



# بررسی سایش گلوله و ارائه معیاری برای تشخیص گلوله‌های نامطلوب آسیای گلوله‌ای شماره دو مجتمع سنگ آهن سراب بیجار

شیرکو شرفی

سرپرست تولید و سرپرست تحقیق و توسعه مجتمع صنعتی و معدنی سراب بیجار

بهروز حبیبی

سرپرست مکانیک و دفتر فنی مجتمع صنعتی و معدنی سراب بیجار

## چکیده

در عملیات فرآوری مواد معدنی خردایش مواد پرهزینه‌ترین مرحله می‌باشد. که معمولاً بیش از 75 درصد کل هزینه‌های خردایش را به خود اختصاص می‌دهد. در صنعت فرآوری، آسیای گلوله‌ای از مرسوم‌ترین تجهیزات جهت خردایش مواد می‌باشد. واسطه خردایش در این آسیاها گلوله فولادی بوده که طی مکانیزم‌های مصرفی گلوله (ضربه، سایش، خوردگی) دچار فرسایش شده و مستهلک می‌شوند. به دلیل تاثیر گذاری مستقیم گلوله بر عملیات آسیاکنی و سوددهی یا زیان کارخانه، سایش گلوله می‌تواند مقدار قابل توجهی از این هزینه‌ها را کم کند. گلوله‌های شکسته شده و یا گلوله‌های دارای خواص نامناسب می‌توانند کیفیت محصول آسیا را پایین آورده و باعث بالا رفتن هزینه‌ها در عملیات آسیاکنی شوند. برای بررسی سایش گلوله‌های آسیای گلوله‌ای شماره 2 مجتمع صنعتی و معدنی سراب بیجار نمونه‌ای به وزن 371/61 کیلوگرم از نقاط مختلف آسیا در کارخانه فاز یک گرفته شد. با اینکه مقدار نمونه بطور نسبی کم بود، ولی نتایج جالبی بدست آمد. مشاهده گردید که نوسان شدید سختی گلوله از سطح به عمق، وجود حفره‌ها در گلوله‌ها و سختی متفاوت نواحی سطحی در یک گلوله باعث تشدید مصرف گلوله می‌شود. میزان سایش گلوله آسیای شماره دو فاز یک در مدت 4 ماه کار به مقدار 791/5 گرم بر تن بدست آمد. بعد از بررسی تک به تک گلوله‌های نمونه‌گیری شده چنین نتیجه‌ای حاصل شد که بر اساس قطرهای گلوله می‌توان معیاری برای شناسایی گلوله‌های نامطلوب از گلوله‌های سالم بدست آورد. لذا رابطه‌ای بر اساس قطرهای گلوله در سه جهت ارائه شد. با بکارگیری این رابطه برای تعداد قابل توجهی از گلوله‌های نمونه مشاهده شد که مقدار این معیار برای گلوله‌های سالم در دامنه  $0/985 - 1/00$  و برای گلوله‌های شکسته شده در دامنه زیر  $0/50 - 0/78$  می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** آسیای گلوله‌ای، سایش گلوله، مجتمع صنعتی و معدنی سراب بیجار



## 1-مقدمه

در صنعت فرآوری آسیاهای گلوله‌ای از مرسوم‌ترین تجهیزات جهت خردایش مواد می‌باشد. کارخانجات فراوری سهم 6-7٪ از کل انرژی دنیا را داشته و 40-50٪ از انرژی کارخانه‌های فرآوری صرف خردایش می‌شود. در آسیا کنی 85٪ درصد انرژی تبدیل به گرما، 12٪ واکنش شیمیایی، 2٪ صدا و 1٪ صرف نرم‌کنی می‌شود که بخش کوچکی از انرژی صرف شده است (Manouchehri H. R, 2014). به صورت تخمینی 50 درصد از هزینه‌های فرایند خردایش مربوط به فرسایش استر و بار خردکننده و 50 درصد بقیه از آن انرژی است (Radziszewski .P, 2000) در آسیاهای گلوله‌ای به دلیل استفاده از گلوله فولادی و اشغال کردن بخش زیادی از حجم آسیا با گلوله جهت خردایش مواد آسیا، قسمت اعظمی از هزینه‌های آسیاکنی را به خود اختصاص می‌دهد. واسطه خردایش در این آسیاها گلوله فولادی بوده که طی چرخش آسیا انرژی حاصل شده از بالابری بار داخل آسیا با آسترهای تعبیه شده، توسط گلوله به مواد معدنی انتقال پیدا می‌کند. طی آسیا کنی مواد و شرایط محیطی آسیا گلوله دچار افت وزنی می‌شود. این افت وزنی به دلیل مکانیزم‌های مصرف گلوله به سه دسته کلی ضربه، سایش و خوردگی تقسیم بندی می‌شوند (Morrell, S, 1990).

سه عامل مهم برای سایش گلوله‌ها در آسیاهای گردان تاثیر دارند. ساییدگی سایشی (Abrasion wear)، که در نتیجه اختلاف بین سختی بار خردکننده و ماده معدنی در پالپ به وجود می‌آید. البته خصوصیات شکاف برداری ماده معدنی و مورفولوژی ذرات نیز در ساییدگی ماده معدنی تاثیر دارند. همچنین ساییدگی سایشی متناسب با درصد مواد جامد در پالپ می‌باشد، بطوریکه با افزایش دانسیته پالپ، نیروهای جانبی (Fractional) به روی سطح گلوله‌ها تمرکز یافته و ذرات ماده معدنی بطور یکنواخت و با آهنگ افزایشی خراشیده می‌شوند (افضلی نینز و بنیسی، 1383).

ساییدگی فرسایشی (Corrosive) نیز ترکیبی از برهمکنش ماده معدنی و گلوله‌ها در پالپ می‌باشد که در اثر ترکیبی از اثرات الکتروشیمیایی و شیمیایی بوجود می‌آید (افضلی نینز و بنیسی، 1383).

سایش در اثر ضربه به صورت‌های مختلفی نمود پیدا می‌کند که از آن جمله می‌توان به تغییر شکل، ترک خوردگی و پوسته پوسته شدن اشاره کرد که به تنهایی و یا بصورت ترکیبی ظاهر می‌شوند. ابعاد آسیا، درصد حجمی بارگیری گلوله و ماده معدنی، سرعت دوران، شکل آسترها و وزن گلوله از عواملی هستند که بر سایش ضربه‌ای تاثیر دارند (افضلی نینز و بنیسی، 1383).

گلوله‌های رول فورج با سایزهای کمتر از 60 میلی‌متر در آسیا گلوله‌ای برای خردایش بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این آسیا گلوله‌های رول فورج علاوه بر ضربه، تحت سایش قرار می‌گیرند و مکانیزم غالب خردایش سایش می‌باشد. در پژوهش‌های انجام شده عیوب ظاهری مانند دم‌دار شدن، شیار حلقه خالی در سطح گلوله، بیضی شدن و ترک در ناحیه مرکزی مشاهده شد که وجود این عیوب به دلیل تنظیم نبودن پارامترهای تولید مانند قطر اولیه میلگرد و دمای اولیه میلگرد گزارش شده است (F. Process, 218). عمده عیوب مشاهده شده در گلوله‌های رول فورج، پوسته شدن سطح گلوله‌ها می‌باشد که دلیل آن تنش‌های ناشی از فرایند تولید و تشکیل درصد بالایی فاز مارتنزیت می‌باشد که در نهایت باعث پوسته شدن گلوله نیز می‌شود.



## 2- ضرورت انجام تحقیق

در آسیاهای گلوله‌ای نقش اصلی خردایش مواد بر عهده واسطه خردایش یا گلوله فولادی می‌باشد. تخریب گلوله‌های آسیا یکی از موارد پرهزینه در فرآیند خردایش مواد معدنی است که سالیانه به دلیل تخریب زود هنگام هزینه‌های زیادی را بر مجتمع صنعتی و معدنی سراب تحمیل می‌کند از این رو بررسی علل تخریب گلوله‌ها و ارائه راهکارهای مناسب برای افزایش عمر کاری گلوله‌ها یکی از اولویت‌های فرآوری مواد معدنی است. در پژوهش حاضر علل تخریب گلوله‌های مورد استفاده در آسیاهای بالمیل ثانویه کارخانه فراوری مجتمع صنعتی و معدنی سراب مورد بررسی قرار گرفته است. و معیاری برای تشخیص گلوله‌های نامطلوب ارائه گردید.

## 3- یافته ها

در مورخه 1 فروردین 1402 حجم پرشدگی گلوله در آسیای گلوله‌ای فاز دو انجام گرفت. طبق محاسبات انجام شده مقدار گلوله موجود در این آسیا 89 تن به دست آمد که طبق سوابق شارژ گلوله مقدار ساینز دانه‌بندی گلوله نیز به طور تقریبی به دست آمد. در جدول (1) مقادیر گلوله بار شده به آسیای گلوله‌ای شماره دو فاز یک کارخانه فرآوری مجتمع صنعتی و معدنی از تاریخ 1 فروردین تا 31 تیر 1402 آورده شده است.

جدول 1- مقدار شارژ گلوله آسیای شماره دو فاز یک در مدت 4 ماه

اندازه گلوله (میلی متر)	30	25	20	مجموع	درصد
مقدار اولیه گلوله (حین استارت)	38/41	40/29	10/3	89	100
مقدار گلوله شارژ شده	21	32	3	56	62/91

از جدول (1) شاید این برداشت نادرست صورت گیرد که گلوله‌های دسته 25 بیشترین تخریب را داشته‌اند. در صورتیکه گلوله‌های این دسته ضمن فرسایش به گلوله دسته 20 تبدیل شده‌اند و برای دسته دیگر نیز چنین اتفاقی افتاده است. با توجه به جدول (1) مشخص می‌شود که بعد از مدت 5 ماه کارکرد گلوله‌ها به میزان 62/91٪ از آن‌ها فرسوده شده و یا اینکه از طریق خروجی بالمیل به دلیل شکست یا بالا بودن درصد جامد خارج شده‌اند. که طی پایش صورت گرفته 9/8 تن گلوله از آسیا به دلیل شکستگی و بالا بودن درصد جامد از سرنده آسیای گلوله‌ای خارج شده است. گلوله‌های خارج شده تحت کنترل جمع‌آوری و اندازه‌گیری شد. مقدار سایش گلوله‌های آسیای گلوله‌ای فاز یک در 5 ماه چنین محاسبه گردید:

$$46/2 = 56 - 9/8 = \text{مقدار گلوله قراضه (خارج شده از آسیا)} - \text{مقدار گلوله شارژ شده} = \text{کاهش وزن گلوله‌ها}$$

شاخص مهم برای بیان سایش گلوله‌ها عبارتست از میزان کاهش وزن گلوله ( با واحد گرم) به ازای یک تن

$$\text{وزن محصول تولیدی (ton)} / \text{کاهش وزن گلوله‌ها (g)} = \text{میزان سایش (g/ton)} \quad (\text{رابطه 1})$$

با بکارگیری رابطه (1) و با داده‌های 46/2 تن کاهش وزنی گلوله‌ها و میزان محصول تولیدی 58370 تن محصول آسیای گلوله‌ای شماره دو مجتمع صنعتی و معدنی سراب بیجار مقدار سایش برای این آسیا از 1 فروردین 1402 تا 31 تیرماه 1402 به میزان 791/5 گرم بر تن اندازه‌گیری شد.

## 3-1 بررسی سایش گلوله‌های بالمیل ثانویه فاز دو شرکت کیمیا معادن سپاهان



در زمان خاموشی آسیای گلوله‌ای کارخانه فاز دو شرکت کیمیا معادن سراب بیجار برای بررسی نحوه سایش گلوله‌ها نمونه‌برداری از این آسیا انجام شد. در نمونه‌گیری انجام شده سعی شد که به طور یکنواخت در تمام نقاط آسیا، گلوله برداشته شود. سپس با استفاده از کولیس دیجیتالی توزیع دانه بندی گلوله‌های نمونه‌گیری شده اندازه‌گیری شد.



ب



الف

شکل ۱: اندازه‌گیری توزیع دانه‌بندی گلوله‌های نمونه‌گیری شده

برای اینکه محدوده قابل قبولی برای قطر هر اندازه در نظر گرفته شد، همانند جدول شماره ۲ محدوده هر اندازه بعنوان دسته معرف آن در نظر گرفته شد.

جدول ۲: نتایج تحلیل توزیع دانه‌بندی نمونه گلوله‌ها

درصد	مجموع	10-15	15-20	20-25	25-30	دسته گلوله
91/9	341/1	12	53/2	175/6	100/3	وزن گلوله‌های سالم
8/1	30/51	2/4	7/3	12/41	8/4	وزن گلوله‌های تغییر شکل داده شده
100	371/61	14/4	60/5	188/1	108/7	مجموع وزنی
	100	7/8	23/92	40/67	27/53	درصد وزنی گلوله‌های تغییر شکل داده از کل تغییر شکل داده‌ها

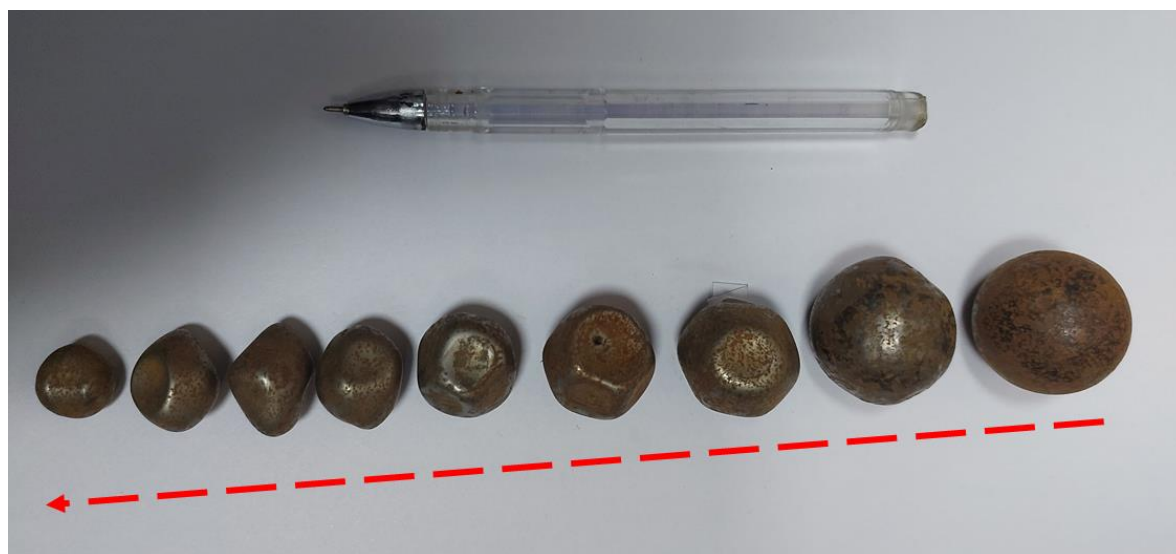
از بررسی نحوه سایش گلوله‌ها از نزدیک نتایج زیر بدست آمد:

الف: ساختارهای ریز در نحوه فرسودگی گلوله نقش بسیار مهمی دارد. در نمونه‌های شکسته شده در آسیای گلوله‌ای شماره ۲ فاز یک سنگ آهن سراب مشاهده شد که گلوله‌های شکسته غالباً دارای ناهمگنی در درون خود بوده‌اند، که همین ناهمگنی در شکسته شدن گلوله موثر واقع شده‌است. وجود فضای خالی کوچک در گلوله نوعی از این ناهمگنی می‌باشد.



شکل 1: نقش حفره دار بودن گلوله در شکستن آن

ب: گلوله های شکسته در نمونه بسیار زیاد مشاهده شد. این نشان می دهد که جنس گلوله های مصرف شده در مقابل شکست مقاومت کمی دارند. هر چه که شکست گلوله علاوه بر جنس به عواملی از جمله درصد جامد، پرشدگی و.. نیز بستگی دارد.



شکل 2: روند تغییر شکل گلوله در اثر فرسودگی

روند فرسودگی گلوله ها شکل های خاصی را طی می کنند. همانطور که در شکل 2 مشاهده می شود، ابتدا یک فرورفتگی در گلوله ایجاد می شود (شکل 3- الف)، سپس شکل گلوله بصورت نوکدار در آمده و در ادامه کار چندین فرورفتگی در گلوله ایجاد می گردد (شکل 3- ب).





ب



الف

شکل 3: الف) ایجاد یک فرورفتگی در گلوله ب) نمونه گلوله‌های تغییر شکل داده

## 2-3 ارائه معیاری برای تشخیص گلوله‌های نامطلوب

سعی شد با استفاده از یک بیان ریاضی معیاری برای یک موضوع پیدا کرد. بعد از بررسی تک به تک گلوله‌های نمونه‌گیری شده چنین نتیجه‌ای حاصل شد که بر اساس قطر های گلوله می‌توان معیار تشخیص را قرار داد.

$$Ka = \frac{(C1 * C2 * C3)^{1/3}}{C1}$$

C1، C2، C3: قطرهای بزرگ، متوسط و کوچک گلوله  
Ka: معیار شناسایی

با اندازه‌گیری قطر کوچک، قطر متوسط و قطر بزرگ گلوله و با استفاده از رابطه بالا مقدار Ka محاسبه می‌گردد. با به کارگیری رابطه بالا برای گلوله‌های نمونه‌گیری شده مشاهده شد که مقدار Ka برای گلوله‌های شکسته و غیر قابل استفاده در دامنه 0/50-0/78 بوده و برای گلوله‌های سالم در دامنه 0/985 – 1/00 است.

گلوله های سالم			
b1	b2	b3	Na
27.98	27.85	27.77	0.995
29.27	28.72	28.61	0.986
29.99	29.96	29.89	0.998
28.2	27.81	27.73	0.989
27.81	27.26	27.21	0.986
25.7	25.61	25.59	0.997
28.8	28.47	28.44	0.989
28.5	28.4	28.18	0.993
18.6	18.23	18.19	0.985
15.8	15.66	15.48	0.986



16.97	16.94	16.82	0.996
15.41	15.31	15.18	0.992
28.7	28.6	28.38	0.995
30.4	30.15	30.12	0.99
23.65	23.57	23.43	0.995
30.39	30.2	29.96	0.993
25.57	25.38	25.31	0.994
28.1	27.86	27.82	0.993
28.23	28.11	28.08	0.996
28.65	28.52	28.31	0.99
26.69	26.3	25.93	0.985

جدول 3: شماری ازداده‌های معیار اندازه‌گیری برای تشخیص سالم بودن گلوله

گلوله های نا سالم (ساییده شده)



b1	b2	b3	Na
15.23	13.05	12.88	0.896
17.66	14.88	13.93	0.870
15.72	15.48	10.04	0.855
17.92	15.97	13.75	0.879
17.04	14.67	14.32	0.895
14.56	13.26	12.34	0.915
17.25	16.43	15.09	0.938
18.53	18.51	14.17	0.912
29.6	27.8	26.47	0.940
16.22	16.2	12.55	0.915
13.37	13.3	10.75	0.926
16.35	15.88	14.8	0.955
19.14	18.9	16.33	0.942
17.19	17.11	15.59	0.964
24.25	24.14	22.61	0.972
12.31	11.39	10.42	0.920
16.79	14.63	14.2	0.901
14.58	14.12	12.43	0.936
16.87	14.49	12.35	0.854
16.87	14.49	12.35	0.854
14.36	13.98	11.99	0.931
19.19	15.86	14.14	0.848

جدول 4: شماری ازداده‌های معیار اندازه‌گیری برای تشخیص نا سالم بودن گلوله

گلوله های شکسته			
b1	b2	b3	Na





27.18	21.2	13.31	0.726
27.74	18.91	12.71	0.678
28.94	19.46	5.64	0.508
21.73	10.95	9.31	0.600
18.81	15.94	10.16	0.771
22.47	14.24	8.2	0.614
19.81	17.93	10.63	0.786
19.19	10.61	6.97	0.586
15.96	14.97	6.83	0.738
17.51	13.15	7.56	0.687
25.41	13.97	11.9	0.636
18.52	13.91	9.5	0.728

جدول 5: شماری از داده‌های معیار اندازه‌گیری برای تشخیص گلوله‌های شکسته



## نتیجه گیری:

- برای تحلیل عمل سایش گلوله‌های آسیای شماره دو فاز یک توده 371 کیلوگرمی از تمام نقاط آسیا به طور نمونه‌گیری سیستماتیکی برداشته شد و سپس جهت بررسی نحوه سایش قطر تمامی گلوله‌ها اندازه‌گیری شد.
- طی بررسی و پایش‌های صورت گرفته مشخص گردید که دلیل اصلی شکستگی گلوله وجود حفره‌های سطحی در گلوله می‌باشد.
- نتایج پایش نشان می‌دهد که از 1 فروردین 1402 تا 31 تیر 1402 با ثابت ماندن حجم پرشدگی گلوله در آسیای شماره دو فاز یک 46/2 تن گلوله در این آسیا شارژ شده است. که طبق داده‌های متالورژیکی 58370 تن کنسانتره نیز تولید شده است که طبق این نتایج به ازای هر تن کنسانتره 791/5 گرم گلوله ساییده شده است.
- با ارائه رابطه‌ای بر اساس قطر گلوله معیاری برای شناسایی گلوله‌های سالم از گلوله‌های ناسالم پیشنهاد گردید. مقدار معیار شناسایی برای گلوله‌های شکسته و غیر قابل استفاده در دامنه 0/50-0/78 بوده و برای گلوله‌های سالم در دامنه 0/985 – 1/00 است.



## منابع

1. Manouchehri H. R. (2014). "Changing the game in comminution practices: Vibrocone TM, a new Crusher having grinding performance". In XXVII IMPC, Santiago, Chile, 1-13.
2. Radziszewski P. (2000) "Developing an experimental procedure for charge media wear prediction", Miner. Eng., 13, 8-9, pp. 949-961.
3. Morrell, S., "Effect of Ball Size on Ball Mill Breakage Rates" Julius Kruttschnitt Mineral Research Center, 1990.
4. F. Process, "The Effect of Process Parameters in Helical Rolling of Balls on the Quality of Products and the", 11, 2018, 2125.

5- ع. افضلی ننیز، ص. بنیسی (1383)، "بررسی سایش گلوله و ارائه معیاری برای تشخیص گلوله‌های نامطلوب" چهارمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن



## Investigating ball wear and providing a criterion for identifying the undesirable balls of ball mill No. 2 of Sarab Bijar iron ore complex

Shirko sharafi<sup>1</sup>

Behrouz Habibi Sheikh Ahmed

Head of Research and Development of Sarab  
Industrial and Mining Complex

Mechanical supervisor of Sarab industrial and  
mining complex

### Abstract

In mineral processing operations, material crushing is the most expensive step. which usually accounts for more than 75% of the total retail costs. In the processing industry, a ball mill is one of the most common equipments for crushing materials. The medium of crushing in these mills is the steel ball, which is eroded and depreciated during the mechanisms used by the ball (impact, wear, corrosion). Due to the direct impact of the ball on milling operations and the profit or loss of the factory, ball wear can reduce a significant amount of these costs. Broken balls or balls with inappropriate properties can lower the quality of the mill product and increase costs in the milling operation. A sample weighing 371.61 kg was taken from different parts of mill in the phase one factory to check the wear of mill balls number 2 of Sarab Bijar industrial and mining complex. Although the sample amount was relatively small, interesting results were obtained. It was observed that the extreme fluctuation of the hardness of the bullet from the surface to the depth, the existence of holes in the balls and the different hardness of the surface areas in a bullet aggravate the consumption of balls. The amount of wear of Asia No. 2 phase one bullet during 4 months of work was found to be 791.5 grams per ton. After examining the sampled balls one by one, such a result was obtained that based on the diameters of the balls, a criterion can be obtained to identify undesirable balls from healthy balls. Therefore, a relationship based on ball diameters in three directions was presented. Therefore, a relationship based on ball diameters in three directions was presented. By using this relationship for a significant number of sample bullets, it was observed that the value of this criterion for healthy balls is in the range of 0.00-0.985 and for broken balls in the range of 0.78-0.50.

**Keywords:** ball mill, ball wear, Sarab Bijar industrial and mining complex