

## مدلسازی توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن کارخانه پرعیارکنی ۲ مجتمع مس سرچشمه با استفاده از روش SPI

محمد جهانی<sup>۱</sup>، محمد نوع پرست<sup>۲\*</sup>، اکبر فرزنانگان<sup>۳</sup>، غلامرضا لنگری زاده<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. ([m.jahani1983@gmail.com](mailto:m.jahani1983@gmail.com))

۲. استاد، دانشکده مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. ([noparast@ut.ac.ir](mailto:noparast@ut.ac.ir))

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۴. کارشناس ارشد، شرکت صنایع ملی مس ایران (NICICO)، کرمان، ایران.

### چکیده

با توجه به توان‌کشی بالای آسیاهای نیمه‌خودشکن، پیش‌بینی توان مصرفی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در حال حاضر روش جامع و کاملی برای محاسبه توان مصرفی آسیاهای نیمه‌خودشکن وجود ندارد. با وجود این تلاش‌های گوناگونی برای یافتن مدلی مناسب جهت پیش‌بینی توان مصرفی آن‌ها توسط استارکی انجام شده است. لذا هدف از انجام این تحقیق یافتن مدلی مناسب و جامع جهت پیش‌بینی توان مصرفی آسیاهای نیمه‌خودشکن است. در این پژوهش با استفاده از نتایج حاصل از هشت عملیات نمونه‌گیری از مدار آسیای نیمه‌خودشکن و نیز استفاده از روش SPI، مدلی تجربی برای پیش‌بینی توان مصرفی آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع مس سرچشمه ارائه شد. به منظور اعتبارسنجی این مدل، سه عملیات نمونه‌گیری از کل مدار خردایش در زمان‌های گوناگون و در شرایط عملیاتی متفاوت انجام شد. نتایج نشان داد که مدل ارائه شده به بهترین نحو قادر به پیش‌بینی توان مصرفی آسیای نیمه‌خودشکن سرچشمه است ( $\bar{X} = 1/90\%$  و  $S = 9/40\%$ ).

### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۱ خرداد ۹۱

دریافت پس از اصلاح: ۴ مهر ۹۱

پذیرش نهایی: ۱۷ مهر ۹۱

کلمات کلیدی:

مدلسازی

مصرف توان

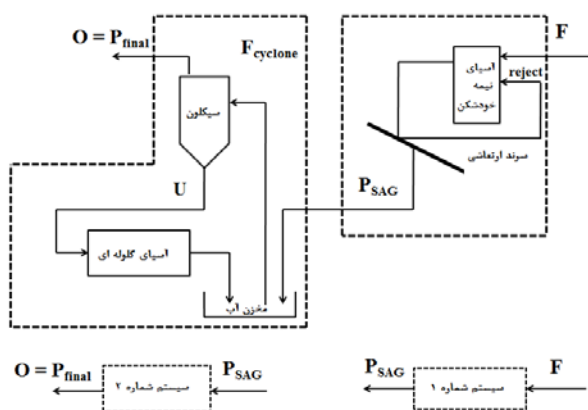
آسیای نیمه‌خودشکن

آزمایش SPI

مجتمع مس سرچشمه

## ۱- مقدمه

۵ میلی متر (ریجکت یا روسرندی) از آن، می توان نمونه زیرسرندی را با خطای حدود ۰/۱ درصد به دست آورد.



شکل (۱) سیستم های شماره یک و دو مدار خردایش کارخانه پرعیارکنی ۲ مجتمع مس سرچشمه

در سال های اخیر تحقیقاتی به منظور مطالعه مشکلات موجود در کارخانه پرعیارکنی ۲ مجتمع مس سرچشمه و بهبود عملکرد آن انجام گرفته است [۵، ۶ و ۸]. در یکی از این تحقیقات طراحی و ساخت نمونه گیر آسیای نیمه خودشکن و آماده سازی محل های نمونه گیری، طراحی و ساخت یک آسیای آزمایشگاهی برای تعیین اندیس توان آسیای نیمه خودشکن (SPI)، و نیز ارائه فرمولی جهت پیش بینی توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن انجام شده است [۵]. فرمول معرفی شده به صورت معادله ۱ است [۵]:

$$P = 0.55(SPI)^{0.01} - 7.36(K_{80})^{0.01} + 0.69\left(\frac{H}{1000}\right) + 2.81\left(\frac{p}{1000}\right) \quad (1)$$

که در آن، P توان مصرفی ویژه آسیای نیمه خودشکن (kWh/t)، SPI اندیس توان آسیای نیمه خودشکن (min)،  $K_{80}$  اندازه محصول نهایی آسیای نیمه خودشکن (زیرسرندی) ( $\mu\text{m}$ )، H مدت زمان کارکرد آسترهای جداره (hours)، و p فشار ترانسیون سر آزاد آسیای نیمه خودشکن (kPa) است. معادله ۱ دارای این نقص است که با تغییر عدد SPI از ۱۰۰ تا ۲۰۰ دقیقه (که به ترتیب معرف کانسنگ های بسیار نرم و بسیار سخت می باشد)، میزان توان پیش بینی شده ۰/۰۰۴ کیلو وات ساعت بر تن تغییر می کند که مقدار بیش از حد کوچکی است. به عبارت دیگر، نقش SPI در مقایسه با سه پارامتر دیگر موجود در فرمول بسیار ناچیز است: هنگامیکه  $SPI = 100$ ,  $0.55(SPI)^{0.01} = 0.5759$  kWh/t و هنگامیکه  $SPI = 200$ ,  $0.55(SPI)^{0.01} = 0.5799$  kWh/t. همچنین در

در کارخانه های فرآوری مواد معدنی مدارهای خردایش بیشترین سهم را در مصرف توان دارند. با این وجود در اکثر موارد به سبب پیچیدگی ذاتی عملیات، تعدد عوامل درگیر و طراحی اولیه نامناسب، کارایی مدارهای خردایش کمتر از میزان مورد انتظار است. بنابراین تعیین سهم هر یک از بخش های مدار در مصرف توان (برای تولید محصول مناسب) به بهینه سازی روند عملکرد مدار کمک می کند [۱، ۲]. همچنین با توجه به اینکه بخش عمده توان در کارخانه های فرآوری مواد معدنی در بخش آسیاکنی مصرف می شود، همواره با ارائه روش ها و تجهیزات جدید مانند استفاده از آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن برای کاهش توان مصرفی در این بخش تلاش شده است. آسیاهای نیمه خودشکن معمولاً به عنوان یک گام خردایش بویژه برای کانی های مس مورد استفاده قرار می گیرند، درحالی که آن ها سبب افزایش ظرفیت آسیا و کاهش هزینه های عملیاتی و سرمایه ای می شوند [۳، ۴].

به منظور بررسی عملکرد یک سیستم دو روش وجود دارد. روش اول بررسی عملکرد تک تک اجزای سیستم و سرانجام نتیجه گیری در جهت عملکرد سیستم است. روش دوم، که روش جعبه سیاه نیز نامیده می شود، در نظر گرفتن کل سیستم به عنوان یک بخش با ورودی ها و خروجی های مجزا، و بررسی عملکرد این سیستم و مقایسه آن با اهداف طراحی سیستم است. در این پژوهش روش جعبه سیاه جهت تعیین کارایی مدار خردایش کارخانه پرعیارکنی ۲ مجتمع مس سرچشمه مورد استفاده قرار گرفت. در مدار خردایش کارخانه مذکور، دو سیستم مجزا با ورودی ها و خروجی های متمایز قابل تعریف هستند. آسیای نیمه خودشکن و سرندهای ارتعاشی را می توان به عنوان سیستمی (سیستم ۱) در نظر گرفت، که ورودی آن خوراک آسیای نیمه خودشکن و خروجی آن مواد عبورکننده از سرندهای ارتعاشی (زیرسرندی) می باشد (شکل ۱). از سوی دیگر آسیای گلوله ای اولیه و هیدروسیکلون های اولیه را می توان به عنوان سیستمی (سیستم ۲) در نظر گرفت که ورودی آن جریان زیرسرندی و خروجی آن سرریز سیکلون (خوراک رافر) است (شکل ۱). مشکلی که وجود دارد آن است که نمونه گیری از جریان زیرسرندی در این کارخانه غیر ممکن است. اما با توجه به مطالعات پیشین [۵ - ۷]، به سبب کارایی بالای سرندهای ارتعاشی (۹۹/۸۹)، با نمونه گیری از جریان خروجی آسیای نیمه خودشکن (خوراک سرند) و جدا کردن ذرات درشت تر از

ابعاد ۸۰ درصد عبوری از سرند ۱۹ میلی متری برسد. سرانجام از محصول آسیای نیمه خودشکن برای آزمایش اندیس کار آسیای گلوله‌ای استاندارد باند استفاده می‌شود [۱۳ و ۱۴]. معادله کالیبره شده برای آزمایش SAGDesign به صورت معادله ۴ است [۱۳]:

$$\left(\frac{\text{kWh}}{t}\right) = \text{Revs} \times \frac{(g+16000)}{447.3 \times g} \quad (4)$$

که در آن، Revs تعداد دور آسیا برای آسیا کردن کانسنگ تا ابعاد ۸۰ درصد ریزتر از ۱/۷ میلی متر، g وزن کانسنگ مورد آزمایش (گرم)، ۱۶۰۰۰ وزن گلوله‌های فولادی (گرم)، و ۴۴۷/۳ ضریب محاسبه شده از آزمایش‌های تجربی است.

با توجه به توان کشی بالا در آسیاهای نیمه خودشکن (۱۰-۵ مگاوات)، بهینه سازی توان مصرفی آن‌ها و نیز یافتن مدل جدیدی برای محاسبه و پیش‌بینی توان مصرفی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از یک سو، با توجه به تفاوت‌های موجود بین مکانیزم‌های خردایش در آسیاهای نیمه خودشکن و گلوله‌ای، روش آزمایش اندیس کار استاندارد باند برای آسیاهای گلوله‌ای نمی‌تواند برای محاسبه میزان مصرف توان در آسیاهای نیمه خودشکن مورد استفاده واقع شود. از سوی دیگر، فرمول استارکی (معادله ۳) تنها در موارد خاص معتبر است. بنابراین امروزه یافتن مدل جدیدی برای محاسبه مصرف توان آسیای نیمه خودشکن در کانون توجه بسیاری از دانشمندان قرار گرفته است. از این رو، هدف اصلی از انجام این تحقیق یافتن مدلی تجربی (با استفاده از پارامترهای عملیاتی مربوط به توابع شکست و انتخاب) جهت پیش‌بینی مصرف توان آسیاهای نیمه خودشکن می‌باشد. هدف دیگر از انجام این تحقیق محاسبه سهم هر یک از سیستم‌ها در مصرف توان و تولید محصول مناسب جهت فرآیند فلوتاسیون (ذرات ریزتر از ۷۴ میکرون) است، که لازمه آن محاسبه کارایی سرندهای ارتعاشی، آسیای گلوله‌ای (سیستم ۲)، و هیدروسیکلون‌ها است.

## ۲- روش تحقیق

به منظور یافتن رابطه بین مصرف توان آسیای نیمه خودشکن (kWh/t) و عدد SPI خوراک آن (min)،  $K_{80}$  زیرسرنندی آن (mm)، و کارکرد آسترهای جداره آن (H

پژوهش دیگری رابطه بین فشار ترانیون آزاد آسیای نیمه خودشکن و توان مصرفی آن به دست آمد (معادله ۲) [۶].

$$p = 0.2525 P + 3213.2; R^2 = 0.865 \quad (2)$$

که در آن، p فشار ترانیون آزاد آسیای نیمه خودشکن (kPa) و P توان مصرفی در آسیای نیمه خودشکن (kW) است. همچنین در یکی دیگر از این پژوهش‌ها، مدلسازی سطح آسترها در طی عمر آن‌ها، و تغییرات سطوح آن‌ها در اثر سایش بررسی شد و نیز الگوی مصرف آن‌ها به دست آمد [۸-۱۰]. همچنین با مدلسازی سه بعدی آسترها در طی زمان، محاسبه وزن و حجم آن‌ها در هر مرحله امکان پذیر شد. سرانجام با توجه به این مدلسازی، نرخ‌های سایش با دقت بالا محاسبه شدند و در نتیجه تخمین عمر آسترها و پیش‌بینی مدت زمان تعویض آن‌ها در این مرحله امکان پذیر شد [۸-۱۰].

همچنین تلاش‌هایی برای ارائه فرمولی جهت پیش‌بینی توان مصرفی آسیاهای نیمه خودشکن توسط استارکی و دابی انجام گرفته است [۱۱]. آن‌ها با استفاده از آزمایش SPI استارکی و نیز با استفاده از اطلاعات حاصل از چهار کارخانه در کانادا رابطه‌ای برای محاسبه توان مصرفی آسیاهای نیمه خودشکن صنعتی به دست آوردند [۱۱]. رابطه مذکور که به رابطه MinnovEx برای یک چرخه تحت شرایط استاندارد معروف می‌باشد، به صورت معادله ۳ است (چرخه استاندارد چرخه‌ای است که  $F_{80}$  خوراک ورودی به آسیای نیمه خودشکن آن بین ۱۸۰ - ۱۲۰ میلی متر است و در مدار آن از آسیای قلوه سنگی استفاده نشده است) [۱۱].

$$P = (K_{80})^{-0.33} (2.2 + 0.1 \text{ SPI}); R^2 = 0.94 \quad (3)$$

که در آن، P توان آسیای نیمه خودشکن صنعتی (kWh/t)،  $K_{80}$  اندازه محصول نهایی آسیای نیمه خودشکن (mm)، و SPI زمان آزمایش (min) است.

به سبب آنکه آسیای SPI استارکی به اندازه کافی دقیق نبود و فرمول ارائه شده (معادله ۳) تنها در موارد خاص معتبر بود، در سال‌های اخیر، استارکی و همکارانش در صدد یافتن رابطه‌ای برای پیش‌بینی توان مصرفی آسیاهای نیمه خودشکن بوده اند، که برای تمام آسیاهای نیمه خودشکن قابل کاربرد باشد. بدین منظور آن‌ها تلاش نمودند که این مشکل را با استفاده از یک آسیای آزمایشگاهی دیگر (آسیای آزمایشگاهی SAGDesign) حل کنند [۱۲-۱۵]. خوراک این آسیا از نمونه‌های مغزه تقریباً ۱۰ کیلوگرمی تهیه می‌شود که  $K_{80}$  آن‌ها ۱۵۲ میلی متر است و سپس سنگ شکنی می‌شود تا به

آسیای نیمه خودشکن (زیروسندی)، خوراک سیکلون های اولیه، ته ریز سیکلون های اولیه، و سرریز سیکلون های اولیه تهیه شود. به منظور تعیین کارایی آسیای گلوله ای و تجهیزات طبقه بندی ابعادی، سه عملیات نمونه گیری مختلف از مدار خردایش در تاریخ های متفاوت انجام شد. این عملیات نمونه گیری روی جریان های خروجی آسیای نیمه خودشکن، روسرندی، خوراک سیکلون، ته ریز سیکلون، و سرریز سیکلون انجام شدند. پس از پایان نمونه گیری از این جریان ها، نوار نقاله تغذیه کننده به آسیای نیمه خودشکن متوقف شد و محتویات ۶ متر از نوار نقاله کاملاً به درون بشکه هایی تخلیه شدند. سپس اطلاعات عملیاتی ثبت شده در زمان نمونه گیری های اول، دوم، و سوم از طریق اتاق کنترل کارخانه تهیه شدند (جدول ۱).

۷ نمونه از جریان های روی سرندهی، خوراک و ته ریز سیکلون در فواصل ۱۵ دقیقه ای گرفته شد. نمونه سرریز سیکلون با استفاده از یک نمونه گیر اتوماتیک یک ابزار آنالیز اشعه X نصب شده در کارخانه تغلیظ ۲ تهیه شد، بدین ترتیب که هر ۱۰ دقیقه ۵ برش با استفاده از امکانات پیش بینی شده در این ابزار به درون ظرف نمونه گیری منتقل می شد. همچنین یک نمونه از جریان خروجی آسیای نیمه خودشکن تهیه شد و سپس این نمونه به درون یک بشکه تخلیه گردید. پس از خشک کردن این نمونه، کل نمونه تا اندازه های درشت تر از ۶۷۳۰ میکرون آنالیز ابعادی شد و مواد ریزتر از ۶۷۳۰ میکرون با استفاده از یک تقسیم کننده از نوع ریفل تقسیم

(hours))، هشت عملیات نمونه گیری از مدار آسیای نیمه خودشکن (سیستم ۱) در زمان های مختلف انجام شد. همچنین به منظور یافتن رابطه بین مصرف توان آسیای نیمه خودشکن (kWh/t) و فشار ترانیون آزاد آن (p (kPa))، اطلاعات اتاق کنترل کارخانه مورد استفاده قرار گرفت. پس از یافتن رابطه مذکور و ارائه مدلی تجربی جهت پیش بینی توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه، لازم است مدل ارائه شده اعتبار سنجی شود. با توجه به اینکه مدلی که قرار است برای پیش بینی مصرف توان آسیای نیمه خودشکن ارائه شود، باید جامع باشد تا بتواند برای هر مداری مورد استفاده قرار گیرد، بنابراین نمونه گیری ها باید در شرایط عملیاتی متفاوت انجام گیرند. لذا به منظور اعتبار بخشیدن به این مدل و نیز بررسی کارایی مدار خردایش، سه عملیات نمونه گیری از کل مدار خردایش در زمان های گوناگون و در شرایط عملیاتی متفاوت انجام شد. همچنین به منظور محاسبه سهم هر یک از سیستم ها در مصرف توان و تولید محصول مناسب برای فرآیند فلوتاسیون، کارایی سرندهای ارتعاشی، آسیای گلوله ای، و هیدروسیکلون ها در طی این سه عملیات نمونه گیری محاسبه شد. به منظور محاسبه کارایی آسیای گلوله ای، روش اندیش کار باند مورد استفاده قرار گرفت.

به منظور تعیین شرایط عملکرد دستگاه ها و نیز موازنه مدار، لازم است نمونه هایی از خوراک آسیای نیمه خودشکن، خروجی آسیای نیمه خودشکن، مواد روسرندی، محصول نهایی

جدول (۱) اطلاعات اتاق کنترل در زمان عملیات نمونه گیری اول، دوم و سوم

| نمونه گیری شماره ۳ |         |        | نمونه گیری شماره ۲ |         |        | نمونه گیری شماره ۱ |         |        |   |
|--------------------|---------|--------|--------------------|---------|--------|--------------------|---------|--------|---|
| متوسط              | ماکزیمم | مینیمم | متوسط              | ماکزیمم | مینیمم | متوسط              | ماکزیمم | مینیمم |   |
| ۸۱۴۲               | ۸۵۲۵    | ۷۹۴۱   | ۶۷۵۴               | ۶۹۶۴    | ۶۲۵۴   | ۶۹۱۷               | ۷۲۴۶    | ۶۶۷۵   | توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن (kW)                 |
| ۷۷۱۰               | ۷۸۵۰    | ۷۵۷۴   | ۷۹۰۴               | ۸۰۹۰    | ۷۸۳۷   | ۷۶۶۸               | ۷۷۹۴    | ۷۵۶۸   | توان مصرفی آسیای گلوله ای (kW)                    |
| ۱۰۲۲               | ۱۱۰۱    | ۵۸۶/۵  | ۷۹۳/۸              | ۸۵۰/۰   | ۷۵۰/۰  | ۷۵۴/۶              | ۷۹۱/۴   | ۷۲۶/۳  | تناژ خوراک مرطوب ورودی به آسیای نیمه خودشکن (t/h) |
| ۷۲/۸۴              | ۱۲۴/۹۰  | ۵۹/۵۳  | ۹۳/۰               | ۱۱۴/۰   | ۴۰/۰   | ۱۱۷/۹              | ۱۲۸/۹   | ۹۸/۳   | تناژ ریجکت مرطوب (t/h)                            |
| ۹۶/۸               | ۱۰۴/۷   | ۸۸/۱۱  | ۶۹/۱۱              | ۸۰/۰    | ۵۴/۰   | ۸۳/۴۳              | ۹۰/۸۰   | ۶۲/۸۸  | فشار خوسه سیکلون های اولیه (kPa)                  |
| ۵۳۰۰               | ۵۴۶۷    | ۵۱۹۳   | ۴۵۶۰               | ۴۵۹۸    | ۴۴۸۲   | ۵۰۳۶               | ۵۱۶۹    | ۴۹۶۲   | فشار ترانیون آزاد آسیای نیمه خودشکن (kPa)         |

در حقیقت خوراک سیستم شماره ۲ (شکل ۱) را تشکیل می‌دهد، انجام شد.

$$\text{Ball Mill Efficiency} = \frac{W_{iL}}{W_{iO}} \quad (5)$$

$$W_{iO} \left( \frac{kWh}{t} \right) = \frac{\text{Ball mill's consumed power} \left( \frac{kWh}{t} \right)}{F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4 \times F_5 \times F_6 \times F_7 \times 11.02 \left( \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{20}}} \right)} \quad (6)$$

در پایان به ترتیب با شش، پنج، و هشت مرتبه تکرار آزمایش SPI برای نمونه‌گیری‌های اول، دوم و سوم مقدار اندیس توان آسیای نیمه‌خودشکن برای این نمونه‌ها به دست آمد.

### ۳- ارائه نتایج و بحث

#### ۳-۱- مدلسازی توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن

##### مجتمع مس سرچشمه

با توجه به بررسی‌های قبلی [۵، ۷ و ۱۶]، مشخص شد که استفاده از معادله استارکی (معادله ۳) جهت پیش‌بینی توان مصرفی آسیای نیمه‌خودشکن کارخانه پرعیارکنی ۲ مجتمع مس سرچشمه امکان‌پذیر نیست. بنابراین با استفاده از نتایج به دست آمده از هشت عملیات نمونه‌گیری از مدار آسیای نیمه‌خودشکن (سیستم شماره ۱) و نیز استفاده از آزمایش SPI تلاش شد تا مدلی تجربی جهت پیش‌بینی توان مصرفی آسیای نیمه‌خودشکن این کارخانه ارائه شود.

#### ۳-۱-۱- پارامترهای مربوط به توابع شکست و انتخاب

فاکتورهای مؤثر در مصرف توان آسیاهای نیمه‌خودشکن با توجه به شرایط عملیاتی موجود در کارخانه‌ها، شامل سختی کانسنگ، اندازه محصول خروجی آسیای نیمه‌خودشکن، پرشدگی آسیا، درصد گلوله شارژ شده به آسیای نیمه‌خودشکن، و شرایط آسترهای نصب شده درون این آسیا می‌باشد. در شرایط فعلی، پرشدگی آسیاهای نیمه‌خودشکن نمی‌تواند دقیقاً محاسبه شود. با وجود این، نسبت بین پرشدگی کلی آسیای نیمه‌خودشکن و مقدار گلوله شارژ شده به آن می‌تواند به چگالی متوسط بار درون این آسیا نسبت داده شود. در حقیقت، در یک پرشدگی ثابت با افزایش مقدار گلوله‌ها، چگالی متوسط بار افزایش می‌یابد و بالعکس. با توجه به این مشکلات، تنها فاکتوری که می‌تواند تغییرات پرشدگی و درصد گلوله‌های آسیای نیمه‌خودشکن را در هر لحظه نشان دهد فشار ترانویون‌های این آسیا است. از این رو، به منظور ارائه رابطه‌ای جهت پیش‌بینی توان مصرفی آسیای نیمه‌خودشکن،

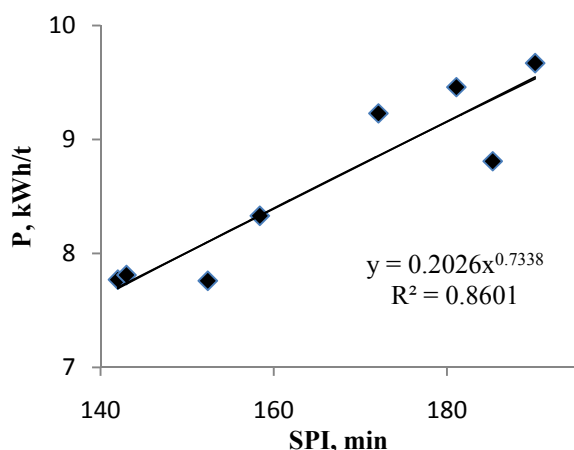
شدند و حدود ۱/۵ کیلوگرم از آن‌ها برای ادامه آنالیز ابعادی تا اندازه‌های ریزتر از ۳۷ میکرون مورد استفاده قرار گرفت. بر روی نمونه‌های گرفته شده از جریان‌های روسرندی، خوراک سیکلون، ته ریز سیکلون، و سرریز سیکلون، یک آزمایش آنالیز ابعادی تا ۳۷ میکرون صورت پذیرفت. همچنین درصد وزنی جامد جریان‌های خوراک سیکلون، ته ریز سیکلون، و سرریز سیکلون تعیین شد.

در اولین عملیات نمونه‌گیری، نمونه تهیه شده از نوار نقاله تغذیه کننده به آسیای نیمه‌خودشکن با وزن کلی ۹۶۵ کیلوگرم (بدون رطوبت) مورد دانه بندی ابعادی قرار گرفت. نخست کل نمونه تا اندازه‌های درشت تر از ۶۷۳۰ میکرون دانه بندی شد. سپس مابقی نمونه (ریزتر از ۶۷۳۰ میکرون) که وزنی معادل ۲۳۸ کیلوگرم داشت بوسیله یک تقسیم کننده تقسیم شد و ۱/۵ کیلوگرم از نمونه جدید در آنالیز ابعادی تا ۳۷ میکرون مورد استفاده قرار گرفت. دومین عملیات نمونه‌گیری حدود ۴ ماه پس از اولین عملیات نمونه‌گیری انجام شد. مراحل نمونه‌گیری، آماده سازی، و عملیات انجام شده روی نمونه‌ها مشابه نمونه‌گیری اول بود. در نمونه‌گیری دوم، وزن کلی نمونه تهیه شده از نوار نقاله تغذیه کننده به آسیای نیمه‌خودشکن (بدون رطوبت) ۷۹۲ کیلوگرم بود. همچنین وزن مواد ریزتر از ۶۷۳۰ میکرون ۷۸ کیلوگرم بود. سومین عملیات نمونه‌گیری حدود سه ماه پس از دومین عملیات نمونه‌گیری صورت پذیرفت. مراحل نمونه‌گیری، آماده سازی، و عملیات صورت گرفته بر روی نمونه‌ها مشابه نمونه‌گیری‌های اول و دوم بود. وزن نمونه سوم تهیه شده از نوار نقاله تغذیه کننده به آسیای نیمه‌خودشکن (بدون رطوبت) ۱۰۱۰ کیلوگرم بود. ضمناً وزن مواد ریزتر از ۶۷۳۰ میکرون ۲۴۴ کیلوگرم بود.

به منظور بررسی کارایی آسیای گلوله‌ای از روش مقایسه اندیس کار آزمایشگاهی ( $W_{iL}$ ) با اندیس کار عملیاتی ( $W_{iO}$ ) استفاده شد (معادله ۵). به منظور محاسبه اندیس کار عملیاتی آسیای گلوله‌ای (معادله ۶)، نخست با استفاده از اطلاعات ثبت شده در اتاق کنترل کارخانه، میزان توان مصرفی آسیای گلوله‌ای ( $kWh/t$ ) برای هر سه نمونه محاسبه شد. سپس جهت محاسبه میزان واقعی توان مصرفی، ضرایب تصحیح باند محاسبه و اعمال شدند. به منظور مقایسه اندیس‌های کار عملیاتی و آزمایشگاهی، آزمایش اندیس کار استاندارد باند برای نمونه‌های اول، دوم، و سوم بر روی نمونه زیرسرندی، که

### ۳-۱-۲- مدل ارائه شده جهت پیش‌بینی توان مصرفی آسیای نیمه‌خودشکن سرچشمه

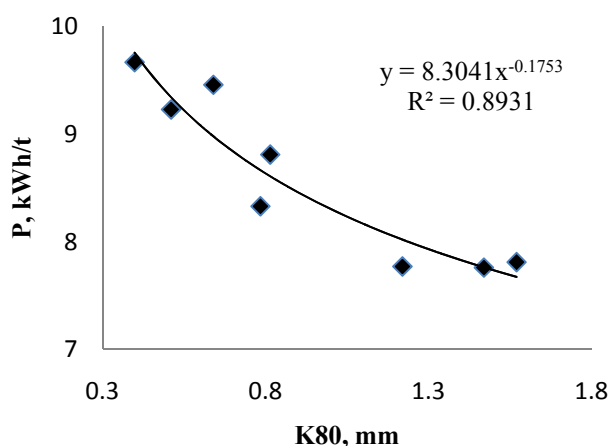
با توجه به انجام هشت عملیات نمونه‌گیری از مدار آسیای نیمه‌خودشکن (سیستم ۱) و استفاده از آسیای SPI، رابطه بین توان مصرفی ویژه آسیای نیمه‌خودشکن و SPI به فرم معادله توانی  $\gamma$  به دست آمد (شکل ۲).



شکل (۲) رابطه بین توان مصرفی ویژه آسیای نیمه‌خودشکن و SPI

$$P = a_1 (SPI)^{b_1}; a_1 = 0.2026; b_1 = 0.7338; R^2 = 0.8601 \quad (\gamma)$$

پس از انجام هشت عملیات نمونه‌گیری از مدار آسیای نیمه‌خودشکن، رابطه بین توان مصرفی ویژه آسیای نیمه‌خودشکن و  $K_{80}$  زیرسردی به فرم معادله توانی  $\delta$  به دست آمد (شکل ۳).



شکل (۳) رابطه بین توان مصرفی ویژه آسیای نیمه‌خودشکن و  $K_{80}$  زیرسردی

$$P = a_2 (K_{80})^{b_2}; a_2 = 8.3041; b_2 = -0.1753; R^2 = 0.8931 \quad (\delta)$$

فشار ترانویون آزاد آسیای نیمه‌خودشکن به عنوان نماینده مقدار گلوله‌ها و نیز پرشدگی آسیای نیمه‌خودشکن مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین می‌توان اظهار داشت که مصرف توان آسیای نیمه‌خودشکن  $(P \text{ (kWh/t)})$  تابعی از فشار ترانویون آزاد آن  $(p \text{ (kPa)})$  است. به عبارت دیگر،  $P = f(p)$ . همچنین تغییر ارتفاع بالابرها به نوبه خود مصرف توان آسیای نیمه‌خودشکن را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به طوری که با کاهش ارتفاع بالابرها معمولاً بار تا ارتفاع مورد نظر بالا نمی‌رود و در نتیجه در طی سقوط از انرژی کافی برای خرد شدن (در اثر برخورد سنگ با پوسته آسیا یا برخورد گلوله به سنگ) یا خرد کردن ذرات دیگر (در اثر برخورد سنگ به ذرات ریزتر) برخوردار نیست. مضافاً زمان اقامت ذرات درون آسیای نیمه‌خودشکن نیز افزایش می‌یابد. شایان ذکر اینکه افزایش زمان اقامت و کاهش انرژی ذرات در طی برخورد موجب مصرف بیشتر توان در آسیای خودشکن برای خرد کردن مواد می‌شود. بنابراین مدت زمان کارکرد آسترهای جداره یک فاکتور مؤثر در توان مصرفی آسیای نیمه‌خودشکن می‌باشد. از سوی دیگر می‌توان اضافه نمود که مصرف توان آسیای نیمه‌خودشکن  $(P \text{ (kWh/t)})$  تابعی از مدت زمان کارکرد آسترهای جداره آن  $(H \text{ (hours)})$  می‌باشد. به عبارت دیگر،  $P = f(H)$ . علاوه بر فشار ترانویون آزاد آسیای نیمه‌خودشکن و مدت زمان کارکرد آسترهای جداره آن که به شرایط عملیاتی آسیای نیمه‌خودشکن مربوط هستند (پارامترهای مربوط به تابع انتخاب)، ویژگی‌های خوراک و محصول نهایی آسیای نیمه‌خودشکن نیز (پارامترهای مربوط به تابع شکست) در توان مصرفی ویژه آسیای نیمه‌خودشکن مؤثر هستند. ویژگی‌های خوراک آسیای نیمه‌خودشکن می‌تواند به صورت عدد SPI بیان شود و ویژگی‌های محصول نهایی آسیای نیمه‌خودشکن می‌تواند به صورت  $K_{80}$  زیرسردی بیان گردد. بنابراین عدد SPI خوراک و  $K_{80}$  زیرسردی دیگر فاکتورهای مؤثر در توان مصرفی آسیای نیمه‌خودشکن هستند. از سوی دیگر، می‌توان اظهار داشت که توان مصرفی آسیای نیمه‌خودشکن  $(P \text{ (kWh/t)})$  تابعی از عدد SPI خوراک آن  $(\text{SPI (min)})$  و نیز تابعی از  $K_{80}$  زیرسردی آن است. به عبارت دیگر،  $P = f(\text{SPI})$  و  $P = f(K_{80})$ . با فرض اینکه این چهار پارامتر مستقل هستند، چهار روش متفاوت برای پیش‌بینی مصرف توان آسیای نیمه‌خودشکن می‌تواند وجود داشته باشد.

$$P\left(\frac{\text{kWh}}{t}\right) = a_4 p + b_4; a_4 = 5.5 \times 10^{-3}; b_4 = -17.66; R^2 = 0.865 \quad (10)$$

اکنون با فرض اینکه این چهار پارامتر مستقل هستند، رابطه بین توان مصرفی ویژه و هر یک از این پارامترها به طور جداگانه محاسبه شد. در نتیجه توان مصرفی ویژه آسیای نیمه خودشکن می‌تواند به صورت میانگینی از توان‌های ویژه پیش‌بینی شده بوسیله هر یک از این چهار پارامتر بیان شود. با توجه به معادلات ۷ تا ۱۰، رابطه کلی به فرم معادله ۱۱ است.

$$P = [a(SPI)^b] + [c(K_{80})^d] + [eH + f] + [gp + h];$$

$$a = \frac{a_1}{4}; b = b_1; c = \frac{a_2}{4}; d = b_2;$$

$$e = \frac{a_3}{4}; f = \frac{b_3}{4}; g = \frac{a_4}{4}; h = \frac{b_4}{4} \quad (11)$$

شایان ذکر اینکه معادله ۱۱ در هر کارخانه و مداری قابل کاربرد است، درحالیکه مدل استارکی (معادله ۳) تنها در مدارهای استاندارد قابل کاربرد است. در هر کارخانه و مداری، ضرایب a, b, c, d, e, f, g, و h باید محاسبه و کالیبره شوند، تا مدل ارائه شده بتواند قابل کاربرد باشد. برای مجتمع مس سرچشمه، با استفاده از معادلات ۷ تا ۱۱، معادله کلی به فرم معادله ۱۲ است.

$$P = [5.065 \times 10^{-2} (SPI)^{0.7338}] + [2.076 (K_{80})^{-0.1753}] + [10^{-4} H + 1.944] + [1.375 \times 10^{-3} p - 4.415] \quad (12)$$

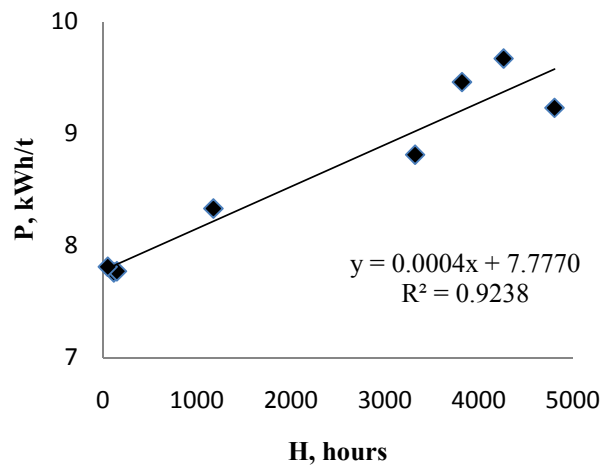
### ۳-۲- نتایج سه عملیات نمونه‌گیری از کل مدار

#### خردایش

بر اساس اطلاعات ثبت شده در اتاق کنترل، تناژ متوسط کانسنگ خشک ورودی به آسیای نیمه خودشکن در زمان نمونه‌گیری‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۷۲۱ t/h، ۸۹/۶ و ۷۵۱/۴ t/h (به ترتیب معادل ۶۷، ۶۹/۶ و ۸۹/۶ درصد ظرفیت اسمی کارخانه (۱۰۸۰ t/h)) بود. در زمان نمونه‌گیری‌های اول، دوم و سوم آسترهای جداره به ترتیب ۳۱۶۲، ۱۳۷۶ و ۳۴۴۰ ساعت کار کرده بودند. نمودار دانه بندی ابعادی جریان زیر سرندي همراه با خوراک آسیای نیمه خودشکن مربوط به نمونه‌گیری‌های اول، دوم و سوم در شکل ۶ نشان داده شده است. ویژگی‌های نمونه‌های اول، دوم، و سوم و مقایسه آن‌ها با اعداد طراحی کارخانه (اهداف) در جدول ۲ قابل مشاهده است.

آنالیز ابعادی خوراک سرندي (خروجی آسیای نیمه خودشکن)، مواد عبورکننده از سرندي (زیرسرندي)، و مواد

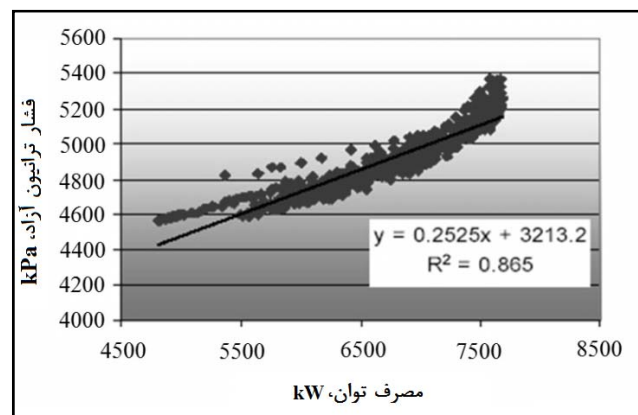
پس از انجام هشت عملیات نمونه‌گیری از مدار آسیای نیمه خودشکن، رابطه بین توان مصرفی ویژه آسیای نیمه خودشکن و مدت زمان کارکرد آسترهای جداره به فرم معادله خطی ۹ به دست آمد (شکل ۴).



شکل (۴) رابطه توان مصرفی ویژه آسیای نیمه خودشکن و مدت زمان کارکرد آسترهای جداره

$$P = a_3 H + b_3; a_3 = 0.0004; b_3 = 7.7770; R^2 = 0.9238 \quad (9)$$

با توجه به اطلاعات اتاق کنترل کارخانه، رابطه بین فشار ترانسیون آزاد آسیای نیمه خودشکن (kPa) و توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن (kW) به دست آمد (شکل ۵). علت استفاده از اطلاعات اتاق کنترل کارخانه به جای داده‌های حاصل از هشت عملیات نمونه‌گیری این است که آن‌ها دقیق تر هستند، زیرا آن‌ها از ۲۵۰۰ داده عملیاتی حاصل شده اند. البته لازم به ذکر است که رابطه بین P (kWh/t) و p (kPa) مطلوب است، با داشتن نرخ جریان (t/h)، رابطه بین P (kWh/t) و p (kPa) به فرم معادله خطی ۱۰ می‌باشد.

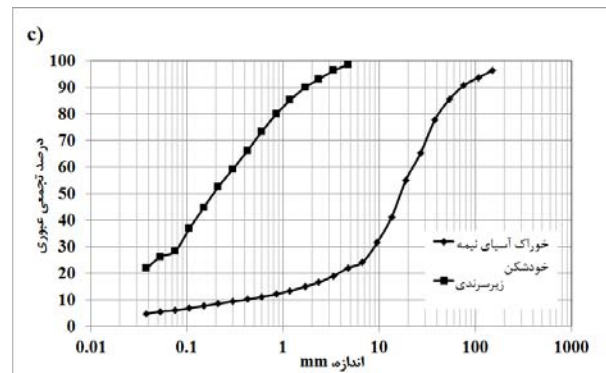
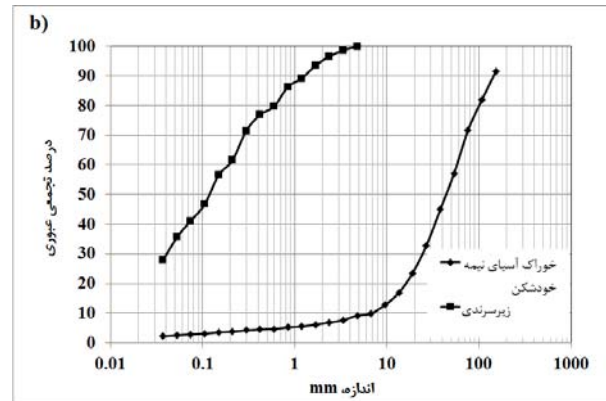
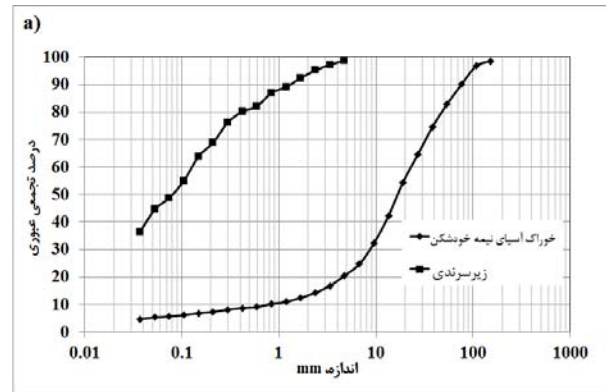


شکل (۵) رابطه بین فشار ترانسیون آزاد آسیای نیمه خودشکن و توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن



در زمان نمونه‌گیری‌های اول، دوم، و سوم به ترتیب ۹۹/۹۱، ۹۹/۸۱ و ۹۹/۹۶ درصد به دست آمد.

در طی نمونه‌گیری اول، ۹ سیکلون از ۱۵ سیکلون موجود در خوشه شماره یک در حال کار بودند. فشار متوسط سیکلون‌ها ۸۳/۴ kPa بود (فشار طراحی سیکلون‌ها ۹۳/۰ kPa است). درصد وزنی جامد خوراک، ته ریز، و سرریز در زمان نمونه‌گیری اول به ترتیب ۴/۴۶، ۶/۶۵، و ۰/۲۹ درصد به دست آمد. در نمونه‌گیری اول، مقدار  $d_{50C}$  (تصحیح شده) ۸۸ میکرون بود (میزان  $d_{50}$  طراحی مدار ۱۱۰ میکرون است). همچنین میزان ضریب نقص سیکلون‌ها (I) ۰/۴۲۶ به دست آمد و کارایی جدایش سیکلون‌ها در آن زمان ۵۷/۴ درصد بود. در طی نمونه‌گیری دوم، ۱۴ سیکلون از ۱۵ سیکلون موجود در خوشه شماره یک در حال کار بودند. فشار متوسط سیکلون‌ها ۶۹/۱ kPa بود. درصد وزنی جامد خوراک، ته ریز، و سرریز سیکلون‌ها در نمونه‌گیری دوم به ترتیب ۰/۵۸، ۰/۵۴، و ۴/۳۱ درصد به دست آمد. در نمونه‌گیری دوم، میزان  $d_{50C}$  ۹۹ میکرون بود. همچنین میزان ضریب نقص سیکلون‌ها ۰/۳۱۶ تخمین زده شد و کارایی جدایش سیکلون‌ها در آن زمان ۶۸/۴ درصد بود. در زمان نمونه‌گیری سوم، ۱۱ سیکلون از ۱۵ سیکلون موجود در خوشه شماره دو در حال کار بودند. فشار متوسط سیکلون‌ها ۹۶/۸ kPa بود. درصد وزنی جامد خوراک، ته ریز، و سرریز سیکلون‌ها در نمونه‌گیری سوم به ترتیب ۱/۴۸، ۳/۷۰، و ۲/۲۸ درصد به دست آمد. در نمونه‌گیری سوم، میزان  $d_{50C}$  ۱۳۴ میکرون بود. همچنین میزان ضریب نقص سیکلون‌ها ۰/۳۴۱ حاصل شد و کارایی جدایش سیکلون در آن زمان ۶۵/۹ درصد بود. نمودارهای آنالیز ابعادی جریان‌های خوراک، ته ریز، و سرریز سیکلون‌ها برای نمونه‌گیری‌های اول، دوم و سوم در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل (۶) آنالیز ابعادی خوراک آسیای نیمه خودشکن و زیرسرندي برای (a) نمونه اول، (b) نمونه دوم، و (c) نمونه سوم

باقیمانده روی سرندي (ریجکت یا روسرندي) در طی نمونه‌گیری‌های اول، دوم، و سوم در جدول ۳ موجود هستند. با استفاده از اعداد موجود در جدول ۳، کارایی سرندي ارتعاشی

جدول (۲) ویژگی‌های نمونه‌های اول، دوم و سوم و مقایسه آن‌ها با اعداد طراحی کارخانه (اهداف)

| اعداد طراحی مدار [۱۷] | نمونه‌گیری سوم | نمونه‌گیری دوم | نمونه‌گیری اول |                                       |
|-----------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------------|
| ۲۵۰                   | ۲۵۰            | ۲۰۰            | ۲۰۰            | اندازه بزرگترین ذرات (mm)             |
| ۳۸                    | ۴۲             | ۱۰۱            | ۴۸             | $K_{80}$ خوراک آسیای نیمه خودشکن (mm) |
| ۰/۵۰۵                 | ۰/۸۵۴          | ۰/۶۰۴          | ۰/۴۱۵          | $K_{80}$ زیرسرندي (mm)                |
| داده‌ای موجود نیست    | ۶۲/۹           | ۳۰/۷           | ۶۲/۰           | میزان ذرات ریزتر از ۲۵ میلی متر (%)   |
| ۷۵/۲                  | ۴۹/۳           | ۱۶۷/۲          | ۱۱۵/۷          | نسبت خردایش                           |



جدول (۳) پارامترهای مربوط به شرایط عملیاتی سرندهای ارتعاشی در نمونه‌گیری‌های اول، دوم و سوم

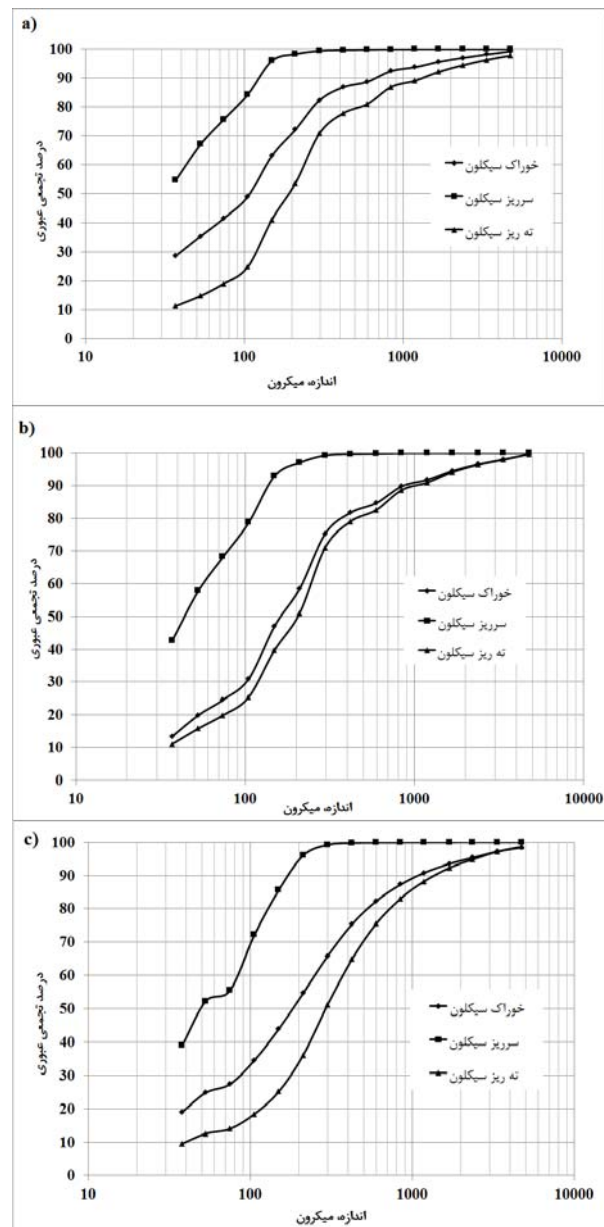
| نمونه‌گیری | ذرات ریزتر از ۵ میلی متر (%) |                |                | ذرات درشت تر از ۲۵ میلی متر (%) |                |                | K <sub>80</sub> (میلی متر) |                |                |
|------------|------------------------------|----------------|----------------|---------------------------------|----------------|----------------|----------------------------|----------------|----------------|
|            | نمونه‌گیری اول               | نمونه‌گیری دوم | نمونه‌گیری سوم | نمونه‌گیری اول                  | نمونه‌گیری دوم | نمونه‌گیری سوم | نمونه‌گیری اول             | نمونه‌گیری دوم | نمونه‌گیری سوم |
| خوراک سرند | ۰/۸۲۷                        | ۰/۸۰۷          | ۱/۱۵۰          | ۹۱/۸                            | ۹۳/۵           | ۹۲/۵           | ۲/۴                        | ۴/۹            | ۲/۴            |
| زیرسندی    | ۰/۴۱۵                        | ۰/۶۰۴          | ۰/۸۵۴          | ۹۸/۸                            | ۱۰۰/۰          | ۹۸/۷           | ۰/۰                        | ۰/۰            | ۰/۰            |
| روسندی     | ۲۵/۵۵۸                       | ۲۸/۲۳۲         | ۲۰/۲۴۱         | ۰/۹                             | ۲/۶۶           | ۰/۴۳           | ۹/۳                        | ۲۶/۷           | ۷۹/۵           |

پس از محاسبه و اعمال ضرایب تصحیح باند (جدول ۴) [۱۸]، برای نمونه اول، میزان توان مصرفی آسیای گلوله‌ای برابر با ۱۰/۶۴ kWh/t بود. بنابراین با توجه به مقادیر جدول ۴، میزان اندیس کار عملیاتی محاسبه شد که برابر kWh/t ۱۸/۷۲ بود. همچنین میزان اندیس کار آزمایشگاهی باند برای نمونه اول به دست آمد که برابر kWh/t ۱۴/۶۶ بود. سرانجام با تقسیم اندیس کار آزمایشگاهی بر اندیس کار عملیاتی، کارایی آسیای گلوله‌ای به دست آمد که معادل ۷۸/۳۱ درصد بود. به همین ترتیب برای نمونه دوم، میزان توان مصرفی آسیای گلوله‌ای برابر با ۱۰/۵۲ kWh/t بود. بنابراین با توجه به مقادیر نشان داده شده در جدول ۴، میزان اندیس کار عملیاتی باند محاسبه شد که برابر با kWh/t ۲۵/۳۴ بود. همچنین میزان اندیس کار آزمایشگاهی باند برای نمونه دوم به دست آمد که برابر با kWh/t ۱۵/۰۴ بود. در نتیجه کارایی آسیای گلوله‌ای برابر با ۵۹/۳۵ درصد بود. به شیوه‌ای مشابه برای نمونه سوم، میزان توان مصرفی آسیای گلوله‌ای برابر با kWh/t ۷/۹۶ بود. بنابراین با توجه به مقادیر بیان شده در جدول ۴، میزان اندیس کار عملیاتی باند محاسبه شد که برابر با kWh/t ۱۶/۰۹ بود. همچنین میزان اندیس کار آزمایشگاهی باند برای نمونه سوم به دست آمد که برابر با kWh/t ۱۳/۰۷ بود. در نتیجه کارایی آسیای گلوله‌ای برابر با ۸۱/۲۳ درصد بود.

جدول (۴) ضرایب تصحیح باند برای نمونه‌گیری‌های اول، دوم و سوم

| پارامتر*       | F <sub>3</sub> | F <sub>4</sub> | F <sub>7</sub> | F <sub>0</sub> | R <sub>r</sub> |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| نمونه‌گیری اول | ۱/۰۵۳          | ۰/۸۲۴          | ۱/۰۳۹          | ۳۷۶۶/۷         | ۴/۶۹           |
| نمونه‌گیری دوم | ۰/۸۰۳          | ۰/۸۲۴          | ۱/۰۳۱          | ۳۷۱۸/۸         | ۵/۵۶           |
| نمونه‌گیری سوم | ۱/۰۲۳          | ۰/۸۲۴          | ۱              | ۳۵۸۹/۹         | ۶/۵۳           |

\* مقادیر پارامترهای F<sub>1</sub>، F<sub>2</sub>، F<sub>3</sub>، F<sub>4</sub> و F<sub>6</sub> در هر سه نمونه‌گیری برابر با واحد بودند و بنابراین در جدول نشان داده نشده اند.



شکل (۷) نمودار آنالیز ابعادی خوراک، ته ریز، و سرریز سیکلون‌ها در زمان (a) نمونه‌گیری اول، (b) نمونه‌گیری دوم، و (c) نمونه‌گیری سوم

محصول ریزتر از ۷۴ میکرون برابر با ۲۹/۸۲ kWh/t بود. در طی نمونه‌گیری سوم، میزان بار درگردش آسیای گلوله‌ای به دست آمد که برابر با ۲۲۳ درصد بود، که به میزان طراحی مدار نزدیک بود. در جدول ۵ میزان ذرات ریزتر از ۷۴ میکرون در ورودی و خروجی سیستم‌های جعبه سیاه در زمان نمونه‌گیری سوم نشان داده شده است. با استفاده از اطلاعات ثبت شده از اتاق کنترل کارخانه، در زمان نمونه‌گیری سوم توان مصرفی متوسط آسیای نیمه‌خودشکن ۸۱۴۲ kW بود و توان مصرفی متوسط آسیای گلوله‌ای ۷۷۱۰ kW بود (جدول ۱). بنابراین با توجه مقادیر موجود در جداول ۱ و ۵، میزان متوسط توان مصرفی آسیاهای نیمه‌خودشکن و گلوله‌ای برای تولید یک تن از محصول ریزتر از ۷۴ میکرون محاسبه شد که برابر با ۳۳/۱۰ kWh/t بود.

نتایج آزمایش SPI برای نمونه‌های اول، دوم و سوم در جدول ۶ نشان داده شده است. مقدار SPI متوسط برای نمونه دوم ۱۵۵/۴ دقیقه بود که کمتر از SPI نمونه اول (۱۸۶/۵ دقیقه) بود. بنابراین نمونه دوم نرم تر از نمونه اول بود. از سوی دیگر مقدار متوسط SPI حاصل از نمونه سوم (۱۸۴/۷ دقیقه) تقریباً برابر با SPI حاصل از نمونه اول (۱۸۶/۵ دقیقه) بود، اما بسیار بالاتر از SPI حاصل از نمونه دوم بود. بنابراین نمونه سوم سختی تقریباً برابری با نمونه اول داشت درحالی‌که سخت تر از نمونه دوم بود.

در جدول ۷ خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده از هر سه عملیات نمونه‌گیری وجود دارد.

در طی نمونه‌گیری اول، میزان بار درگردش آسیای گلوله‌ای به دست آمد که معادل ۱۴۹ درصد بود، که بسیار کمتر از میزان طراحی آن (۲۵۰ درصد) بود. با توجه به اینکه محصول نهایی مدار خردایش (خوراک سلول‌های رافر) باید ریزتر از ۷۴ میکرون باشد، تعیین تناژ ذرات ریزتر از ۷۴ میکرون در ورودی و خروجی سیستم‌های جعبه سیاه ۱ و ۲ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (جدول ۵). با استفاده از اطلاعات ثبت شده در اتاق کنترل کارخانه، در زمان نمونه‌گیری اول توان مصرفی متوسط آسیای نیمه‌خودشکن ۷۶۶۸ kW بود و توان مصرفی متوسط آسیای گلوله‌ای ۷۶۶۸ kW بود (جدول ۱). بنابراین با توجه به مقادیر موجود در جداول ۱ و ۵، میزان متوسط توان مصرفی آسیاهای نیمه‌خودشکن و گلوله‌ای برای تولید یک تن از محصول ریزتر از ۷۴ میکرون محاسبه شد که برابر با ۲۸/۹۱ kWh/t بود. در طی نمونه‌گیری دوم، میزان بار درگردش آسیای گلوله‌ای به دست آمد که برابر با ۷۴۷ درصد بود، که بیش از حد بالاتر از میزان طراحی مدار بود. در جدول ۵ میزان ذرات ریزتر از ۷۴ میکرون در ورودی و خروجی سیستم‌های جعبه سیاه در زمان نمونه‌گیری دوم نشان داده شده است. با استفاده از اطلاعات ثبت شده از اتاق کنترل کارخانه، در زمان نمونه‌گیری دوم توان مصرفی آسیای نیمه‌خودشکن ۶۷۵۴ kW بود و توان مصرفی متوسط آسیای گلوله‌ای ۷۹۰۴ kW بود (جدول ۱). در نتیجه با توجه به مقادیر موجود در جداول ۱ و ۵، میزان متوسط توان مصرفی آسیاهای نیمه‌خودشکن و گلوله‌ای جهت تولید یک تن از

جدول (۵) میزان ذرات ریزتر از ۷۴ میکرون در ورودی و خروجی سیستم‌های جعبه سیاه شماره ۱ و ۲ در زمان نمونه‌گیری‌های اول، دوم و سوم

| ذرات ریزتر از ۷۴ میکرون (t/h) |                |                | ذرات ریزتر از ۷۴ میکرون (%) |                |                | نرخ جریان (t/h) |                |                |                         |
|-------------------------------|----------------|----------------|-----------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------------|
| نمونه‌گیری سوم                | نمونه‌گیری دوم | نمونه‌گیری اول | نمونه‌گیری سوم              | نمونه‌گیری دوم | نمونه‌گیری اول | نمونه‌گیری سوم  | نمونه‌گیری دوم | نمونه‌گیری اول |                         |
| ۵۸/۵۸                         | ۲۰/۹۶          | ۴۰/۷۹          | ۶/۰۵                        | ۲/۷۹           | ۵/۶۶           | ۹۶۸/۲           | ۷۵۱/۴          | ۷۲۰/۶۴         | خوراک آسیای نیمه-خودشکن |
| ۲۷۹/۰۰                        | ۳۰۸/۹۸         | ۳۵۱/۱۷         | ۲۸/۲۹                       | ۴۱/۱۲          | ۴۸/۷۳          | ۹۶۸/۲           | ۷۵۱/۴          | ۷۲۰/۶۴         | زیرسرندي                |
| ۵۳۷/۵۴                        | ۵۱۲/۵۳         | ۵۴۵/۳۱         | ۵۵/۵۲                       | ۶۸/۲۱          | ۷۵/۶۷          | ۹۶۸/۲           | ۷۵۱/۴          | ۷۲۰/۶۴         | سرریز سیکلون-های اولیه  |

جدول (۶) نتایج آزمایش‌های SPI برای نمونه‌های اول دوم، و سوم

| SPI <sub>ave</sub><br>(min) | SPI <sub>8</sub><br>(min) | SPI <sub>7</sub><br>(min) | SPI <sub>6</sub><br>(min) | SPI <sub>5</sub><br>(min) | SPI <sub>4</sub><br>(min) | SPI <sub>3</sub><br>(min) | SPI <sub>2</sub><br>(min) | SPI <sub>1</sub><br>(min) |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| ۱۸۶/۵                       | -                         | -                         | ۱۸۵                       | ۲۰۴                       | ۱۸۲                       | ۱۵۲                       | ۱۹۷                       | ۱۹۹                       |
| ۱۵۵/۴                       | -                         | -                         | -                         | ۱۷۵                       | ۱۴۳                       | ۱۴۹                       | ۱۶۴                       | ۱۴۶                       |
| ۱۸۴/۷                       | ۱۸۴/۳                     | ۱۸۳/۴                     | ۱۸۵/۵                     | ۱۶۵                       | ۱۸۲                       | ۱۷۰/۶                     | ۲۰۴                       | ۲۰۳                       |

جدول (۷) خلاصه‌ای از نتایج حاصل از عملیات نمونه‌گیری اول، دوم و سوم

| نمونه‌گیری سوم | نمونه‌گیری دوم | نمونه‌گیری اول | پارامتر   |
|----------------|----------------|----------------|---|
| ۹۶/۸           | ۶۹/۱           | ۸۳/۴           | فشار متوسط سیکلون‌ها (kPa)  |
| ۵۳۶            | ۳۸۴            | ۲۷۵            | K <sub>80</sub> خوراک سیکلون (میکرون)                                     |
| ۷۳۹            | ۴۶۳            | ۵۳۱            | K <sub>80</sub> ته ریز سیکلون (میکرون)                                    |
| ۱۳۱            | ۱۰۹            | ۸۹             | K <sub>80</sub> سرریز سیکلون (میکرون)                                     |
| ۴۸/۱           | ۵۴/۰           | ۴۶/۴           | درصد وزنی جامد خوراک سیکلون   |
| ۷۰/۳           | ۵۸/۹           | ۶۵/۶           | درصد وزنی جامد ته ریز سیکلون  |
| ۲۸/۲           | ۳۱/۴           | ۲۹/۰           | درصد وزنی جامد سرریز سیکلون   |
| ۱۳۴            | ۹۹             | ۸۸             | d <sub>50c</sub> (میکرون)   |
| ۰/۳۴۱          | ۰/۳۱۶          | ۰/۴۲۶          | ضریب نقص سیکلون‌ها  |
| ۱۳/۰۷          | ۱۵/۰۴          | ۱۴/۶۶          | (kWh/t) Wi <sub>L</sub>   |
| ۱۶/۰۹          | ۲۵/۳۴          | ۱۸/۷۲          | (kWh/t) Wi <sub>O</sub>   |
| ۸۱/۲۳          | ۵۹/۳۵          | ۷۸/۳۱          | کارایی آسیای گلوله‌ای (%)   |
| ۲۲۳            | ۷۴۷            | ۱۴۹            | بار درگردش آسیای گلوله‌ای (%)   |
| ۳۶/۹۴          | ۲۳/۴۵          | ۲۲/۲۹          | توان مصرفی در آسیای نیمه‌خودشکن جهت تولید ذرات ریزتر از ۷۴ میکرون (kWh/t) |
| ۲۹/۸۲          | ۳۸/۸۳          | ۳۹/۵۰          | توان مصرفی در آسیای گلوله‌ای جهت تولید ذرات ریزتر از ۷۴ میکرون (kWh/t)    |
| ۴۶/۰۲          | ۵۸/۵۹          | ۶۱/۵۲          | سهم آسیای نیمه‌خودشکن در تولید ذرات ریزتر از ۷۴ میکرون (%)                |
| ۵۳/۹۸          | ۴۱/۴۱          | ۳۸/۴۸          | سهم آسیای گلوله‌ای در تولید ذرات ریزتر از ۷۴ میکرون (%)                   |
| ۳۳/۱۰          | ۲۹/۸۲          | ۲۸/۹۱          | مقدار متوسط توان مصرفی مدار جهت تولید ذرات ریزتر از ۷۴ میکرون (kWh/t)     |

جدید ضروری است. بدین منظور، داده‌های حاصل از سه عملیات نمونه‌گیری از کل مدار خریدایش مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌های مربوط به نمونه‌گیری‌های اول، دوم، و سوم در جدول ۸ موجود هستند.

جدول (۸) داده‌های حاصل از عملیات نمونه‌گیری اول، دوم و سوم،

جهت اعتبارسنجی مدل

| نمونه‌گیری سوم | نمونه-گیری دوم | نمونه-گیری اول |                                    |
|----------------|----------------|----------------|------------------------------------|
| ۱۸۴/۷          | ۱۵۵/۴          | ۱۸۶/۵          | SPI (min)                          |
| ۰/۸۵۴          | ۰/۶۰۴          | ۰/۴۱۵          | K <sub>80</sub> (mm)               |
| ۳۴۴۰           | ۱۳۷۶           | ۳۱۶۲           | H (h)                              |
| ۵۳۰۰           | ۴۵۶۰           | ۵۰۳۶           | p (kPa)                            |
| ۸/۴۱           | ۸/۹۹           | ۹/۶۰           | P <sub>actual</sub> (kWh/t)        |
| ۹/۶۳           | ۸/۲۶           | ۹/۵۴           | P <sub>predicted</sub> (kWh/t)     |
| ۲۱/۷۸          | ۲۰/۹۵          | ۲۷/۸۷          | P <sub>starkey model</sub> (kWh/t) |
| ۱۵۸/۹۸         | ۱۳۳/۰۴         | ۱۹۰/۳۱         | خطای مدل استارکی (%)               |
| ۱۴/۵۱          | -۸/۱۲          | -۰/۶۳          | خطای مدل جدید (%)                  |

همانطور که از طریق مقایسه مقادیر توان مصرفی ویژه واقعی و پیش‌بینی شده در هر سه نمونه‌گیری مشاهده می‌شود (جدول ۸)، مدل ارائه شده (معادله ۱۲) برای داده‌های جدید نیز از دقت نسبتاً بالایی برخوردار است و به بهترین نحو قادر به پیش‌بینی مصرف توان آسیای نیمه‌خودشکن است (با خطای کوچکی با میانگین ۱/۹۰ درصد و انحراف معیار ۹/۴۰ درصد با فرض توزیع T-student، درحالی‌که مدل SPI استارکی (معادله ۳) به سبب خطای بالای آن (با میانگین ۱۶۰/۷۸ درصد و انحراف معیار ۲۳/۴۲ درصد) نمی‌تواند برای پیش‌بینی مصرف توان آسیای نیمه‌خودشکن کارخانه مس سرچشمه مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۸).

#### ۴- نتیجه‌گیری

تا قبل از انجام این تحقیق روش جامع و کاملی برای محاسبه توان مصرفی آسیاهای نیمه‌خودشکن وجود نداشت. با وجود این تلاش‌های گوناگونی برای یافتن مدلی مناسب جهت

با توجه به جداول ۵، ۶ و ۷ نتایج زیر حاصل می‌شوند:

- نوسان گسترده K<sub>80</sub> سرریز سیکلون (محصول نهایی مدار خریدایش) شرایط ناپایدار خوراک سلول‌های رافر را نشان می‌دهد و می‌تواند تمام فرآیند فلوتاسیون را تحت تأثیر قرار دهد.

- میزان بار درگردش آسیای گلوله‌ای در نمونه‌گیری دوم بسیار غیر منطقی است. علت آن می‌تواند به فشار بسیار اندک سیکلون‌ها نسبت داده شود. به عبارت دیگر، فشار پایین سیکلون‌ها سبب می‌شود که بخش اعظم خوراک سیکلون‌ها به صورت مدار کوتاه به ته ریز وارد شده و جدایش تنها روی بخش اندکی از خوراک انجام شود.
- علت کاهش کارایی آسیای گلوله‌ای در طی نمونه‌گیری دوم افزایش میزان بار درگردش است، که سبب افزایش اندیس کار عملیاتی و در نتیجه کاهش کارایی آسیای گلوله‌ای می‌شود.

- سهم آسیای نیمه‌خودشکن در تولید ذرات ریزتر از ۷۴ میکرون در نمونه‌گیری سوم در مقایسه با دو نمونه‌گیری دیگر بسیار کمتر است. علت آن می‌تواند به وجود نرمة بیشتر در خوراک ورودی به آسیای نیمه‌خودشکن در این نمونه در مقایسه با دو نمونه دیگر نسبت داده شود.

- توان مصرفی آسیای گلوله‌ای جهت تولید یک تن از ذرات ریزتر از ۷۴ میکرون در طی نمونه‌گیری سوم بسیار کمتر از دو نمونه‌گیری دیگر است. علت آن می‌تواند به K<sub>80</sub> درشت تر ته ریز سیکلون در این نمونه در مقایسه با دو نمونه دیگر نسبت داده شود.

- توان مصرفی آسیای نیمه‌خودشکن جهت تولید یک تن از ذرات ریزتر از ۷۴ میکرون در طی نمونه‌گیری سوم بسیار بالاتر از دو نمونه‌گیری دیگر است. علت آن می‌تواند به نرخ بالاتر جریان آسیای نیمه‌خودشکن در این نمونه در مقایسه با دو نمونه دیگر نسبت داده شود.

#### ۳-۳- اعتبارسنجی مدل

به منظور اعتبارسنجی مدل ارائه شده برای مجتمع مس سرچشمه (معادله ۱۲)، بررسی توانایی این مدل جهت پیش‌بینی مصرف توان آسیای نیمه‌خودشکن برای داده‌های

قادر به پیش‌بینی مصرف توان آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع مس سرچشمه است (با خطای کوچکی با میانگین  $1/90$  درصد و انحراف معیار  $9/40$  درصد)، درحالی‌که مدل استارکی به سبب خطای بالای آن (با میانگین  $160/78$  درصد و انحراف معیار  $23/42$  درصد) نمی‌تواند جهت این منظور مورد استفاده قرار گیرد. ضمناً نتیجه‌گیری‌های زیر از طریق میانگین‌گیری از نتایج حاصل از سه عملیات نمونه‌گیری به دست آمدند:

- متوسط سهم توان مصرفی آسیاهای نیمه‌خودشکن و گلوله‌ای از کل توان مصرفی در آسیاها به ترتیب  $48/37$  درصد و  $51/63$  بود. به طور کلی مصرف توان آسیای گلوله‌ای حدود  $3/26$  درصد بیشتر از آسیای نیمه‌خودشکن بود.

- متوسط سهم آسیاهای نیمه‌خودشکن و گلوله‌ای در تولید محصول نهایی (ذرات ریزتر از  $74$  میکرون) به ترتیب  $55/38$  درصد و  $44/62$  درصد بود. یعنی آسیای نیمه‌خودشکن حدود  $10/76$  درصد بیشتر از آسیای گلوله‌ای در تولید محصول نهایی نقش دارد.

- متوسط توان مصرفی در آسیاهای نیمه‌خودشکن و گلوله‌ای جهت تولید یک تن از محصول نهایی به ترتیب  $27/56$  kWh/t و  $43/33$  (درصد) و  $36/05$  kWh/t و  $56/67$  (درصد) بود. به عبارت دیگر آسیای گلوله‌ای حدود  $8/49$  (درصد) بیشتر از آسیای نیمه‌خودشکن در تولید محصول نهایی توان مصرف می‌کند.

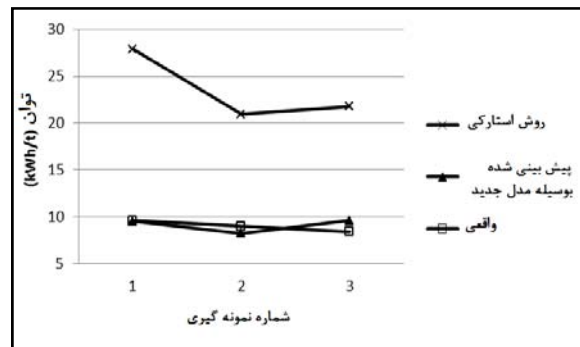
- متوسط توان مصرفی جهت تولید یک تن از محصول نهایی  $30/61$  kWh/t بود.

## تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت‌های مالی و معنوی واحد تحقیق و توسعه مجتمع مس سرچشمه انجام گرفت. لذا بدین وسیله از کمک‌های فراوان آن‌ها صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

## مراجع

- [1] T.J. Napier-Munn, S. Morrell, R.D. Morrison, and T. Kojovic (1996) "Mineral Comminution Circuits, Their Operation and Optimization", *JK Mineral Research Center, Australia*, 111 – 119.
- [2] A.J. Lynch (1997) "Mineral Crushing and Grinding Circuits, Their Operation and Optimization, Design and Control", *Elsevier, New York*, 65 – 107.



شکل (۸) مقایسه بین داده‌های پیش‌بینی شده بوسیله مدل استارکی و مدل جدید ارائه شده

پیش‌بینی توان مصرفی این آسیا توسط افراد گوناگون انجام شده است (معادلات ۱، ۲ و ۳).

مدل ارائه شده در معادله ۱ دارای این نقیصه است که نقش فاکتور SPI نسبت به سه پارامتر دیگر موجود در مدل بسیار کم‌رنگ است. فرمول ارائه شده در معادله ۲ نیز تنها نقش فاکتور فشار ترانسیون را در نظر گرفته است و از نقش سه پارامتر دیگر غافل بوده است. فرمول ارائه شده در معادله ۳ نیز تنها برای موارد خاصی معتبر است و نقش پارامترهای مربوط به تابع انتخاب در این مدل نادیده گرفته شده است. اما در این پژوهش، با استفاده از پارامترهای مربوط به تابع شکست SPI و  $K_{80}$  و تابع انتخاب (H و p) برای نخستین بار مدلی جامع و کامل برای محاسبه توان مصرفی آسیاهای نیمه‌خودشکن ارائه شد، که مشکلات موجود در دیگر مدل‌ها به هیچ وجه در این مدل وجود ندارد و در عین حال برای هر کارخانه و مداری قابل کاربرد است (معادله ۱۱). همچنین با استفاده از نتایج به دست آمده از هشت عملیات نمونه‌گیری از مدار آسیای نیمه‌خودشکن (سیستم ۱) و نیز استفاده از آزمایش SPI، مدلی تجربی جهت پیش‌بینی مصرف توان آسیای نیمه-خودشکن مجتمع مس سرچشمه ارائه شد (معادله ۱۲). به منظور اعتبارسنجی این مدل، سه عملیات نمونه‌گیری از کل مدار خردایش در زمان‌ها و شرایط عملیاتی متفاوت انجام شد. همچنین به منظور محاسبه سهم هر یک از آسیاهای نیمه‌خودشکن و گلوله‌ای در مصرف توان و تولید محصول مناسب برای فرایند فلوتاسیون، کارآیی سرندهای ارتعاشی، آسیای گلوله‌ای (سیستم ۲)، و هیدروسیکلون‌ها در طی این سه عملیات نمونه‌گیری محاسبه شد. به منظور محاسبه کارآیی آسیای گلوله‌ای، روش اندیس کار باند مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل ارائه شده به بهترین نحو

- [10] S. Banisi, and M. Hadizadeh (2006) "3-D liner wear profile measurement and analysis in industrial SAG mills", *Minerals Engineering*, 20, 132–139.
- [11] J. Starkey, and G. Dobby (1996) "Application of the MinnovEX SAG power index at five Canadian SAG plants", *Int. Autogenous and Semi-autogenous Grinding Technology*, Vancouver, Oct. 6 – 9, Vol. 1, pp. 345–360.
- [12] J. Starkey (2006) "Accurate, economical grinding circuit design using SPI and Bond", *Starkey & Associates 336-268 Lakeshore Road East, Oakville, Ontario L6J 7S4*.
- [13] J. Starkey, S. Hindstrom, and G. Nadasdy (2006) "SAGDesign Testing – What it is and why it works", *department of mining engineering, university of British Columbia, Vancouver, B. C., Canada*.
- [14] J.H. Starkey, D. Meadows, P. Thompson, and A. Senchenko (2009) "SAGDesign testing review – case studies", *Starkey & Associates 212-151 Randall St. Oakville, ON L6J 1P5, Canada*.
- [15] J. Starkey (2009) "New discoveries in the relationship between macro and micro grindability", *Starkey & Associates Inc. and Mike Samuels, Fortune Minerals Limited, Paper for the CIM AGM, Toronto, ON May 13*.
- [16] M. Jahani, M. Noaparast, A. Farzanegan, and G. Langarizageh (2011) "Application of SPI for modeling energy consumption in Sarcheshmeh SAG and ball mills", *Journal of Mining & Environment (JME)*, Vol.2, No.1, 27 – 40.
- [17] بی نام (۱۹۹۸) "گزارش Metso از آزمایش‌های انجام شده بر روی سنگ معدن مس سرچشمه جهت انتخاب تجهیزات برای طرح توسعه کارخانه تغلیظ"، کرمان، ایران.
- [18] C.A. Rowland (1998) "Using the Bond Work Index to measure operating comminution efficiency", *Minerals & Metallurgical Processing*, Vol. 15 No.4, pp. 32–36.
- [3] B.A. Wills, and T.J. Napier-Munn (2006) "Mineral Processing Technology", Seventh Edition, *Elsevier Science & Technology Books*, 146 – 185.
- [4] A.L. Mular, D.N. Halbe, and D.J. Barratt (2002) "Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control" Vol. 1, *SME*, Littleton, Colorado, USA, 537 – 864.
- [۵] ابراهیم عظیمی (۱۳۸۵) "بررسی کارایی مدار آسیاکنی کارخانه پرعیارکنی جدید مجتمع مس سرچشمه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی فرآوری مواد معدنی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.
- [۶] مصطفی پایمرد (۱۳۸۶) "تعیین میزان بهینه گلوله به آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
- [۷] محمد جهانی (۱۳۸۸) "بررسی مصرف انرژی در آسیاهای نیمه‌خودشکن و گلوله‌ای کارخانه پرعیارکنی ۲ مجتمع مس سرچشمه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- [۸] مهدی هادی‌زاده (۱۳۸۵) "بررسی میزان و نحوه سایش آستر در آسیای نیمه خودشکن کارخانه جدید پرعیارکنی مجتمع مس سرچشمه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی فرآوری مواد معدنی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.
- [9] M. Yahyaee, S. Banisi, and M. Hadizadeh (2009) "Modification of SAG mill liner shape based on 3-D liner wear profile measurements", *International Journal of Mineral Processing*, 91, 111–115.

## Modeling of Power Consumption of the SAG Mill of Concentrator Plant 2 of Sarcheshmeh Copper Complex Using the SPI Method

M. Jahani<sup>1</sup>, M. Noaparast<sup>2,\*</sup>, A. Farzanegan<sup>1</sup>, G. Langarizadeh<sup>2</sup>

1. School of Mining Engineering, University college of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. School of Mining Engineering, University college of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
3. Senior Expert, National Iranian Copper Industries Company, Kerman, Iran.

---

### ABSTRACT

Considering high power draw of SAG mills, prediction of their power consumption is of specific importance. At the present moment, there is not a comprehensive method for calculating power consumption of SAG mills. However, different attempts have been made by Starkey to find an appropriate model to predict their power consumption. Thus, the aim of this research is to find a suitable and comprehensive model for prediction of SAG mill power consumption. In this research, using results obtained from eight sampling campaigns from the SAG mill circuit as well as using the SPI test, an empirical model for prediction of power consumption of the SAG mill of Sarcheshmeh Copper Complex was presented. To validate the model, three sampling campaigns from the entire comminution circuit, under different operational conditions and at different times, were conducted. Results showed that the presented new model is best able to predict SAG mill power consumption with a small error,  $\bar{X} = 1.90\%$  and  $S = 9.40\%$ .

---

### ARTICLE INFO

Article history:  
Received: 31 May 2012  
Received in revised form: 25 Sep 2012  
Accepted: 8 Oct 2012

---

Key words:  
Modeling,  
Power consumption  
SAG mills  
SPI  
Sarcheshmeh Copper  
Complex

---

All right reserved.

---

\* Corresponding author