

ارائه مدل پیش‌بینی میزان سایش آسترهای جداره آسیاهای نیمه خود شکن سرچشمه و گل‌گهر

الهام نعمت‌اللهی^۱، زهرا بی‌باک^۲، مصطفی مالکی‌مقدم^۳ و صمد بنیسی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی فرآوری مواد معدنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان Nematollahi@kmpc.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی فرآوری مواد معدنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان Bibak@kmpc.ir

۳- استادیار بخش مهندسی معدن، دانشگاه ولی عصر رفسنجان Maleki@kmpc.ir

۴- استاد بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان Banisi@mail.uk.ac.ir

(دریافت ۶ بهمن ۱۳۹۳، پذیرش ۲ آذر ۱۳۹۴)

چکیده

امروزه در کارخانه‌های فرآوری اغلب از آسیاهای نیمه‌خودشکن ظرفیت بالا استفاده می‌شود و چون توقف این آسیاها باعث قطع تولید می‌شود، زمان در دسترس بودن این تجهیزات از اهمیت بالایی برخوردار است. در نتیجه، دسترسی به مدل‌هایی با توانایی پیش‌بینی عمر آسترها جهت تعیین زمان دقیق تعویض آن‌ها می‌تواند در افزایش کارایی عملیات نقش بسزایی ایفا نماید. تاکنون مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی سایش آسترها پیشنهاد شده که معمولاً قابل کاربرد برای یک شرایط خاص می‌باشند و عمدتاً بر اساس برآزش داده‌های حاصل از اندازه‌گیری سایش بدست آمده‌اند. در این پژوهش، یک مدل پدیده‌شناختی که امکان پیش‌بینی سایش آسترها بر پایه پارامترهای اساسی مانند شرایط عملیاتی، سختی آستر، فشار وارد بر بالابرها، سرعت نسبی ذرات و جداره آسیا را دارد، بر اساس شکل واقعی بار در آسیا ارائه شد. با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری صنعتی روند سایش آسترهای جداره آسیاهای نیمه‌خودشکن مس سرچشمه و شرکت گل‌گهر، مدل، کالیبره و اعتبارسنجی گردید. نتایج اعتبارسنجی، نشان داد که مدل تطابق خوبی با اندازه‌گیری‌های صنعتی سایش آسترهای آسیاهای نیمه‌خودشکن سرچشمه ($R^2 = 0/94$) و گل‌گهر ($R^2 = 0/97$) داشت.

کلمات کلیدی

آسیای نیمه‌خودشکن، آستر، سایش، شکل واقعی بار، سرچشمه، گل‌گهر.

۱- مقدمه

اطلاع از میزان و نحوه سایش آستر نه تنها باعث پیش‌بینی دقیق‌تر عمر آن برای جلوگیری از توقفات ناگهانی در خط تولید کارخانه‌های فرآوری - که عموماً فقط از یک آسیای بزرگ استفاده می‌کنند- می‌شود، بلکه راهکارهایی را جهت رفع عیب‌های آستر و ارائه طرح مناسب آن فراهم می‌کند [۲،۱].

پیش‌بینی تغییر تدریجی پروفیل آستر (سایش) بسیار پیچیده‌تر از پیش‌بینی شکل بار است، از دلایل این امر، عدم شناخت کامل مکانیزم سایش آستر و نیز تأثیر تغییر شرایط عملیاتی مانند میزان ساینده‌ی کانه و پارامترهای عملیاتی آسیا بر نرخ سایش آسترها می‌باشند [۴،۳]. سایش، یک فرآیند ترکیبی است که سه مکانیزم اصلی در آن دخیل هستند [۵،۳]:

- برداشته شدن لایه از سطح بر اثر لغزش ذرات روی آن (سایش)^۱
- ضربه^۲
- خوردگی^۳

سهم هر یک از مکانیزم‌های فوق در نرخ سایش نهایی، به طور دقیق مشخص نیست، اما در آسیایی که با شرایط خردایش مطلوب (برخورد ذرات به پاشنه بار، نه به آستر) و برداشته شدن لایه از سطح بر اثر لغزش ذرات روی آن (سایش) می‌باشد، سهم خوردگی و ضربه بسیار کم است.

با توجه به اینکه سهم مکانیزم خوردگی در سایش آستر کم است، معمولاً بر اساس اصل ساده‌سازی، در بسیاری از روابط پیش‌بینی میزان سایش آسترها از این مکانیزم صرف‌نظر می‌شود؛ اما آنچه که میزان سایش آستر در آسیاکنی تر را نسبت به آسیاکنی خشک افزایش می‌دهد [۴] جریان‌یافتگی بیشتر ذرات در فضای آسیا (بیشتر بودن حجم مؤثر آسیاکنی) نسبت به شرایط خشک است.

از سال ۱۹۵۰ تاکنون، مدل‌های سایش زیادی در صنعت فرآوری مواد معدنی ارائه شده است [۳-۱۷،۱-۶] که می‌توان آن‌ها را در دو دسته کلی جای داد:

- تجربی

- پدیده‌شناختی (از مدل‌های بنیادی تا شبه‌تجربی)

مدل‌های تجربی سایش با رگرسیون نتایج آزمایشگاهی یا صنعتی بدست می‌آیند [۱۷،۲۰،۱۲،۱۴]. از جمله مدل‌های تجربی ارائه شده در زمینه سایش، می‌توان به مدل آزمایشگاهی و کوچک‌مقیاس رادزویسکی^۴، اشاره کرد [۶]. تعمیم دادن نتایج این‌گونه مدل‌ها به آسیاهای صنعتی بزرگ‌مقیاس با ابهام زیادی روبروست، اما آن‌ها می‌توانند تصویر خوبی از فرآیند سایش را برای ارائه بعضی از مدل‌های پدیده‌شناختی فراهم کنند.

دسته دیگر از مدل‌های تجربی سایش، مدل‌هایی هستند که بر پایه تلاش‌های صنعتی برای ارزیابی سایش آستر در طول زمان عملیاتی ارائه شده‌اند [۱۷،۲۰،۱]. بنیسی و همکاران با استفاده از یک ابزار اندازه‌گیری، روند سایش در آسترهای جداره آسیای نیمه‌خودشکن مس سرچشمه را در طول مدت عمر آن‌ها بررسی کرده و با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی، تغییر جرم آسترهای جداره بر اثر سایش را بررسی کردند [۱۷]. از محدودیت‌های روش اندازه‌گیری صنعتی برای پیش‌بینی سایش، می‌توان نیاز به خاموشی آسیا، زمان طولانی جهت جمع‌آوری اطلاعات و نیز هزینه بالا اشاره کرد.

در مدل‌های پدیده‌شناختی سایش، محقق با در نظر گرفتن یک سری پارامترهای مؤثر بر سایش، اقدام به ارائه یک رابطه می‌نماید و به منظور تطابق میزان سایش با متغیرهای در نظر گرفته شده، ضرایب تصحیح را در رابطه اعمال می‌کند. مدل‌های پدیده‌شناختی سایش آسترها، توسط محققان زیادی ارائه شده‌اند [۵-۱۶،۷-۱۳].

از جمله مدل‌های پدیده‌شناختی سایش می‌توان به مدل‌های فینی^۵ و بیتر^۶ اشاره کرد [۱۱-۷]. فینی، سایش را تنها ناشی از برداشته شدن لایه از سطح آستر (خراشیده شدن) می‌داند. ولی در مدل بیتر، با توجه به اینکه انرژی وارد بر آستر تنها صرف برداشته شدن لایه از سطح آن نمی‌شود، بلکه بخشی از انرژی صرف لهیدگی (تغییر شکل) سطح می‌گردد، هر دو مکانیزم برداشته شدن لایه از سطح و لهیدگی در نظر گرفته شده است. در این مدل فرض بر این است که این دو مکانیزم،

^۴ Radziszewski

^۵ Finnie

^۶ Bitter

^۱ Abrasion

^۲ Impact

^۳ Corrosion

در نظر گرفته نشده و غیرقابل اندازه‌گیری باشد. در نتیجه، با انحصاری کردن ضریب مدل، تاثیر عوامل اندازه‌گیری نشده، در مدل نادیده گرفته شده‌اند. در پژوهش حاضر، نحوه محاسبه شعاع داخلی بار و میزان نیروی وارد بر آستر در این مدل با توجه به شکل واقعی بار تصحیح شدند. علاوه بر این، با در نظر گرفتن زاویه صفحه بالابر به عنوان مشخصه شکل آستر، روابط مساحت بالابر و سرعت نسبی بین کانه و جداره آسیا نیز تصحیح شدند. همچنین، به دلیل اینکه نمی‌توان در یک مدل تمام پارامترهای مؤثر بر سایش را در نظر گرفت، ضرایب مدل باید بر اساس یک سری داده‌های واقعی محاسبه شوند (کالیبراسیون مدل). در مرحله بعد، با استفاده از ضرایب بدست آمده، نتایج مدل باید با یک سری از داده‌های واقعی جدید مقایسه شوند (اعتبارسنجی مدل). در این پژوهش، با استفاده از دو سری داده‌های واقعی (آهنگ تغییرات ارتفاع آستر و شرایط عملیاتی) از آسیاهای نیمه‌خودشکن مجتمع مس سرچشمه و شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر، مدل کالیبره و اعتبارسنجی شد.

۲- تجهیزات

۲-۱- مشخصات آسیاهای نیمه‌خودشکن

۲-۱-۱- مشخصات آسیاهای نیمه‌خودشکن مجتمع سرچشمه و شرکت گل‌گهر

مشخصات آسیاهای نیمه‌خودشکن مجتمع سرچشمه و شرکت گل‌گهر به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۱. مشخصات آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع سرچشمه

| شعاع مؤثر (m) | طول (m) | سرعت (rpm) | پرشدگی کلی (%) |
|---------------|---------|--------------|----------------|
| ۴٫۸۷۵ | ۴٫۸۷ | ثابت - ۱۰/۵۲ | ۳۰-۳۵ |

جدول ۲. مشخصات آسیای نیمه‌خودشکن شرکت گل‌گهر

| شعاع مؤثر (m) | طول (m) | سرعت (rpm) | پرشدگی کلی (%) |
|---------------|---------|------------|----------------|
| ۴/۵ | ۲/۰۵ | ثابت - ۱۲ | ۱۸-۲۲ |

جداول ۳ و ۴ به ترتیب، شرایط عملیاتی آسیاهای نیمه‌خودشکن مجتمع سرچشمه و شرکت گل‌گهر را نشان می‌دهند.

به صورت هم‌زمان رخ می‌دهند. اساس مدل‌های فینی و بیتتر، بر پایه برخورد تک‌ذره با سطح است که با اعمال ضرایبی، حجم برداشته شده از سطح در اثر برخورد ذره با آن را به جریان ذرات تعمیم می‌دهند که همین امر نتایج مدل را با خطا مواجه می‌سازد. از دیگر محدودیت‌های این مدل‌ها، در نظر گرفتن بسیاری از پارامترهای عملیاتی مؤثر بر سایش است. علاوه بر این، وابسته بودن این مدل‌ها به پارامترهای تجربی که باید به طور پیوسته اندازه‌گیری شوند از نقصان‌های دیگر آنها می‌باشد.

رضایی‌زاده و همکاران [۵]، نیز در پژوهش خود تلاش کردند برای آهنگ تغییرات ارتفاع بالابر، مدلی پدیده‌شناختی بر حسب شکل بار، نیرو، سرعت نسبی بین کانه و جداره آسیا و نیز سختی آستر ارائه کنند. آن‌ها در پژوهش خود، ساینده‌گی ناشی از لغزش ذرات روی سطح آستر را تنها عامل سایش در نظر گرفتند. شکل بار استفاده شده در این مدل، شکل ساده‌شده بار است که با واقعیت تفاوت دارد. از دیگر محدودیت‌های این مدل، ثابت در نظر گرفتن ضریب مدل در تمام شرایط به صورت تابعی از زاویه سایش و ضریب اصطکاک می‌باشد.

نمونه دیگری از مدل‌های پدیده‌شناختی سایش، توسط کالالا^۷ و همکاران [۱۶] ارائه شده است. اساس مدل آن‌ها، استفاده از داده‌های صنعتی (اندازه‌گیری پروفیل آستر نو و ساینده‌شده) و خروجی‌های شبیه‌سازی با روش اجزای گسسته است. در پژوهش آن‌ها، برای سایش آستر در آسیای خشک، سه مکانیزم ساینده‌گی در اثر لغزش ذرات روی سطح، ساینده‌گی در اثر اتصال طولانی مدت ذرات به سطح^۸ و ضربه در نظر گرفته شد.

همان‌گونه که اشاره شد، تاکنون مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی سایش آسترها پیشنهاد شده است. از بین مدل‌های سایش آستر که تاکنون ارائه شده، مدل رضایی‌زاده و همکاران [۵] به دلیل تأثیر دادن شکل بار - که جلوه‌ای مناسب از شرایط عملیاتی مثل سرعت و اندازه آسیا، پرشدگی، مشخصات آستر و ... می‌باشد- مدل مناسبی است اما محدودیت اصلی این مدل، استفاده از شکل ساده شده بار و مقید کردن ضریب مدل به چند پارامتر خاص می‌باشد. شایان ذکر است که ضریب مدل باید در برگزیده تمام عوامل

^۷ Kalala

^۸ Adhesion

دو کارخانه با نرم افزار MB-Ruler، که یک نقاله‌ی دیجیتالی با دقت بالا است، تعیین شدند.



شکل ۱. آسیای آزمایشگاهی با قطر یک متر

۲-۲-۲ ابزار دستی اندازه‌گیری سایش آستر

در این تحقیق، برای اندازه‌گیری مستقیم الگوی سایش (آهنگ تغییرات ارتفاع) آستر از ابزار اندازه‌گیری دستی (شکل ۲) که توسط بنیسی و همکاران [۱۷] طراحی و ساخته شده بود، استفاده شد. چون برنامه خاموشی آسیا نسبتاً کوتاه است و اندازه‌گیری‌ها باید در کمترین زمان ممکن انجام شوند؛ این وسیله، از جنس آلومینیوم و سبک (با وزن تقریبی ۴ کیلوگرم و قابل حمل توسط یک نفر) طراحی شده است. بخش اصلی این ابزار دارای ۲۵ سوراخ با فواصل مشخص است. در دو انتهای وسیله مورد نظر، دو پایه با طول متغیر نصب شده که در هنگام کار به جدار آسیا می‌چسبند. زمانی که این وسیله در موقعیت مشخصی در طول آستر قرار گرفت، سوزن‌ها شکل مقطع عرضی آستر را در آن نقطه به خود می‌گیرند. سپس وسیله اندازه‌گیری از آستر جدا شده و طول سوزن‌ها یادداشت می‌شوند. بدین ترتیب، پروفیل سایش آستر در زمان‌های مختلف عملیاتی برای آسیاهای سرچشمه و گل‌گهر رسم گردید.

جدول ۳. شرایط عملیاتی و مشخصات آستر آسیای سرچشمه

| | | | |
|-----------------------------------|-----------|-----------------------------|-------|
| $2,8 \text{ (t/m}^3\text{)}$ | ρ_s | ۰,۱ | J_B |
| ۰,۶ | S | ۱ | U |
| ۳۵۰ (Brinell) | H_B | ۰,۴۷ | E |
| $14-30 \text{ (}^\circ\text{)}$ * | φ | $0,152-0,227 \text{ (m)}$ * | H |

جدول ۴. شرایط عملیاتی و مشخصات آستر آسیای گل‌گهر

| | | | |
|----------------------------------|-----------|---------------------|-------|
| $4,3 \text{ (t/m}^3\text{)}$ | ρ_s | ۰-۰,۴ | J_B |
| ۱ | S | ۰ | U |
| ۳۶۰-۳۹۰ (Brinell) * | H_B | ۰,۳ | E |
| $7-30 \text{ (}^\circ\text{)}$ * | φ | $0,225 \text{ (m)}$ | H |

* مقادیر سمت چپ، شرایط عملیاتی مورد استفاده در کالیبراسیون مدل (سری داده‌های شماره ۱، آستر طرح قدیم) و مقادیر سمت راست، شرایط عملیاتی مورد استفاده در اعتبارسنجی مدل (سری داده‌های شماره ۲، آستر طرح جدید) می‌باشند.

۲-۲-۲ مشخصات تجهیزات اندازه‌گیری

۲-۲-۱ آسیای آزمایشگاهی

چون امکان بررسی مستقیم حرکت بار در آسیاهای صنعتی وجود ندارد، این کار با شبیه‌سازی فیزیکی (آزمایشگاهی) یا ریاضی (نرم‌افزاری) انجام می‌شود. در این پژوهش نیز با استفاده از دوربین سرعت بالا و از طریق دیواره شفاف آسیای آزمایشگاهی مرکز تحقیقات کاشی‌گر (شکل ۱) از شکل بار عکسبرداری شد. آسترهای این آسیا به راحتی قابل تعویض بوده و می‌توان با ساخت نمونه‌ای کوچک از آسترهای مورد نظر، آن را در آسیا نصب نمود. شرایط معمول عملیاتی آسیاهای سرچشمه و گل‌گهر (پرشده‌گی، سرعت آسیا و شکل آستر) در آسیای آزمایشگاهی پیاده شد و آزمایش‌ها در حالت‌های مختلف به اجرا درآمدند.

برای تحلیل شکل بار، سه مشخصه موقعیت شانه، نقطه عزیمت پاشنه^۹ و پاشنه بار نیاز است. موقعیت‌های شانه، پاشنه و نقطه عزیمت پاشنه با توجه به شکل بار در آسیای آزمایشگاهی مرکز تحقیقات کاشی‌گر با شرایط معمول کار هر

^۹ Toe Departure

آسیا) و ارتفاع بار روی آسترها در این ناحیه است. بنابراین، بیشترین سایش در ناحیه پاشنه رخ می‌دهد. در شکل ۳، نیرویی که یک المان از بار به بالابر زیر آن در ناحیه پاشنه وارد می‌کند، از مجموع نیروی وزن المان (F_{weight}) و نیروی گریز از مرکز ($F_{c.g.}$) بدست می‌آید [۵] (روابطه ۳ تا ۶).

$$dF = dF_{c.g.} + dF_{weight} \quad (3)$$

$$dF_{c.g.} = r\omega_r^2 \cdot dm \quad (4)$$

$$dF_{weight} = gdm \quad (5)$$

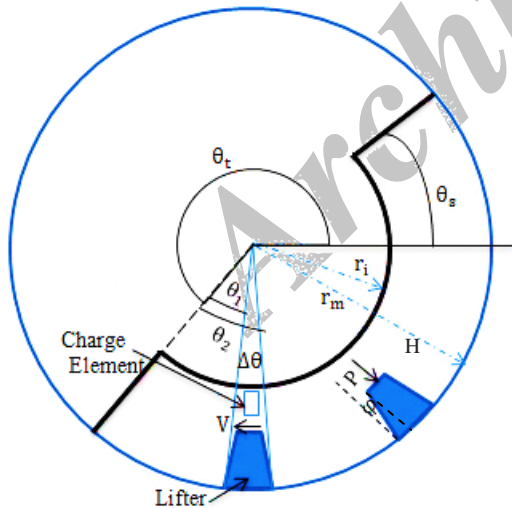
$$dm = \rho dV = \rho Lr \cdot dr \cdot d\theta \quad (6)$$

که در آن‌ها، dm جرم المان بار و g شتاب گرانش می‌باشند. dV حجم المان بار، $d\theta$ زاویه بسط یافتن المان و dr تغییرات شعاع لایه بار است.

با انتگرال‌گیری از مجموع نیروهای وزن المان و گریز از مرکز در محدوده بار، نیروی وارد بر آستر محاسبه می‌شود [۵]. رابطه (۷)، این انتگرال را نشان می‌دهد. N_r ، سرعت چرخشی ذرات در فاصله شعاعی r از مرکز آسیا، از رابطه (۸) محاسبه می‌شود [۱۹].

$$F = \int_{r_i}^{r_m} \int_{\theta_1}^{\theta_2} (L\rho r^2 (2\pi N_r)^2 + L\rho gr) dr \cdot d\theta \quad (7)$$

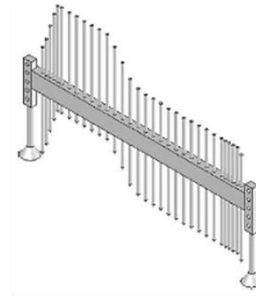
$$N_r = \frac{N_m r_m (r - r_i)}{r(r_m - r_i)} \quad (8)$$



شکل ۳. پارامترهای مؤثر در محاسبه نیروی وارد بر آستر در شکل ساده شده بار

ρ و r_i به ترتیب از روابط (۹) و (۱۰) بدست می‌آیند [۱۹].

$$r_i = r_m \left[1 - \frac{2\pi J_t}{2\pi + \theta_s - \theta_t} \right]^{0.5} \quad (9)$$



شکل ۲. ابزار اندازه‌گیری الگوی سایش آستر [۱۷]

۳- مدل سایش آسترهای آسیاهای گردان

۳-۱- توصیف مدل

در آسیاکنی مطلوب، بار به طور مستقیم به آستر برخورد نکرده و ضربه به آن وارد نمی‌کند و مکانیزم اصلی سایش آستر، لغزش بار روی سطح آستر است. بنابراین، با در نظر گرفتن نیروی گریز از مرکز وارد به بالابرها بر اثر چرخش بار (علاوه بر نیروی وزن بار اعمالی به آن‌ها) و نیز سرعت لغزش ذرات روی آستر، می‌توان تا حد زیادی مکانیزم لغزش را توصیف کرد.

پارامترهای مؤثر در نظر گرفته شده در مدل ارائه شده توسط رضایی‌زاده و همکاران [۵]، نیروی وارد بر سطح آستر یا فشار متوسط (P_{ave})، سرعت لغزش ذرات روی آستر (V)، سختی آستر (H_B) و زمان عملیات آسیا (Δt) می‌باشند.

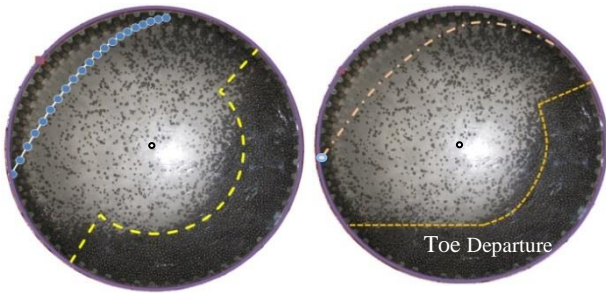
نیروهای گریز از مرکز و وزن بار، نیروهایی هستند که به آسترها وارد می‌شوند و به دلیل تغییر شکل پیوسته آستر در طول زمان عملیات آسیا، فشار اعمالی به آستر، عامل سایش است [۵] (روابط ۱ و ۲).

$$P_{ave} = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$A = (r_m - H)L\Delta\theta \quad (2)$$

که در آن F ، نیروی وارده و A سطحی است که نیرو بر آن وارد شده است.

نیروی وارد بر آستر، بر اساس شکل بار و به روش تحلیلی با انتگرال‌گیری دوگانه از نیروی اعمالی یک المان از بار به بالابر زیر آن (در ناحیه پاشنه) در دو راستای شعاع بار و موقعیت المان محاسبه شده است [۵]. علت انتخاب المان در ناحیه پاشنه، وجود بیشترین سرعت ذرات (برابر با سرعت



(ب) (الف)

شکل ۴. (الف) شکل تصحیح شده بار (هلالی شکل) [۲۰]، (ب) شکل ساده شده بار [۱۹]

تفاوت شکل ساده شده بار و شکل تصحیح شده آن در قسمت خطی شکل بار و به عبارت دیگر، نقطه عزیمت پاشنه بار است. با توجه به اینکه المان انتخاب شده برای محاسبه نیروی وارد بر آستر، در ناحیه پاشنه بار می باشد، باید رابطه ای برای تعیین شعاع داخلی بار در قسمت خطی (r_i در شکل ۵) ارایه شود تا بوسیله آن شعاع داخلی بار تصحیح شود (r_{iC}).

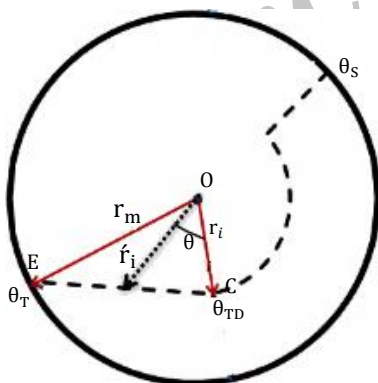
بدین منظور، با توجه به مشخص بودن مختصات قطبی نقاط C و E در شکل ۵، معادله خط EC با استفاده از روابط (۱۴) تا (۱۷) بدست آمد.

$$C (r_i \cos \theta_{TD}, r_i \sin \theta_{TD}) \quad (14)$$

$$E (r_m \cos \theta_t, r_m \sin \theta_t) \quad (15)$$

$$y = r_i \sin \theta, x = r_i \cos \theta \quad (16)$$

$$y - y_E = \frac{y_C - y_E}{x_C - x_E} (x - x_E) \quad (17)$$



شکل ۵. قسمت خطی شکل بار و موقعیت r_i

با استفاده از معادله خط EC، r_i به صورت تابعی از شعاع مؤثر آسیا (r_m)، موقعیت های شانه، نقطه عزیمت پاشنه بار و پاشنه بار، شعاع داخلی بار در قسمت دایروی (r_i) و موقعیت زاویه ای المان بار (θ) بدست آمد (رابطه ۱۸).

$$\rho = \frac{J_t \rho_s (1 - E + EUS) + J_B (\rho_B - \rho_s) (1 - E) + J_t EU (1 - S)}{J_t (1 + E(U - 1))}, U > 1 \quad (10)$$

$$\rho = \frac{J_t \rho_s (1 - E + EUS) + J_B (\rho_B - \rho_s) (1 - E) + J_t EU (1 - S)}{J_t}, U \leq 1$$

همان گونه که گفته شد، سایش وابسته به سرعت نسبی بین جداره آسیا و ذرات است، ولی به دلیل اینکه اندازه گیری سرعت نسبی بین جداره آسیا و ذرات دشوار است، فرض شده که سرعت نسبی برابر با سرعت خطی آسیاست (رابطه ۱۱).

$$V = (r_m - H)\omega \quad (11)$$

پاسخ مدل، تغییرات ارتفاع ماکزیمم آستر (ΔH) است. رابطه (۱۲)، مدل پیش بینی کننده سایش است که در آن، K ضریب مدل می باشد و از رابطه (۱۳) بدست می آید [۵]. رابطه (۱۳)، β ، زاویه سایش ذرات و μ ، ضریب اصطکاک می باشد.

$$\Delta H = K \frac{P_{ave}}{H_B} V \times \Delta t \quad (12)$$

$$K = \frac{\tan(\beta)\mu}{\pi} \quad (13)$$

۲-۲- توسعه مدل

۳-۲-۱- تصحیح شعاع داخلی بار و میزان نیروی وارد بر آستر

از آنجایی که شکل بار متأثر از شرایط عملیاتی آسیاست، در پژوهش حاضر، برای تأثیر دادن بهتر شرایط عملیاتی در محاسبه نیروی وارد بر آستر، از شکل واقعی بار استفاده شد. شکل ساده بار که توسط مورل^۱ در سال ۱۹۹۳ ارایه شده بود [۱۹]، بعدها در سال ۲۰۱۳، توسط مالکی مقدم و همکاران [۲۰] تصحیح شد (شکل ۴)

^۱Morrell

شوند. ضریب اصطکاک (که ثابت نیست و بر اساس پارامترهای دیگر مثل جنس کانه، سرعت آسیا و ... تغییر می‌کند و بدست آوردن آن پیچیدگی‌های خاص خود را دارد) از جمله این عوامل می‌باشد.

برای بدست آوردن ضریب بی‌بعد مدل (K)، دو طرف رابطه ۱۲ (ΔH و $\frac{P_{ave}}{H_B} V \times \Delta t$) لازم بود مقادیر ΔH برای آسیاهای نیمه‌خودشکن سرچشمه و گل‌گهر از طریق شکل‌های ۶ و ۷ بر اساس تفاضل ماکزیمم ارتفاع در هر زمان عملیاتی (Δt) از ماکزیمم ارتفاع اولیه (زمانی که آستر نو است، زمان صفر) بدست آید و برای محاسبه مقادیر فشار وارد بر آستر و سرعت خطی آسیا، از جداول ۱ تا ۴ مورد استفاده قرار گیرد. چون به تعداد زمان‌های عملیاتی، ضریب K بدست می‌آید از این ضرایب، میانگین‌گیری شد و به عنوان ضریب مدل معرفی گردید.

۳-۴- اعتبارسنجی مدل

در این تحقیق، از دو سری داده‌های واقعی، یک سری برای کالیبراسیون مدل و سری دیگر برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد.

برای اعتبارسنجی، با داشتن ضریب مدل (از مرحله کالیبراسیون) و محاسبه طرف دوم رابطه ۱۲ تصحیح‌شده، مقدار ΔH مدل بدست آمد. این مقادیر ΔH با مقادیر داده‌های صنعتی سری دوم مقایسه شد و با توجه به ضریب قطعیت، قدرت مدل تصحیح‌شده در پیش‌بینی تغییرات ارتفاع ماکزیمم آستر در طول زمان عملیات مشخص گردید. برای محاسبه طرف دوم مدل ($\frac{P_{ave}}{H_B} V \times \Delta t$) از جداول ۱ تا ۴ استفاده شد.

$$\dot{r}_i = \frac{r_m^2 \sin \theta_t \cos \theta_{TD} + r_i \sin \theta_t (A)}{\sin \theta (B) + \cos \theta (C)}; \quad (18)$$

$$A = r_i \sin \theta_{TD} - r_m (\cos \theta_{TD} - \cos \theta_t);$$

$$B = r_m \cos \theta_t - r_i \cos \theta_{TD};$$

$$C = r_i \sin \theta_{TD} - r_m \sin \theta_t$$

با متوسط‌گیری از نسبت $\frac{\dot{r}_i}{r_i}$ در زوایای نزدیک به نقطه عزیمت پاشنه بار (به دلیل المان‌گیری در ناحیه پاشنه بار و اینکه قسمت خطی شکل بار از این نقطه آغاز می‌شود)، r_{iC} طبق رابطه زیر بدست آمد.

$$r_{iC} = \left(\frac{\dot{r}_i}{r_i} \right)_{ave} \times r_i \quad (19)$$

بنابراین، کران پایین حد اول انتگرال‌گیری (r_{iC}) در رابطه (۷) تصحیح شد (رابطه ۲۰).

$$F = \int_{r_{iC}}^{r_m} \int_{\theta_1}^{\theta_2} (L\rho r^2 (2\pi N_r)^2 + L\rho gr) dr. d\theta \quad (20)$$

۳-۲-۲- تصحیح رابطه سرعت خطی آسیا و مساحت بالابر

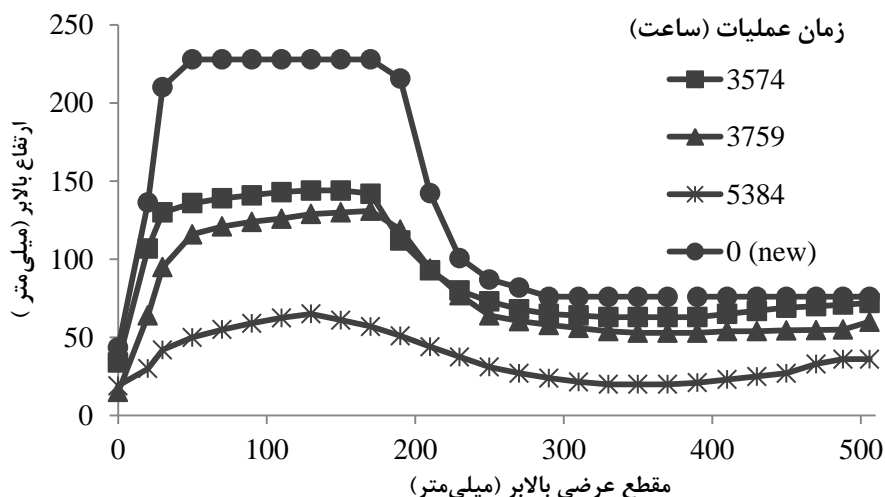
با توجه به مشخصات آستر (ارتفاع و زاویه بالابر در شکل ۳)، روابط سرعت خطی آسیا و مساحت بالابر تصحیح شدند (روابط ۲۱ و ۲۲).

$$V = \left(r_m - \frac{H}{\cos \varphi} \right) \omega \quad (21)$$

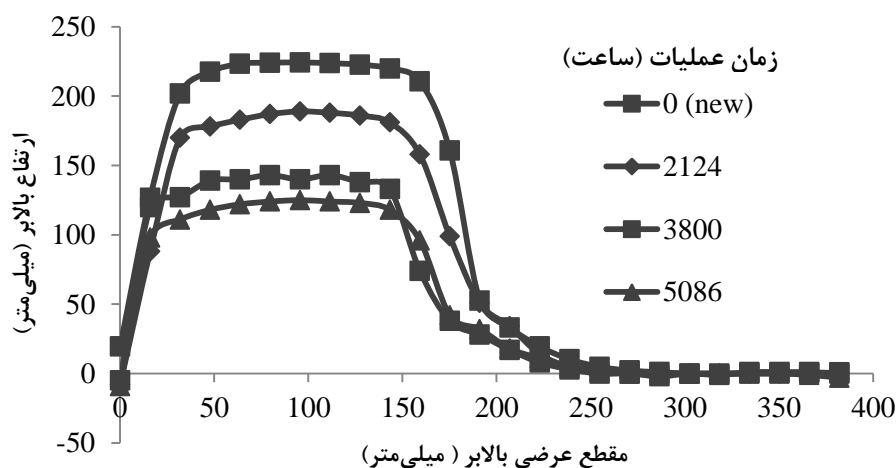
$$A = \left(r_m - \frac{H}{\cos \varphi} \right) L \Delta \theta \quad (22)$$

۳-۳- کالیبراسیون مدل

عموماً از سری عوامل تأثیرگذار بر هر فرآیند تعدادی از آن‌ها یا قابل اندازه‌گیری نیستند و یا به دلیل خودشان نیز تابع عوامل دیگر هستند و مقدار آن‌ها در طول فرآیند ثابت نیست، اندازه‌گیری آن‌ها بسیار دشوار است. در نتیجه، در ارابه یک مدل برای پیش‌بینی یک متغیر باید ضریب یا ضرایبی (در برگزیده تمام پارامترهای در نظر گرفته نشده) در مدل اعمال



شکل ۶. روند سایش آستر طرح قدیم آسیای نیمه خودشکن سرچشمه در طول زمان عملیات (با ارتفاع کفشک)



شکل ۷. روند سایش آستر طرح قدیم آسیای نیمه خودشکن گل گهر در طول زمان عملیات (بدون ارتفاع کفشک)

خشک (گل گهر) را تا حد زیادی به جریان یافتگی بیشتر ذرات در فضای آسیا (بیشتر بودن حجم مؤثر آسیاکنی) نسبت به شرایط خشک، ارتباط داد. یکی از دلایل کم بودن سایش در آسیاهای خشک نسبت به تر محدوده بسیار کم حرکت مواد به واسطه کارایی کم هوا نسبت به آب در انتقال مواد می باشد. شایان ذکر است، اعداد کوچک به دست آمده برای ضرایب، به دلیل سایش بسیار کم (میلی متری) در مقایسه با واحد زمان عملیاتی (ساعت) می باشد.

۴-۲-۴- اعتبارسنجی مدل سایش

با استفاده از ضریب بدست آمده از کالیبراسیون مدل با داده‌های مربوط به آسیای سرچشمه، تغییرات ارتفاع ماکزیمم آستر طرح جدید این آسیا، پیش‌بینی و با مقادیر واقعی اندازه‌گیری‌های صنعتی سری دوم سایش آستر که در

۴-ارایه و تحلیل نتایج

۴-۱- کالیبراسیون مدل سایش

ضریب مدل برای روند سایش آسترهای جداره مجتمع سرچشمه و شرکت گل گهر، به ترتیب 0.0003 و 0.0002 بدست آمد. بزرگتر بودن ضریب بی بعد مدل برای آسیای تر سرچشمه نسبت به آسیای خشک گل گهر را تا حد کمی می توان به مکانیزم خوردگی ارتباط داد؛ چون این مکانیزم تنها موردی نیست که باعث بزرگتر شدن این ضریب برای آسیای سرچشمه شده است، بلکه می توان بیشتر بودن میزان سایش آستر در آسیاکنی تر (سرچشمه) نسبت به آسیاکنی

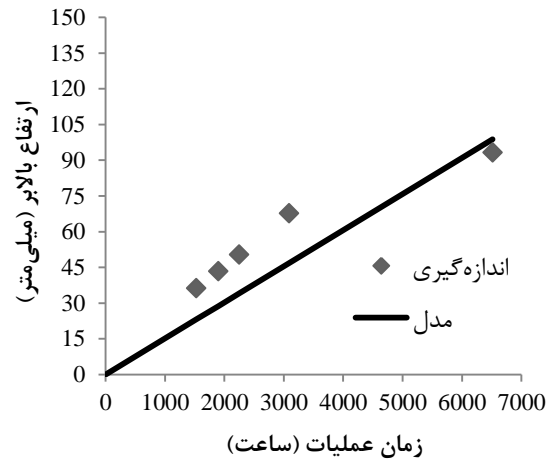
نتیجه‌گیری

- رابطه‌ای برای شعاع داخلی بار در آسیاهای گردان در قسمت خطی شکل بار ارایه شد و شعاع داخلی بار تصحیح گردید.
- مدلی جهت پیش‌بینی میزان سایش آستر بر پایه شکل بار، با تصحیح میزان نیروی وارد بر آستر، معرفی شد.
- با استفاده از اندازه‌گیری‌های صنعتی، مدل ارایه شده، کالیبره و اعتبارسنجی گردید.
- نتایج مقایسه اندازه‌گیری‌های صنعتی و مقادیر بدست آمده از مدل، نشان داد که مدل تطابق خوبی با اندازه‌گیری‌های صنعتی مجتمع سرچشمه ($R^2 = 0/94$) و شرکت گل‌گهر ($R^2 = 0/97$) داشت.

تقدیر و تشکر

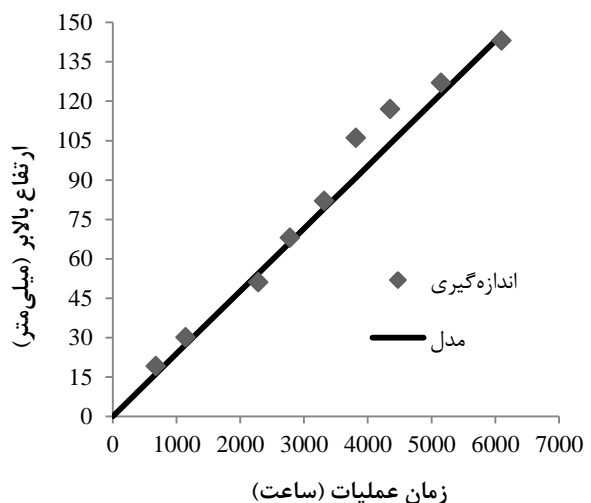
بدینوسیله از تمامی پرسنل محترم مجتمع مس سرچشمه و شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر به دلیل همکاری در اجرای این تحقیق و اجازه انتشار نتایج آن تشکر به عمل می‌آید. نویسندگان، از اعضای محترم مرکز تحقیقات کاشی‌گر که بدون تلاش‌های ایشان در جمع‌آوری داده‌های صنعتی، پیشبرد این پژوهش ممکن نبود، کمال تشکر را دارند.

محاسبه ضریب به کار گرفته نشده بودند، مقایسه شد. اعتبارسنجی مدل با داده‌های صنعتی آسیای نیمه‌خودشکن سرچشمه، نشان داد که مدل سازگاری خوبی ($R^2 = 0/94$) با اندازه‌گیری‌های صنعتی دارد.



شکل ۸. مقایسه پیش‌بینی مدل با داده‌های اندازه‌گیری سایش آستر طرح جدید آسیای نیمه‌خودشکن مس سرچشمه

با استفاده از ضریب بدست آمده از کالیبراسیون مدل با داده‌های مربوط به آسیای گل‌گهر، تغییرات ارتفاع بیشینه در آستر طرح جدید این آسیا، پیش‌بینی و با مقادیر واقعی اندازه‌گیری‌های صنعتی مقایسه شد. این مقایسه نشان داد که مدل با توجه به پارامترهای در نظر گرفته شده، می‌تواند تغییرات ارتفاع این آسترها در طول زمان عملیات را با دقت ۹۷ درصد پیش‌بینی نماید.



شکل ۹. مقایسه پیش‌بینی مدل با داده‌های اندازه‌گیری سایش آستر طرح جدید آسیای نیمه‌خودشکن شرکت گل‌گهر

فهرست علائم مورد استفاده در روابط و شکل‌ها

| | | | |
|------------|---|---------------|--|
| V | سرعت لغزشی ذرات روی بالابر (m/s) | P_{ave} | فشار متوسط اعمالی به بالابر (kPa) |
| Δt | زمان عملیات آسیا (h) | H_B | سختی آستر ($Brinnell \sim N/mm^2$) |
| ρ | دانسیته بار (t/m^3) | L | طول مؤثر آسیا (m) |
| N_r | سرعت چرخش بار (RPM) | r | فاصله شعاعی المان از مرکز آسیا (m) |
| θ_t | جابجایی زاویه‌ای موقعیت پاشنه بار (rad) | θ_s | جابجایی زاویه‌ای موقعیت شانه بار (rad) |
| r_m | شعاع داخلی (مؤثر) آسیا (m) | r_i | شعاع داخلی بار (m) |
| φ | زاویه صفحه بالابر نسبت به قائم ($^\circ$) | θ | موقعیت زاویه‌ای المان بار (rad) |
| ρ_s | دانسیته کانه (t/m^3) | J_t | کسری از حجم اشغال شده آسیا توسط کانه و گلوله |
| U | کسری از حجم اشغال شده بار توسط پالپ | E | کسر تخلخل بار |
| J_B | کسری از حجم اشغال شده آسیا توسط گلوله | S | کسر محتوای جامد پالپ خروجی |
| N_m | سرعت آسیا (RPM) | ρ_B | دانسیته گلوله (t/m^3) |
| r_i | شعاع داخلی قسمت خطی شکل تصحیح شده بار (m) | θ_{TD} | جابجایی زاویه‌ای نقطه عزیمت پاشنه (rad) |
| ω | سرعت زاویه‌ای آسیا (rad/s) | H | ارتفاع بالابر (m) |
| K | ضریب بی بعد مدل سایش | A | مساحت بالای بالابر (m^2) |

مراجع

of Ductile Metals by Angular Abrasive", *Wear*, 152, 91-98.

[12] Rabinowicz, E.; 1996; "*Friction and wear of materials*", second ed. John Wiley & Sons, Toronto.

[13] Gore, G.J., Gates, J.D.; 1997; "*Effect of hardness on three very different forms of wear*", *Wear*, 203-204, 544-563.

[14] Radziszewski, P.; 2002; "*Exploring steel media wear*", *Minerals Engineering*, 15, 1073-1087.

[15] Eltobgy, M.S.; 2003; "*Finite Element Modeling of Erosive Wear*", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45, 1337-1346.

[16] Kalala, J.T., Bwalya, M.M. & Moys, M.H.; 2005; "*Discrete Element Method (DEM) Modelling of Evolving Mill Liner Profiles due to Wear. Part II. Industrial Case Study*". *Minerals Engineering*, 18, 1392-1397.

[17] Banisi, S. & Hadizadeh, M.; 2007; "*3-D Lifter Wear Profile Measurement and Analysis in Industrial SAG Mills*", *Minerals Engineering*, 20, 132-139.

[18] Yahyaei, M. & Banisi, S.; 2010; "*Spreadsheet-Based Modeling of Liner Wear Impact on Charge Motion in Tumbling Mills*", *Minerals Engineering*, 23, 1213-1219.

[19] Morrell, S.; 1993; "*The prediction of power draw in wet tumbling mills*", *Doctorate Thesis*, University of Queensland, Australia.

[20] Maleki-Moghaddam, M.; Yahyaei, M.; Banisi, S.; 2013, "*A method to predict shape and trajectory of charge in industrial mills*", *Minerals Engineering*, 46-47, 157-166.

[1] Chandramohan, R. & Powell, M.S.; 2006; "*A Structured Approach to Modeling SAG Mill Liner Wear – Monitoring Wear*", *International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology*, 3, 133-146.

[2] Yahyaei, M.; Banisi, S.; & Hadizadeh, M.; 2009, "*Modification of SAG Mill Liner Shape Based on 3-D Liner Wear Profile Measurements*", *International Journal of Mineral Processing*, 91, 111-115.

[3] McBride, A. & Powell, M.S.; 2006; "*A Structured Approach to Modelling SAG Mill Liner Wear – Numerical Modelling of Liner Evolution*", *International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology*, 3, 120-132.

[4] Rezaeizadeh, M., Fooladi, M., Powell, M.S. & Weerasekara, N.S.; 2010; "*An Experimental Investigation of the Effects of Operating Parameters on the Wear of Lifters in Tumbling Mills*", *Minerals Engineering*, 23, 558-562.

[5] Rezaeizadeh, M., Fooladi, M., Powell, M.S., Mansouri, S.H. & Weerasekara, N.S.; 2010; "*A New Predictive Model of Lifter Bar Wear in Mills*", *Minerals Engineering*, 23, 1174-1181.

[6] Radziszewski, P., Varadi, R. & Chenje, T.; 2005; "*Tumbling Mill steel Media Abrasion Wear Test*"

[7] Finnie, I.; 1958; "*The Mechanism of Erosion of Ductile Metals*", In *Congress of Applied Mechanics*, New York.

[8] Finnie, I.; 1960; "*Erosion of Surfaces by Solid Particles*", *Wear*, 3, 87-103.

[9] Bitter, J.; 1963; "*A Study of Erosion Phenomena, Part I*", *Wear*, 6, 5-21.

[10] Bitter, J.; 1963; "*A Study of Erosion Phenomena, Part II*", *Wear*, 8, 161-190.

[11] Finnie, I., Stevick, G.R. & Ridgeley R.J.; 1992; "*The Influence of Impingement Angle on the Erosion*"