEET (Comminution Economic Evaluation Tool) for Comminution Circuit Design and Production Planning*. In Proceedings of 2001 SME Annual Meeting, Denver, CO, USA, 2001, pp. 26-28.
- [8] Morrison R. D., Using DEM to model ore breakage within a pilot scale SAG mill, *Minerals Engineering*, vol. 17, 2004, pp. 1117-1124.
- [9] Morrell S., Predicting the overall specific energy requirement of crushing, high pressure grinding roll and tumbling mill circuits, *Minerals Engineering*, vol. 22, 2009, pp. 544-549.
- [10] Matthew D., Sinnott D., Is media shape important for grinding performance in stirred mills? *Minerals Engineering*, vol. 24, 2010, pp. 138-151.
- [11] Powell M. S., Cleary W., Understanding fine ore breakage in a laboratory scale ball mill using DEM, *Minerals Engineering*, vol. 24, 2011, pp. 352-366.
- [12] Morrell S., Predicting the specific energy of autogenous and semi- autogenous mills from small diameter drill core samples, *Minerals Engineering*, vol. 17, 2003, pp. 447-451.
- [13] Shi F., Comparison of grinding media – Cylpebs Versus Balls. *Minerals Engineering*, vol. 17, 2004, pp. 1259-1268.
- [14] Tavares L. M., Analysis of particle fracture by repeated stressing as damage accumulation. *Powder Technology*, vol. 190, 2009, pp. 327-339.
- [15] Khumalo N., Glasser D., Hildebrandt D., Hausberger B., Kauchali S., The application of the attainable region analysis to comminution. *Chemical Engineering Science*, vol. 61, 2006, pp. 5969-5980.
- [16] Barrios G., Carvalho R., Tavares L. M., Modeling breakage of monodispersed particles in unconfined beds. *Minerals Engineering*, vol. 24, 2011, pp. 308-318.
- [17] Genc O., Ergun S. L., Benzer A. H., Analysis of single particle impact breakage characteristics of raw and HPGR-crushed cement clinkers by drop weight testing. *Powder Technology*, vol. 25, 2014, pp. 37-45.
- [18] Napier-Munn T. J., Morrell S., Morrison R. D., Kojovic T., *Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimisation*, JKMCRC Monograph Series, 1996.
- [19] Rezaeizadeh M., Fooladi M M. Powell M. S., Weerasekara N. S., An experimental