

# راهنمای جدید بهینه‌سازی سایش سیمان

تهیه و تنظیم:

مهندس فریدون رحمانی، شرکت سیمان یاسوج

مهندس محسن یعقوبی، شرکت سیمان اردستان

## چکیده:

مصرف جهانی سیمان بیش از ۱/۵ بیلیون تن در سال است و سالیانه ۱ درصد به آن افزوده می‌شود. مصرف انرژی الکتریکی برای تولید سیمان تقریباً ۱۱۰ kWh/ton است و در حدود ۴۰ درصد از این انرژی برای سایش کلینکر مصرف می‌شود. پتانسیلهایی وجود دارد که به وسیله آنها می‌توان مدارهای سایش معمولی سیمان را بهینه کرد. در دهه‌های گذشته پیشرفتهای چشمگیری در این زمینه صورت گرفته است. تقاضای جهانی برای تولید سیمانهای نرم (بلین بالا) و نیاز به کاهش در مصرف انرژی برای تولید سیمان و سیمان‌هایی که گازه‌های گلخانه‌ای کمتری را منتشر می‌کنند، ضرورت بهینه‌سازی سایش را تقویت کرده است.

این مقاله، ابزارهای موجود برای آنالیز و بهینه‌سازی مدارهای سایش سیمان را توصیف می‌کند و کاربرد روش باند و مدلهای موازنه جمعیت (PBM) به صورت مطالعات موردی ارائه شده است. ظرفیت مدار سایش معمولی با بکارگیری سنگ شکن Barmac به عنوان پیش خردکن کلینکر می‌تواند ۲۰-۱۰ درصد افزایش یابد. همچنین تکنولوژی آسیابهای سایشی (قائم) برای سایش سیمانهای نرم مورد بحث قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: سایش خشک، بهینه‌سازی مدار، مدلسازی

## ۱- مقدمه

مهمترین کاربرد برای فرآیند سایش خشک، تولید سیمان است.

مصرف انرژی جهانی برای تولید سیمان در حدود ۱۸/۷ TWh تخمین زده می‌شود که تقریباً ۰/۰۲ درصد مصرف انرژی جهانی در سال را به خود اختصاص می‌دهد. مصرف جهانی سیمان در سال ۲۰۰۲ در حدود ۱/۷۲ بیلیون تن بود و این میزان سالیانه یک درصد در حال افزایش است.

فرایند تولید سیمان به طور خلاصه شامل مراحل زیر است:

- خردایش و سایش سنگ آهک (و دیگر مواد خام برای دستیابی

به یک ترکیب شیمیایی مشخص) به نحوی که میزان نرمی آن در مدار خشک به حدی می‌رسد که میزان عبور از الک ۹۰ میکرون ۹۰ درصد باشد.

- تولید سیمان با واکنش بین اجزاء مخلوط نرم ایجاد می‌شود و این واکنش‌ها در کوره‌های دوار و طی دمای بالا صورت می‌گیرد.
- سایش کلینکر در حدی است که ۱۰۰ درصد آن از الک ۹۰ میکرون عبور کند.

بنابراین سایش در ابتدا و انتهای فرایند تولید سیمان ملاحظه

استفاده می‌شود، انجام می‌گیرد و نرم کردن ذرات ریز در اتاقچه دوم که از گلوله‌های کوچکتری بهره می‌برد، صورت می‌گیرد.



شکل ۱: نمایی از یک آسیاب گلوله‌ای دو اتاقچه‌ای سیمان

در بین دو اتاقچه، دیافراگمی وجود دارد که فقط اجازه عبور به ذراتی را می‌دهد که از یک اندازه معین کوچکتر شده باشند. در نهایت محصول آسیاب از دیافراگم خروجی در انتهای آسیاب خارج می‌شود، بطوریکه این شبکه اجازه عبور گلوله‌ها را نمی‌دهد. نسبتی از مواد - اغلب مواد نرم - به خارج از آسیاب هواجاروب می‌شوند. محصول نهایی مواد نرمی است که از سپراتور خارج شده و بخش زبره به آسیاب برمی‌گردد.

در بیست سال گذشته تکنولوژی آسیابهای غلتکی فشار بالا (HPGR) در پیش خردایش کلینکر مورد استفاده قرار گرفته است. در حال حاضر، در بسیاری از کشورها از این تکنولوژی به عنوان افزایش دهنده ظرفیت و کارایی انرژی استفاده می‌کنند.

### ۳- شبیه‌سازی خردایش سیمان

به منظور بهینه‌سازی خردایش کلینکر، محاسبات خردایش استاندارد باند به خوبی روشهای دیگر مدلسازی و شبیه‌سازی و بر اساس مدل موازنه جمعیت (PBM) قابل استفاده است. پیش‌بینی توان مصرفی آسیاب با استفاده از مدل توان Morrel برای آسیابهای لوله‌ای انجام شده است.

### ۳-۱- روش باند

روش معینی برای ارزیابی توان مورد نیاز آسیابهای گلوله‌ای توسط رابطه باند به دست می‌آید. این روش همچنین کاربرد برخی فاکتورهای کارایی را که توسط رولند توصیف گردیده را در نظر گرفته است. معادله باند توان مورد نیاز برای کاهش ابعادی خوراک

می‌گردد که یکی مربوط به مواد خام و دیگری کلینکر سیمان است. تقریباً برای تولید هر تن سیمان ۱/۶ تن مواد خام مورد نیاز می‌باشد. انرژی الکتریکی مصرف شده برای تولید سیمان حدوداً ۱۱۰ kWh/ton است که در حدود ۳۰ درصد این انرژی برای آماده‌سازی مواد خام و ۴۰ درصد آن برای تولید سیمان نهایی صرف سایش کلینکر می‌شود. هزینه‌های تولید و نگرانی‌های زیست محیطی ما را به سمت مصرف کمتر و توسعه تجهیزات کارآتر انرژی در سایش و جداسازی، هدایت خواهد کرد. انرژی جهانی مصرف شده برای تولید سیمان کسر قابل توجهی از کل انرژی را به خود اختصاص می‌دهد. در صنایع مواد معدنی، تحقیق بر روی مدلسازی و شبیه‌سازی فرایند خردایش و سایش دارای تاریخچه‌ای طولانی و موفقیت‌آمیز است.

از عواملی که در کارایی آسیابها دخالت دارند و در بهینه‌سازی باید مورد توجه قرار گیرند، می‌توان به گلوله‌ها (تعداد، ابعاد و دانسیته)، نوع آستری (لایزر) و نرخ خوراک‌دهی اشاره کرد. بررسی تأثیر این پارامترها به صورت مداوم (on-line) بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است. از این رو برای بهینه‌سازی آسیابهای سیمان از تکنیکهای مدلسازی ریاضی و شبیه‌سازی کامپیوتری استفاده شده است. مفاهیم تابع شکست<sup>۱</sup>، تابع انتخاب<sup>۲</sup> و توزیع زمان ماند (RTD) از ابزارهای مدلسازی آسیابهای گلوله‌ای به شمار می‌آید.

## ۲- خردایش سیمان

در قرن بیستم، مدارهای سایش خشک متداول برای تولید سیمان از کلینکر شامل آسیابهای گلوله‌ای دو اتاقچه‌ای و سپراتورهای هوایی می‌باشد. تقریباً ۹۵ درصد خوراک ورودی به آسیابهای سیمان شامل کلینکر و مابقی آن افزودنیهای دیگر و کمک سایش‌ها است. کیفیت سیمان تولیدی با مساحت سطح یا اندیس بلین اندازه‌گیری می‌شود. واحد اندازه‌گیری بلین  $m^2/kg$  است و این شاخص با آزمایش نفوذپذیری هوا تعیین می‌گردد. مساحت سطح پودر سیمان به عواملی همچون توزیع اندازه ذرات سیمان بستگی دارد و ذرات کوچکتر مساحت سطح بیشتری را دارند. اگر توزیع اندازه ذرات معلوم باشد، اندیس بلین به طور موفقیت‌آمیزی می‌تواند تخمین زده شود.

مدار سایش کلینکر سیمان، اندازه خوراک را از ۸۰ درصد بین ۱۰ و ۲۰ میلیمتر به ۱۰۰ درصد زیر ۹۰ میکرون می‌رساند. کاهش ابعاد معمولاً در آسیاب گلوله‌ای دو اتاقچه‌ای اتفاق می‌افتد که طول اتاقچه اول آن از اتاقچه دوم کمتر است. سایش ذرات درشت کلینکر در اتاقچه اول که گلوله‌های بزرگتر (۸۰، ۷۰، ۶۰ و ۵۰ میلیمتر)

<sup>1</sup>Breakage Function

<sup>2</sup>Selection Function

از  $F_{80}$  به محصولی با  $P_{80}$  را توصیف می‌کند:

$$W_m = W_i \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad \text{معادله (۱)}$$

که در آن:

$$W_m = \text{توان مخصوص خروجی موتور آسیاب} \left( \frac{KWh}{t} \right)$$

$$W_i = \text{اندیس کار آسیاب گلوله‌ای باند} \left( \frac{KWh}{t} \right)$$

$$P_{80} = \text{دهانه سرنندی که } 80 \text{ درصد محصول آسیاب از آن گذشته}$$

است ( $\mu$ )

$$F_{80} = \text{دهانه سرنندی که } 80 \text{ درصد خوراک آسیاب از آن گذشته}$$

است ( $\mu$ )

فاکتورهای کارآیی رولند معادله (۱) را تعدیل کرده است، به نحوی که آن را برای شرایط مداری آماده می‌کند که متفاوت از رابطه‌ای بود که باند برای معادله‌اش استفاده کرد. این فاکتورهای کارایی شامل خردایش خشک، آسیاب نمودن به روش گلوله‌ای مدار باز، قطر آسیاب، خوراک درشت دانه، سایش ذرات ریزتر از ۷۵ میکرون و نسبت کاهش ابعادی خیلی بزرگ یا خیلی کوچک است. برای بکارگیری در سایش کلینکر، فاکتورهای خردایش خشک ( $EF_1$ )، قطر آسیاب ( $EF_3$ )، خوراک درشت دانه ( $EF_4$ ) و محصول ریز ( $EF_5$ ) مناسب هستند. بنابراین معادله برای محاسبه توان مخصوص به صورت زیر می‌باشد:

$$W_m = EF_1 EF_3 EF_4 EF_5 W_i \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

بر اساس توان مورد نیاز محاسبه شده از رابطه (۱) باند، در صورتی که قطر آسیاب از ۸ ft بیشتر شود، فاکتور  $EF_3$  اعمال می‌شود. رولند در سال ۱۹۷۵ این فاکتور را تغییر داد و آن را برای شرایطی که قطر آسیاب از ۱۲ ft تجاوز کند، مد نظر قرار داد. برای آسیابهای بزرگتر از ۱۲ ft، این فاکتور در مقدار آسیاب ۱۲ ft ثابت می‌ماند.

$$EF_3 = \left( \frac{8}{D_{ft}} \right)^{0.2} = \left( \frac{2.44}{D} \right)^{0.2}$$

که در آن:

$$D_{ft} = \text{قطر داخلی آسیا با لاینر (ft)}$$

$$D = \text{قطر داخلی آسیا با لاینر (m)}$$

فاکتور درشتی خوراک ( $EF_4$ ) زمانی اعمال می‌شود که اندازه خوراک درشت‌تر از محدوده اندازه  $F_0$  باشد که خود تابعی از سختی است. باند چنین عنوان کرد که اگر اندازه خوراک از این مقدار

درشت‌تر باشد، گلوله‌های بزرگتری نیاز خواهد بود تا ذرات درشت‌تر با هزینه بیشتر سایش ذرات کوچکتر نرم نشوند. برعکس، اگر گلوله‌های کوچکتر برای خردایش ذرات ریزتر استفاده شوند، این گلوله‌ها قادر به شکست ذرات درشت نمی‌باشند. فاکتور  $EF_4$  زمانی که اندازه خوراک درشت‌تر از  $F_0$  است، به کار برده می‌شود و مقدار آن بیشتر از یک است.

فاکتور تصحیح  $EF_4$  برای اندازه خوراک ورودی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$EF_4 = \left[ \frac{R_r + (W_i - 7) \left( \frac{F_{80} - F_0}{F_0} \right)}{R_r} \right]$$

$$P_0 = 4000 \left( \frac{13}{W_i} \right)^{0.5}$$

$$R_r = \frac{F_{80}}{P_{80}}$$

که در آن:

$$R_r = \text{نسبت کاهش اندازه}$$

$$F_0 = \text{اندازه خوراک مناسب برای آسیاب} (\mu m)$$

$$F_{80} = \text{اندازه خوراک واقعی آسیاب} (\mu m)$$

$$P_{80} = \text{اندازه محصول آسیاب} (\mu m)$$

فاکتور تصحیح  $EF_5$  برای محصول ریزتر از ۷۵ میکرون به شکل زیر تعیین می‌شود:

$$EF_5 = \frac{P_{80} + 10.3}{1.145 * P_{80}}$$

در بخش سنگ شکن نیز تفاوت چشمگیری بین اطلاعات حقیقی کارخانه و محاسبات باند وجود دارد و بنابراین ضرایب تصحیح مورد نیاز می‌باشد. معادله تعدیل شده زیر به منظور عملیات سنگ شکن پیشنهاد شده است:

$$W_c = \frac{A}{\sqrt{P_c}} W_i \left( \frac{10}{\sqrt{P_c}} - \frac{10}{F_c} \right)$$

که در آن:

$$W_c = \text{انرژی مصرفی برای کلینکرشکن} \left( \frac{KWh}{t} \right)$$

$$W_i = \text{اندیس کار آسیاب گلوله‌ای باند} \left( \frac{KWh}{t} \right)$$

$$P_c = \text{دهانه سرنندی که } 80 \text{ درصد کلینکر عبور کرده از کراشر،}$$

که از آن می‌گذرد ( $\mu m$ )

$$F_c = \text{دهانه سرنندی که } 80 \text{ درصد کلینکر قبل از عبور کراشر، از}$$

آن می‌گذرد ( $\mu m$ )

$$A = \text{یک ضریب تجربی است که به خصوصیات کلینکر و کراشر}$$

$$r_i = \text{نرخ شکست اندازه ذره } i \text{ (h}^{-1}\text{)}$$

$$S_i = \text{مقداری از اندازه‌های ذره داخل آسیاب (ton)}$$

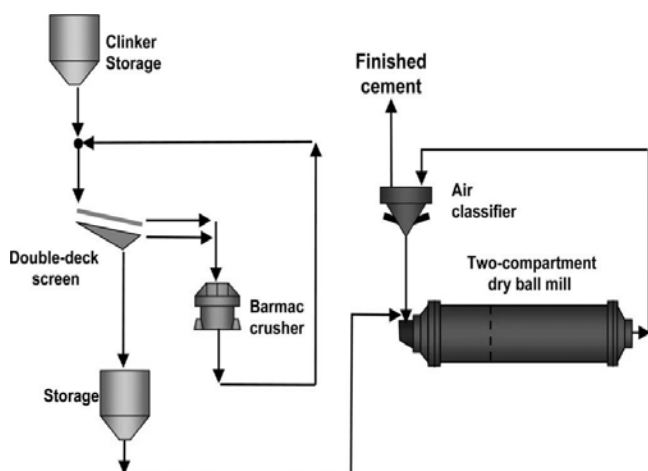
$$d_i = \text{نرخ خروج اندازه ذره } i \text{ (h}^{-1}\text{)}$$

مدل فوق دارای دو پارامتر مهم است، یکی تابع شکست ( $a_{ij}$ ) که توصیف کننده خصوصیات مواد است و دیگری تابع نرخ شکست/خروج ( $r_i/d_i$ ) است که خصوصیات ماشین را توصیف می‌کند و هنگامی که توزیع اندازه (دانه‌بندی) خوراک، محصول و تابع شکست در دسترس باشد، قابل ارزیابی و محاسبه می‌باشد.

جداسازهای هوایی کیفیت محصول نهایی را کنترل می‌کنند. بنابراین طبقه‌بندی کننده‌ها در مدار نقشی حیاتی داشته و طراحی و عملیات بهره‌برداری از آنها لزوم توجه بیشتری را می‌طلبد. مضافاً فعالیت سپراتور توسط منحنی‌های راندمان مدلسازی می‌شود. تأثیر طراحی جداساز و پارامترهای عملیاتی بر روی کارایی مهم و پیچیده بوده و جهت بهبود مدل‌های موجود، کارهایی در این زمینه انجام شده است.

#### ۴- مطالعه موردی

کراشر Barmac در مدار سایش یک کارخانه سیمان به عنوان پیش خردکن مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل ۲ مدار سایش پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۲: شماتیکی از مدار سایش سیمان همراه با مرحله پیش‌خردکن

سنگ شکن Barmac (سری B نوع VSI) در دامنه وسیعی از مواد در صنایع سنگ دانه‌ای و مواد معدنی بکار می‌رود. به دلیل فعالیت خودشکنی سنگ شکن مذکور، اغلب برای مواد با ساینده‌گی

بر اساس ملاحظات بالا برای سایش نرم و خردایش، مصرف انرژی برای کراشر کلینکر و آسیاب آن با به‌کارگیری مدل پایه‌ای باند می‌تواند تخمین زده شود:

$$W = W_c + W_m$$

از آنجا که اندازه محصول پیش خردایش شده  $P_c$  معادل با اندازه خوراک آسیاب  $F_{80}$  است، بنابراین:

$$W = \frac{A}{\sqrt{F_{80}}} W_i \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_c}} \right) + 1.3 * \left( \frac{2.44}{D} \right)^{0.2} * \left[ \frac{R_r + (W_i - 7) \left( \frac{F_{80} - F_0}{F_0} \right)}{R_r} \right] * \left\{ \frac{P_{80} + 10.3}{1.145 * P_{80}} * W_i \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) \right\}$$

#### ۳-۲- مدل‌های PBM

در حوزه کاهش ابعادی خشک، مدل‌های موازنه جمعیت (PBM) برای کراشرها، HPGR، آسیابهای گلوله‌ای، آسیابهای گلوله‌ای هواجاروب و سپراتورهای هوایی توسعه یافته است. این مدل‌ها می‌توانند برای شبیه‌سازی مدارهای سایش سیمان و کمک به بهینه‌سازی آنها به کار رود.

معمولاً آسیاب‌های یک کارخانه سیمان از نوع گلوله‌ای دو اتاقچه‌ای هستند. در سالیان اخیر پیشرفت‌های تحقیقاتی چشمگیری در مقیاس صنعتی، در توسعه مدل به عمل آمده است. مکانیزم‌های انتقال و شکست مواد همانند فعالیت طبقه‌بندی دیافراگم‌ها در توسعه و بسط این مدل‌ها در نظر گرفته شده‌اند. همچنین پیشرفت‌های بیشتری در زمینه مدلسازی طراحی دیافراگم و اثر آن بر روی طبقه‌بندی و انتقال مواد انتظار می‌رود.

پایه و اساس مدلسازی آسیابهای گلوله‌ای دو اتاقچه‌ای، مدل "آسیاب گلوله‌ای مخلوط کامل" است. این مورد در معادله زیر بیان گردیده است:

$$f_i + \sum_{j=1}^i \left[ \frac{a_{ij} r_j p_j}{d_j} \right] = p_i + \frac{r_i p_i}{d_i}$$

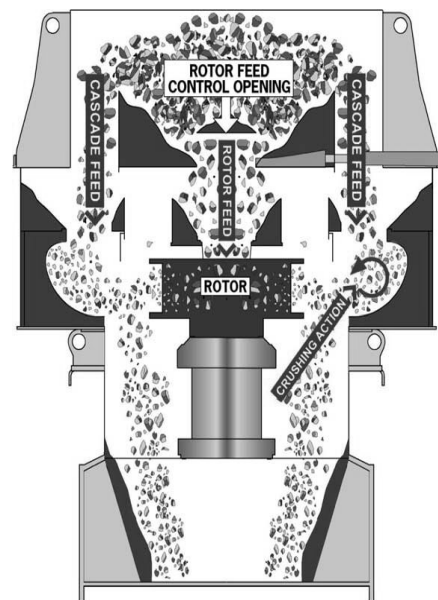
که در آن:

$$f_i = \text{نرخ خوراک اندازه } i \text{ (t/h)}$$

$$p_i = \text{جریان محصول کسر اندازه } i \text{ (t/h)}$$

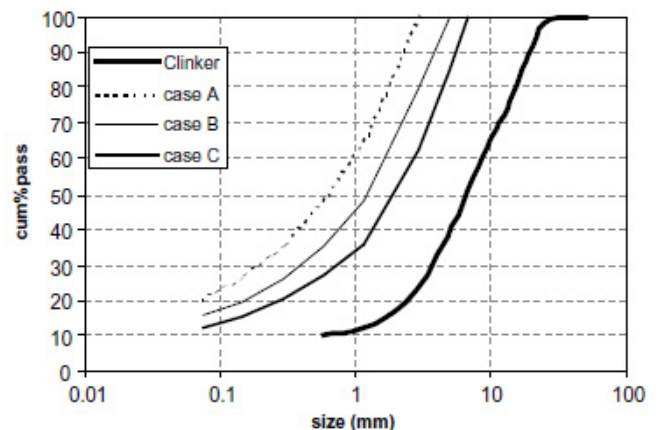
$$a_{ij} = \text{کسر جرمی اندازه‌ای که بعد از شکست در سایز } i \text{ ظاهر}$$

بالا نظیر کلینکر سیمان به کار می‌رود. فعالیت خردایشی این سنگ شکن در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: شماتیکی از عملیات سنگ شکن Barmac

هنگامی که سنگ بر روی صفحه تقسیم کننده قرار می‌گیرد، به سه جریان مجزا تقسیم شده و با یک جریان فشاری تحت کوبش قرار می‌گیرد. همانگونه که از شکل ۳ مشاهده می‌شود، موادی که به قسمت پایین‌تر وارد می‌شود، توسط نیروی روتور پخش گردیده و توسط مکانیزم فشار و ضربه بین روتور و آستری موجود، مواد مورد خردایش قرار می‌گیرند. در خردایش مواد چندین مکانیزم با یکدیگر دخیل بوده و بر روی اجزا مواد اثر می‌گذارد. در پایان نیز مواد خردایش شده از طریق محفظه بین اتاقک سنگ شکن و دیوار روتور خارج می‌گردند. شکل ۴ توزیع اندازه کلینکر و دانه‌بندی پیش-بینی شده برای سنگ شکن Barmac را نشان می‌دهد.



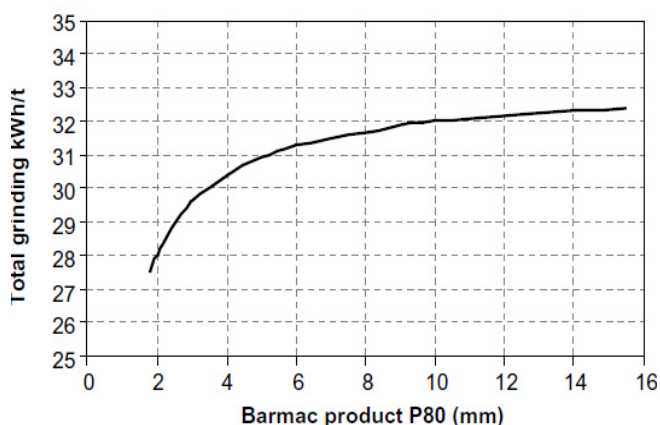
شکل ۴: توزیع دانه‌بندی کلینکر و کلینکر خردایش شده (مورد A، B و C) با بکارگیری سنگ شکن Barmac

این اطلاعات بر اساس مدلسازی‌ها و آزمایش‌های نیمه صنعتی به دست آمده است. همانگونه که مشاهده می‌شود ۱۰ تا ۲۰ درصد مواد زیر اندازه ۷۵ میکرون در اثر خردایش کلینکر با این سنگ شکن به دست می‌آید. با توجه به توزیع دانه‌بندی سیمان می‌توان چنین نتیجه گرفت که در این فرآیند مقادیر قابل توجهی از محصول نهایی به دست می‌آید.

جدول ۱: محاسبات توان (بر اساس مدل باند) برای آسیاب دو اتاقچه‌ای

تفاوت (%)	توان مورد نیاز (kW)	$EF_4$	خوراک آسیاب $F_{80}$ (mm)
۰,۰	۳۵۶۴	۱/۰۶	۱۵/۵
۸/۸	۳۲۵۱	۱/۰۱	۴/۵
۱۲/۱	۳۱۳۳	۱	۳/۰
۱۵/۳	۳۰۱۸	۱	۱/۸

همانگونه که از جدول ۱ مشاهده می‌شود کاهش ۹ تا ۱۵ درصد را می‌توان در توان مصرفی آسیاب دو اتاقچه‌ای به خاطر  $F_{80}$  های مختلفی که در اثر خردایش با سنگ شکن به دست می‌آید، نتیجه‌گیری کرد. نظر به اینکه با تغییر در فاکتور  $EF_4$  و بالتبع کاهش ۵-۶ درصد توان مصرفی که در اثر بهبود راندمان آسیاب حاصل می‌شود و به خاطر اخذ نتایج بهتر، لازم است متناسب با تغییرات در اندازه و دانه‌بندی مواد، توزیع اندازه گلوله‌های اتاقچه اول نیز مورد بررسی و تنظیم دقیق‌تر قرار گیرد. شکل ۵ چگونگی ارتباط مصرف انرژی نهایی به اندازه محصول خردایش شده سنگ شکن Barmac را نشان می‌دهد.

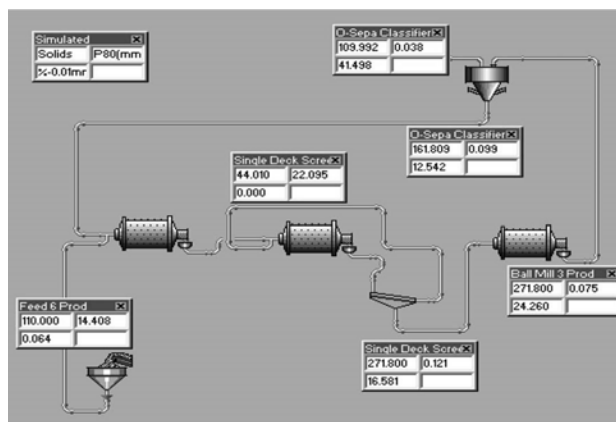


شکل ۵: الزامات توان ویژه در مدار سایش سیمان شامل مرحله پیش‌خردکنی توسط سنگ شکن Barmac

همانگونه که از شکل ۵ ملاحظه می‌شود، مصرف انرژی کلی با کاهش در اندازه محصول سنگ شکن Barmac کاهش می‌یابد. این مورد نشان می‌دهد که راندمان خردایش کلینکر در مقایسه با مدارهای سایش معمولی بدون مرحله پیش‌خردکنی تا ۱۰ درصد

بهبود می‌یابد. در مقایسه با HPGR، سنگ شکن‌های Barmac با صرف هزینه سرمایه‌گذاری کمتر، افزایش ظرفیت مدارهای سایش را نیز به دنبال دارند.

مدل موازنه جمعیت با اصولی که پیشتر توصیف کردیم، قابل انجام است. بایستی این نکته را یادآور شد که برای بدست آوردن ثابتهای "مخصوص محل" اخذ اطلاعات از مدار آسیاب به صورت نمونه‌گیری و آنالیز نمونه‌ها لازم است (توزیع دانه‌بندی و اندازه مواد در هر جریان و نقاط مختلف داخل آسیاب). در شکل ۶ فلوشیت شبیه‌سازی یک مدار خردایش را با نرم افزار Jksimmet نشان می‌دهد.



شکل ۶: فلوشیت شبیه‌سازی شده یک مدار با استفاده از نرم افزار Jksimmet

در این شبیه‌سازی اتاقچه اول به صورت یک آسیاب گلوله‌ای دوتایی سری، دیافراگم بین دو اتاقچه به صورت یک سرند و اتاقچه دوم به صورت یک آسیاب گلوله‌ای تکی ارائه شده است. داده‌های ارائه شده در این فلوشیت شامل ظرفیتهای جرمی (تن بر ساعت)، ۸۰ درصد عبوری از سرند و درصد عبوری از الک ۰/۱ mm می‌باشند. با بهره‌گیری از مدل بالا، شبیه‌سازیها در توزیع مختلف اندازه خوراک (کلینکر تازه و کلینکر خردایش شده با سنگ شکن Barmac به شرط ثابت ماندن اندازه محصول ( $P_{80} = 0.0038mm$ )) قابل انجام است. نتایج افزایش ظرفیت در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: افزایش مدلسازی شده در ظرفیت

F <sub>80</sub> (mm)	میزان خروجی شبیه‌سازی شده (تن بر ساعت)	افزایش (درصد)
۱۵/۵	۱۱۰	۰/۰
۴/۵	۱۲۵	۱۳/۶
۳/۰	۱۳۵	۲۲/۷
۱/۸	۱۴۰	۲۷/۳

جدول ۳ خلاصه‌ای از افزایش بالقوه ظرفیت در اثر بکارگیری از سنگ شکنهای Barmac را نشان می‌دهد. نکته حائز اهمیت این است

که نتایج به دست آمده از این شبیه‌سازی‌ها محدودیت‌های فیزیکی مدار را از قبیل نمونه‌گیری، هوادهی و ظرفیت سپراتور هوایی را در نظر نمی‌گیرد.

می‌توان چنین گفت که محاسبات باند، افزایش ظرفیت کمتری را نسبت به شبیه‌سازیهای PBM به دست می‌دهد. دلیل این امر را می‌توان در مدلسازی PBM جستجو کرد که عملکرد سپراتور را نیز در شبیه‌سازی در نظر می‌گیرد.

جدول ۳: افزایش ظرفیت پیش‌بینی شده با بهره‌گیری از مدلسازی خردایش باند ظرفیت پایه ۱۱۰ تن بر ساعت

خوراک آسیاب F <sub>80</sub> (mm)	مقدار زیر ۷۵ میکرون در محصول Barmac	درصد افزایش روش باند	درصد افزایش PBM
۱۵/۵	صفر	صفر	صفر
۴/۵	۱۲/۱	۹/۱	۱۳/۶
۳/۰	۱۵/۴	۱۴/۳	۲۲/۷
۱/۸	۲۰/۵	۱۸/۲	۲۷/۳

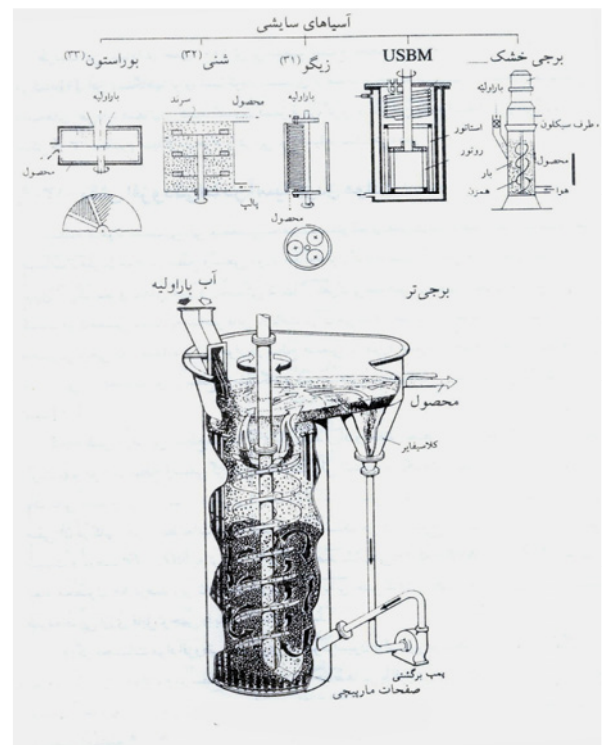
## ۵- پتانسیل آسیاب سایشی (قائم)

هنگامی که اندازه محصول کاهش می‌یابد، انرژی مورد نیاز برای شکست ذرات افزایش پیدا می‌کند. مرحله پیش خردکن، راندمان آسیاب در اتاقچه اول آسیاب دو اتاقچه‌ای را (جایی که ذرات درشت تحت خردایش قرار می‌گیرند) افزایش می‌دهد. به هر حال مرحله پیش‌خردکن در جهت تولید مقادیر قابل ملاحظه ذرات در محصول نهایی (۱۵-۱۰ درصد) تأثیر نمی‌گذارد. جهت تولید محصول با اندازه مورد نظر لازم است که طول اتاقچه دوم دو برابر اتاقچه اول باشد. همچنین گلوله‌های کوچکتری برای سایش مواد در این اتاقچه در نظر گرفته شود. کارایی سایش در اتاقچه دوم با میزان شارژ و کاربرد گلوله‌های کوچکتر ارزیابی می‌شود. به دلیل محدودیت در سرعت عملیاتی آسیاب (که ۷۸ درصد سرعت بحرانی در نظر گرفته می‌شود)، اندازه کوچکترین گلوله به کار رفته در اتاقچه دوم محدود به ۱۵ میلیمتر می‌گردد.

سایش سیمان با به‌کارگیری آسیابهای سایشی (قائم) نشان داد که بکارگیری گلوله‌های با اندازه ۸-۵ میلیمتر راندمان انرژی خردایش را به بیش از ۵۰ درصد می‌تواند ارتقا دهد. برای تولید انواع سیمانهای مخصوص، که از سیمان پرتلند نرم‌تر می‌باشند، این ترکیب در نظر گرفته می‌شود. در این راستا آسیاب‌های برجی<sup>۱</sup> برای تولید سیمان‌های با بلین  $12000 \text{ cm}^2/\text{gr}$  به کار می‌روند. آسیاب‌های سایشی (قائم) در چیدمانهای مختلفی قابلیت کاربرد داشته و انتظار

<sup>۱</sup>Tower mill

می‌رود این کاربردها در آینده قابل ملاحظه و جدی‌تر باشد. شکل ۷ نمایی از کاربردهای این آسیاب را در صنایع فراوری مواد معدنی نشان می‌دهد.



شکل ۷: چیدمان‌های مختلف آسیابهای سایشی (قائم)

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله توجهی ویژه به بهینه‌سازی قابل ملاحظه مدارهای سایش سیمان معطوف شده است. روش‌های مدلسازی و شبیه‌سازی نیز برای بهینه‌سازی می‌تواند به کار گرفته شود. مطالعه موردی انجام شده با استفاده از اطلاعات یک کارخانه سیمان صنعتی نشان داد که:

پیش‌خردایش کلینکر با بکارگیری سنگ شکن Barmac مزایای بالقوه‌ای را در ارتباط با کارایی فرایند ایجاد می‌کند (افزایش ظرفیت).

استفاده از سنگ‌شکن Barmac ظرفیت مدار را به میزان ۲۰-۱۰ درصد افزایش می‌دهد، منوط به اینکه هیچ محدودیت ظرفیتی در قسمت‌های دیگر مدار نباشد. این انتخاب (در مقایسه با HPGR) به دلیل هزینه سرمایه‌گذاری کمتر، یک گزینه فوق‌العاده به شمار می‌رود. راندمان انرژی کلی مدار نیز می‌تواند به میزان ۱۰-۵ درصد بهبود یابد.

به کارگیری آسیابهای سایشی (قائم) می‌تواند کارایی بیشتری در افزایش راندمان مدارهای سایش سیمان داشته باشد. همانگونه که انتظار می‌رفت مطالعات مقدماتی در مورد

کاربرد این نوع آسیابها، بهبود در سایش سیمانهای مخصوص را نشان می‌دهد.

## مراجع

- ۱- فرزندگان، اکبر. "جزوه کنترل و مدلسازی سیستم‌های فراوری مواد معدنی"، دانشگاه کاشان، ۱۳۷۹-۱۳۸۲.
- ۲- یعقوبی، محسن و رحمانی، فریدون، "شبیه‌سازی و مدلسازی واحدهای خردایش برای افزایش مقاومت ملات در آسیابهای سیمان"، ماهنامه صنعت سیمان، بهمن ۸۷.
- ۳- رضایی، بهرام، "تکنولوژی فراوری مواد معدنی (خردایش و طبقه‌بندی)"، شهریور ۱۳۷۶.

4- [www.heidelbergcement.com](http://www.heidelbergcement.com)

5- Benzer, H., Ergun, L., Oner, M., Lynch, A.J., 2001. "Simulation of Open Circuit Clinker Grinding. Minerals Engineering", 14 (7), 701-710.

6- Bond, F. C., 1961. "Crushing and Grinding Calculations Parts I and II", British Chemical Engineering 6 (6&8).

7- Austin, L.G., Weymont, N.P., Knobloch, O., 1980., "The simulation of air-swept cement mill", In: Proceeding of European symposium. Particle Technology, Amsterdam

## تعاریف:

آسیابهای سایشی (قائم):

از معروفترین این آسیابها، نوع برجی آن است. این نوع آسیابها از مخزن قائمی تشکیل شده‌اند که مجهز به میله‌ای مارپیچی شکل می‌باشند و بار خرد کننده آنها را گلوله‌های فولادی تشکیل می‌دهد. بار اولیه از قسمت فوقانی دستگاه به همراه آب وارد دستگاه می‌شود و ضمن سقوط در مخزن، با چرخش میله مارپیچی تحت مکانیزم سایش، مالش و اصطکاک نرم می‌شود. مواد پس از آسیاب شدن، به کمک فشار آب به سطح مخزن هدایت شده و سپس وارد کلاسیفایر می‌شود. ذرات درشت‌تر از حد لازم، برای نرم شدن مجدد، دوباره به داخل مخزن برمی‌گردند. فضای کم، کاهش سر و صدا، مصرف انرژی موثر، کنترل نرم شونده‌گی مواد و هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی پایین، از جمله محسنات این نوع آسیاب است. خرد شدن عمدتاً در اثر مالش و سایش است که در اثر فشار زیاد وارد شده بر مواد در اثر وزن گلوله‌ها تسریع می‌شود. با توجه به این فشار زیاد و همچنین تولید حرارت و سر و صدای کمتر نسبت به آسیابهای گلوله‌ای گردان، مصرف انرژی در این نوع آسیاب کمتر است. از آسیابهای قائم به روش خشک (در صنایع

تابع انتخاب:

نرخ شکست  $S_i$  بیان کننده آهنگ ناپدید شدن ماده معدنی از یک طبقه اندازه در اثر خردایش است و واحد آن عکس زمان می باشد (1/min). تابع انتخاب یا نرخ شکست برای یک کانه عدد ثابتی نیست و به شرایط خردایش و روش سایش، قطر آسیاب، اندازه گلوله ها و توزیع آنها، رئولوژی پالپ، زمان سایش، اندازه ذرات کانه و ... بستگی دارد. برای محاسبه تابع انتخاب باید دانه بندی خوراک ورودی آسیاب، دانه بندی محصول آسیاب، تابع شکست ماده معدنی و توزیع زمان ماند در وسیله خرد کننده موجود باشد.

سیمان) نیز می توان استفاده کرد. در این صورت به جای پمپ از یک وانتیلاتور استفاده می شود. حداکثر اندازه بار ورودی به آسیابهای قائم ۶ میلیمتر است. ابعاد محصول آن می تواند کوچکتر از ۷۴ میکرون و تا کوچکتر از ۲ میکرون و حتی نرم تر از آن باشد. ظرفیت این نوع آسیابها در حدود ۱۰۰ تن در ساعت است.

تابع شکست:

تابع شکست بیانگر نحوه توزیع دانه بندی یک طبقه اندازه ذرات ماده معدنی پس از یک مرتبه خردایش است و با  $B_{i,j}$  و  $b_{i,j}$  نمایش داده می شوند.  $B_{ij}$  یعنی کسری از ذرات طبقه ابعادی  $j$  که پس از خرد شدن به طبقه ابعادی ریزتر  $i$  می رسند.  $b_{i,j}$  یعنی کسری از طبقه  $j$  که پس از خرد شدن در طبقه  $i$  قرار می گیرند. با این تعاریف می توان نوشت:

$$b_{ij} = B_{i-1,j} - B_{i,j}$$

(تابع شکست از ویژگیهای یک کانه است و مستقل از شرایط خردایش فرض می شود. تابع شکست در ذرات می تواند به صورت نرمال یا غیرنرمال باشد. چنانکه تابع شکست قابل نرمال شدن باشد، رابطه زیر برقرار می باشد:

$$b_{ij} = b_{i+1,j+1}$$

و چنانچه تابع شکست به صورت غیرنرمال باشد، با تغییر ابعاد بار اولیه، تابع شکست تغییر می کند. در این صورت جهت محاسبه تابع شکست، رابطه زیر ارائه می گردد:

$$B_{i,1} = \Phi(d_{i-1}/d_1)^\alpha + (1 + \Phi)(d_{i-1}/d_1)^\beta$$

$d_i$  برابر ابعاد ذراتی است که در یکی از فراکسیون های پایین تر با فاصله  $\sqrt{2}$  قرار دارد،  $d_1$  برابر ابعاد خوراک بار اولیه می باشد (بالاترین سرنده در آنالیز سرنده)،  $\Phi$  برابر نقطه تقاطع امتداد بخش خطی منحنی با محور قائم می باشد،  $\alpha$  برابر شیب پایین ترین قسمت توزیع تجمعی و  $\beta$  دیگر پارامتر توزیع اندازه است.

مقادیر  $\Phi$  و  $\alpha$  و  $\beta$  را می توان با رسم نمودار لگاریتمی کاهش ابعاد در صورت جمعی عبور کرده، به دست آورد. سائز تنها مورد یکبار شکست قرار گرفته و ذرات حاصل از شکست در طبقات پایین تر که اندازه کاهش آنها ضریبی از  $\sqrt{2}$  می باشد، تقسیم می شود. احتمال این تقسیم با  $B_{ij}$  نشان داده می شود و برابر با قسمتی از وزن مواد است که از اندازه  $j$  شکسته شده و به سائزهای پایین تر از  $i$  رفته است.)

ماهنامه علمی، تخصصی

## فناوری سیمان

آگهی می پذیرد.



در نشریه

متخصصین صنعت سیمان

بهتر دیده می شوید.

E-mail: Cement\_technology@yahoo.com

www.cementtechnology.ir

تلفن تماس: ۹۵ و ۳۳۴۲۱۲۳۳-۰۲۱

<sup>1</sup> Breakage Rate