استراتژی صرفه‌جوئی انرژی در صنعت سیمان

محمود حبیبیان[1]، مصطفی خانزادی[2]

۱- دانشکده مهندسی شیمی ـ دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- مرکز تحقیقات سیمان ـ دانشگاه علم و صنعت ایران

خلاصه

عملیات اصلی در صنعت سیمان خردایش و انتقال حرارت است. تخمین زده شده که حدود ۵ درصد کل انرژی تولید شده جهانی بوسیله سیستم‌های خردایش مصرف می‌گردد. همینطور بیش از ۳۰ درصد انرژی در صنعت سیمان توسط سنگ شکن‌ها و آسیابها مصرف می‌شود. بنابراین جابجایی و انتقال نامناسب مواد منجر به از دست دادن مواد و ایجاد مشکلاتی همچون آلودگی ناشی از غبار می‌گردند. این مقاله تلاش دارد تا با مشخص کردن منابع مختلف افت انرژی روش‌های ممکن جهت صرفه‌جوئی و کاهش آن را مشخص نماید. تأکید بر روشهای کاهش مصرف انرژی در خردایش و کنترل غبار توسط جمع کننده‌های سیکلونی می‌باشد.

کلمات کلیدی: انرژی، خردایش، سیمان، بهینه سازی.

۱- مقدمه

دستگاهها و فرآیندهای ذیل نیازمند توجه از دیدگاه کاهش و صرفه جوئی در مصرف انرژی هستند ۱- غبار جمع‌کن‌های سیکلونی ۲- انتخاب و عملکرد مناسب فیلترهای کیسه‌ای ۳- پیش گرمکن‌ها ۴- کلاسیفایر ۵- خردایش در آسیاب گلوله‌ای.

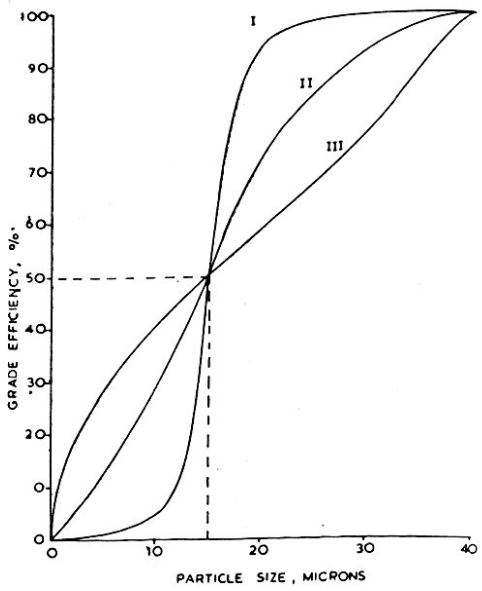
توجه به مکانیزم عملکرد و پارامترهای موثر در کارآئی آنها، هر یک می‌تواند نقش مؤثری در مجموعه به هم پیوسته فرآیند تولید سیمان داشته باشد. تنها بررسی سیستم خردایش و بکارگیری روشهای علمی نه فقط باعث صرفه‌جوئی در مصرف انرژی گردیده بلکه در مواردی ظرفیت تولید بین ۱۰ تا ۲۰ درصد افزایش داده است. علاوه بر این بهینه کردن عملکرد قسمت‌های مختلف باعث می‌گردد که عمر مفید دستگاههای مرتبط افزایش یافته و در نتیجه صرفه‌جوئی اقتصادی را بهمراه خواهد داشت. از آنجا که خردایش خود به تنهایی مصرف اصلی انرژی را

بهمراه داشته است لذا شناخت دقیق و علمی این سیستم کماکان کمک شایانی در صرفه‌جویی انرژی را بهمراه خواهد داشت.

۲- غبارگیرهای سیکلونی

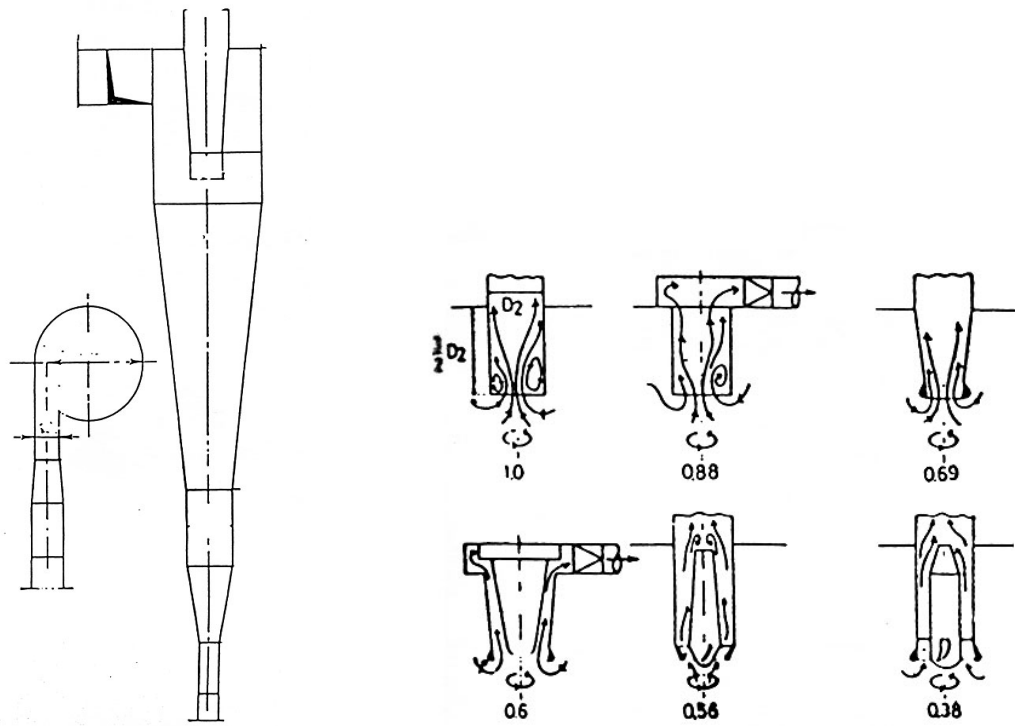
یکی از دستگاههای مهم که نیاز به توجه خاصی دارد غبارگیر سیکلونی می‌باشد. افزایش راندمان سیکلون نه تنها باعث افزایش جمع‌آوری غبار می‌شود بلکه بار اضافی برروی فیلتر ثانویه را که معمولاً یک فیلتر کیسه‌ای است را کاهش می‌دهد. اگر فیلتر کیسه‌ای با بار زیاد روبرو شود، افت فشار افزایش یافته و بنابراین عملکرد دمنده (Blower) کاهش می‌یابد. که این عمل متعاقباً راندمان غبارگیر را کاهش خواهد داد.

معمولاً به هنگام طراحی سیکلون عملکرد آن با توجه به راندمان درجه‌ای (grade Efficiency) در نظر گرفته نمی‌شود. اگر چه سیکلونها بعد از آزمایش عملکرد با غبار واقعی طراحی می‌شوند ولی در طول استفاده از آنها توزیع اندازه ذرات تغییر می‌یابد. این اتفاق به علت تغییر در عملکرد آسیاب اتفاق می‌افتد. منحنی راندمان درجه‌ای در عکس (۱) برای سه سیکلون نشان داده شده است. از این منحنی می‌توان دید که اگرچه اندازه برش ذره برای هر سه سیکلون یکی می‌باشد. ولی سیکلون ۱ با شیب تند نشانگر عملکرد بهتر جدایش می‌باشد. یعنی اینکه اجازه نخواهد داد که ذراتی بزرگتر از اندازه برش به محیط وارد شوند. حال این امکان وجود دارد که شرایط عملیاتی سیکلون را بتوان بخوبی تنظیم نمود اگر مشخصات ویژه عملکردی سیکلونی از قبل بخوبی مشخص و شناخته شده باشد.



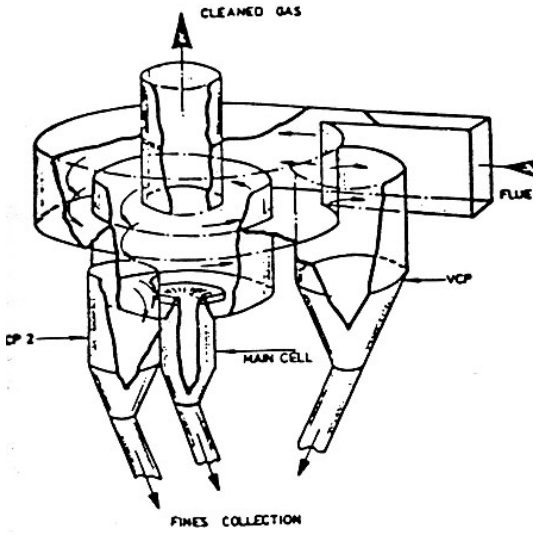
شکل (۱) منحنی راندمان جزئی

عکس ۲- مزیت‌های نسبی استفاده، از اشکال مختلف گرداب‌یابها را جهت کاهش ضریب معادله افت فشار جدا کننده‌های سیکلونی را نشان می‌دهد. استفاده از سیکلونها وانتونگرن (Vantongeren) (عکس ۳) که در مقایسه با انواع دیگر سیکلونها راندمان جمع‌آوری بالاتری را بروز می‌دهد را نشان می‌دهد. راندمان جمع‌آوری بالا و افت فشار پایین کمک به انتخاب دمنده‌ای (Blower) با اسب بخار پایین‌تری نموده که مصرف انرژی در جابجایی سیمان را کاهش می‌دهد. از کلاسیفایرهای سیکلونی (شکل ۴) زمانیکه توزیع اندازه ذرات زیاد باشد می‌توان استفاده نمود.



شکل (۲) اشکال مختلف گرداب‌یاب

شکل (۳) سیکلون وانتونگرن



شکل (۴) کلاسیفایر سیکلونی

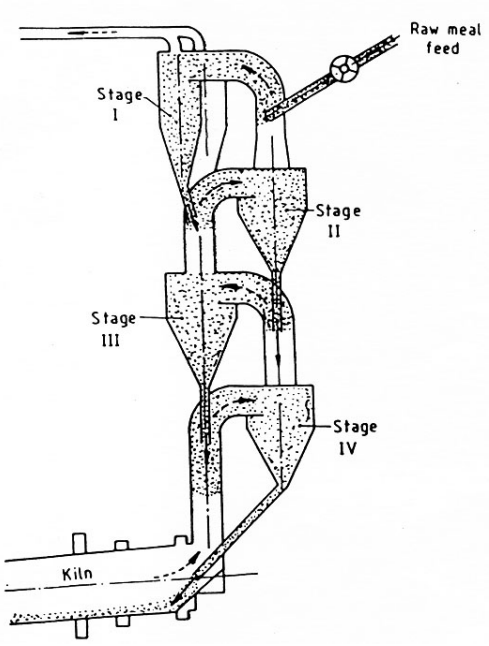
یکی از علل مهم در عملکرد ضعیف سیکلونها نشت در شیرهای چرخشی با قفل هوا می‌باشد. مهم است که از یک شیر با قفل هوا با ایجاد ستاره یا پوشش تفلونی در شیر چرخشی استفاده نمود. مهمترین توصیه در ارتباط با کاهش نشت گذاشتن یک (Educator) در قسمت بجای شیر چرخشی در قسمت تحتانی سیلکون است. این امر زمانیکه محصول بصورت نیوماتیکی به واحد دیگری انتقال می‌یابد مهم می‌باشد. [۲]

۳- فیلترهای کیسه‌ای

در حال حاضر فیلترهای کیسه‌ای براساس حدس و خطا انتخاب می‌شوند لازم است یک مطالعه سیستماتیک بر انتخاب آنها برای غبار خاصی انجام گیرد. مشاهده شده است که در بیشتر مواقع که فیلترهای کیسه‌ای غبار را جمع‌آوری می‌کنند در ابتدا راندمان بالا بوده ولی بعد از مدتی کار و تمیز کاری دوباره دارای افت فشار اولیه نخواهد بود. این امر باعث می‌شود که ظرفیت تمیز کنندگی آنها کاهش یافته و ما مجبور می‌شویم در مساحت مربوط به پارچه طراحی مضاعفی را داشته باشیم که این امر باعث افزایش قیمت تمام شده بخصوص زمانیکه غبار با درجه حرارت بالا جمع‌آوری می‌شود را دربر خواهد داشت.

۴- پیش گرم کن‌ها

عکس ۵- ترتیب منظم سیکلونها در پیش گرمکن در صنعت سیمان را نشان می‌دهد. که این طراحی به مقدار چشمگیری انرژی مصرفی در صنعت سیمان را کاهش داده است. در هر حال تنظیم مفید موازنه انرژی سیستم برای بازیافت حداکثر حرارت بسیار ضروری بنظر می‌رسد. اگرچه امروزه کارخانجات متعددی از این سیستم‌ها استفاده می‌کنند ولی تحقیقات مختصری در این زمینه صورت گرفته است. هم اکنون در دانشگاه علم و صنعت ایران یک سیلکون تبادل حرارتی در حال طراحی و ساخت و انجام آزمایشات است تا اطلاعات حاصل از نتایج را با اطلاعات صنعتی مقایسه نموده و پارامترهای عملیاتی را برای صنعت گزارش دهند.



شکل (۵) سیستم چهار مرحله‌ای پیش گرمکن سیکلونی

۵- بهینه‌سازی خردایش سیمان

مصرف جهانی سیمان حدود ۱/۵ بیلیون تن در سال است و با نرخ ۱٪ سالانه در حال رشد است مصرف انرژی الکتریکی در تولید سیمان حدود ۱۱۰ کیلو وات ساعت برای هر تن بوده و حدود ۴۰٪ این مصرف برای خردایش کلینکر اختصاص یافته است. پتانسیلی برای بهینه کردن مدار خردایش کلینکر سیمان سنتی وجود داشته و در سالیان گذشته پیشرفت‌های قابل توجه‌ای حاصل شده است که توجه خاصی به بهینه کردن نیازهای خردایش نموده است. خردایش در آغاز و انتهای فرآیند تولید سیمان به وقوع می‌پیوندد. تقریباً ۱/۵ تن مواد اولیه لازم است تا یک تن سیمان نهائی حاصل شود.

روشهای متعددی از جمله روش Bond و همینطور روش PBM مورد بررسی قرار گرفته که با روش جدید ۱۰-۲۰٪ افزایش ظرفیت حاصل می‌شود.

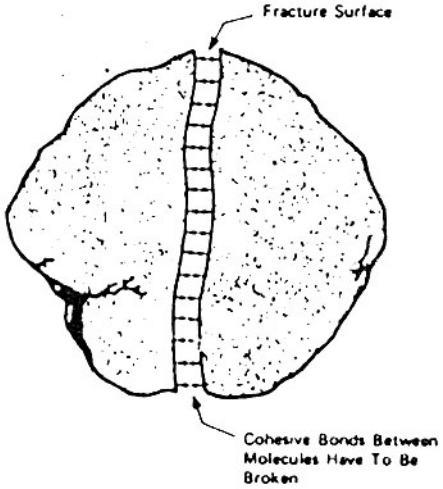
۶- قوانین و تئوریهای خردایش

۱-۶- قانون ریتنجر (Rittinger) (۱۸۵۷)

بیان می‌کند که انرژی لازم جهت شکستن، وابسته به سطح جدید ایجاد شده در واحد جرمی ماده می‌باشد. (معادله ۱)

(۱) انرژی ویژه (γ) = (مساحت سطح قدیم − مساحت سطح جدید)

و γ میانگین انرژی سطحی در هر واحد سطح می‌باشد. و معمولاً هر شکستی باعث ایجاد دو واحد سطح جدید می‌شود و نیازمند 2γ انرژی جهت شکستن نیروهای پیوندی قبل از تشکیل سطوح می‌باشد. (عکس ۶) حال برای پارامترهای طراحی انرژی آسیاب لازم است که رابطه انرژی سطح مصرفی آسیاب و سطح انرژی را بدست آورد.



شکل (۶) نمایش انرژی پیوندی بین سطوح شکسته شده

۲-۶- رُز (Rose) در سال ۱۹۶۷

با اندازه‌گیری دقیقی از موازنه انرژی در آسیاب نشان داد که انرژی سطحی تنها کسر کوچکی از انرژی مصرفی آسیاب می‌باشد. و با محدودیت‌های آزمایشی آن زمان متوجه شد که همه انرژی برای آسیاب بصورت گرما، صدا، یا برای انتقال فاز بکار گرفته می‌شود. و دلیلی وجود ندارد که ما فرض کنیم که انرژی مصرفی آسیاب مضرب ثابت بزرگی از γ باشد و هضم این ایده مشکل است که بگوییم که یک دهم از یک درصد انرژی مصرفی بتواند کل فرآیند را کنترل نماید.

کسری از انرژی مصرفی که به انرژی سطح در یک فرآیند کنترل شده تبدیل می‌شود. بطور وسیع وابسته به ساختار شکاف و روش بکارگیری تنش دارد و در عمل این قانون تجربی بصورت معادله (۲) بیان می‌شود.

$$E_R = K_R \quad \text{(سطح جدید ایجاد شده در هر واحد جرمی شکسته شده)} \qquad (۲)$$

E_R انرژی ویژه خردایش می‌باشد. K_R اغلب بعنوان شاخص راندمان خردایش استفاده می‌شود. که واحد آن J/m^2 می‌باشد. مقدار کم آن به معنی مصرف پائین انرژی برای هر واحد سطح تولید شده می‌باشد. همینطور ماده‌ای که برای خردایش سخت باشد دارای مقدار K_R بالاتری نسبت به مواد نرم از نظر خردایش خواهد داشت.

۳-۶- قانون چارلز (charles) ۱۹۵۷

کوشش دیگری بود تا بتوان رابطه‌ای را بین مواد خرد شده و زمان را پیدا کرد. برای همین رابطه (۳) را بیان نمود.

$$P(x) = a_s x^{\alpha s} \quad 0 \le P(x) \le 1 \qquad (۳)$$

در این رابطه سعی شده که دو بخش از خط مستقیم حاصل از ترسیم داده‌ها با انرژی ویژه خردایش (که متناسب با زمان است) را مطرح نماید. در این رابطه α_S ضریب توزیع که همان شیب بخش خط راست و a_S که تابعی از زمان است $a_S = a_S(t)$.

۴-۶- محاسبات مصرف انرژی

روش متعارف جهت تخمین مصرف انرژی برای خردایش روش تثبیت شده Bond (1961) می‌باشد در این روش توان مورد نیاز جهت خردایش خوراک ورودی با اندزه F_{80} به محصول با اندازه P_{80} را می‌توان از رابطه (۴) بدست آورد.

$$W_m = w_i\left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}}\right) \qquad (۴)$$

که:

W_m: توان ویژه خروجی موتور kWh/t

W_i: شاخص کاری آسیاب kWh/t

P_{80}: اندازه الکی که ۸۰٪ محصول آسیاب از آن عبور می‌کند.

F_{80}: اندازه الکی که ۸۰ درصد خوراک از آن عبور می‌کند.

در سال ۱۹۷۵،رولاند (Rowland) معادلهٔ (۴) را با افزودن فاکتورهای کارآئی اصلاح نمود. و این فاکتورهای کارآئی با شرایط مختلف تغییر می‌کند. مثلاً برای خردایش خشک مدار باز قطر آسیاب، خوراک با ابعاد درشت‌تر، خردایش کمتر از ۷۵ میکرون و نسبت خردایش خیلی بزرگ و خیلی کوچک. بنابراین توان ویژه مورد نیاز برابر خواهد بود با معادله (۵):

$$W_m = EF_1\ EF_3\ EF_4\ EF_5\ W_i\left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}}-\frac{1}{\sqrt{F_{80}}}\right) \qquad (۵)$$

حال مقایسه معادله (۴) با معادله ۵ نشان می‌دهد که فاکتورهای متعددی جهت اصلاح شرایط کاری اعمال شده است. حال این شرایط و تغییرات در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱) فکتورهای اصلاحی برای سیمان

EF_1	خردایش خشک	
EF_3	قطر آسیاب	Bond: قطر آسیاب که بیش از ۸ فوت باشد. Rowland: می‌بایستی برای آسیاب با قطر ۱۲ فوت استفاده شود. و برای آسیابهای بیشتر از ۱۲ فوت قطر همان مقدار ۱۲ فوت در نظر گرفته شود.
EF_4	خوراک با اندازه درشت	Bond: اگر خوراک درشت باشد گلوله‌های بزرگتری استفاده شود. و این امر در حضور ذرات ریز موجود انجام می‌گیرد و گلوله‌ای کوچک ذرات درشت را نخواهند شکست و تنها زمانی EF_4 استفاده شود که F_{80} بزرگتر از F_o و مقداری بیشتر از ۱ داشته باشد.
EF_5	فاکتور تصحیحی که برای ذرات ریزتر می‌باشد.	

حال برای هر یک از فاکتور تصحیحی فوق روابطی به شرح ذیل ارائه شده‌اند.

$$EF_3 = \left(\frac{8}{D_{f_t}}\right)^{6.2} = \left(\frac{2.44}{D}\right)^{0.2} \qquad (۶)$$

D_{f_t}: قطر داخلی آسیاب بخش داخل لاینرها (f_t)

D: قطر داخلی لاینرها بخش داخلی (m)

$$EF_4 = \left[R_r + (W_i - 7)\left(\frac{F_{80} - F_o}{F_o} \right) \right] \Big/ R_r \qquad (۷)$$

R_r: نسبت کاهش اندازه $R_r = \frac{F_{80}}{P_{80}}$

F_o: اندازه بهینه خوراک به آسیاب (میکرون)

F_{80}: اندازه واقعی خوراک به آسیاب (میکرون)

P_{80}: اندازه محصول آسیاب (میکرون)

و نیز

$$EF_5 = \frac{P_{80} + 10.3}{1.145 * P_{80}} \qquad (۸)$$

علارغم استفاده از فاکتورهای تصحیحی متعددی مشاهده گردیده که محاسبات مصرف انرژی براساس روابط Bond تفاوتهای فاحشی بین آنچه که در واقعیت دیده شده و آنچه که از روابط Bond حاصل می‌شود وجود دارد. بنابراین الزام در استفاده از فاکتورها تصحیحی وجود دارد. حال می‌توان رابطه اولیه Bond را بصورت تغییر یافته به شکل معادله (۹) بیان نمود.

$$W_C = \frac{A}{\sqrt{P_C}} W_i \left(\frac{10}{\sqrt{P_C}} - \frac{10}{\sqrt{F_C}} \right) \qquad (۹)$$

که

W_C: انرژی مصرف شده برای خردایش کلینکر kWh/t

W_i: شاخص کاری Bond

P_C: اندازه الکی که ۸۰٪ محصول پس از خردایش عبور می‌کند.

F_C: اندازه الکلی که ۸۰٪ محصول قبل از خردایش عبور می‌کند.

A: ضریب تجربی و بستگی به کلینکر و خواص سیستم خردکننده دارد.

حال با توجه به مطالب گفته شده برای سنگ شکنی و آسیابها می‌توان مصرف انرژی برای سنگ شکنی اولیه و آسیاب کردن را براساس مدل Bond تخمین زد. (معادله ۱۰)

$$W = W_c + W_m \qquad (۱۰)$$

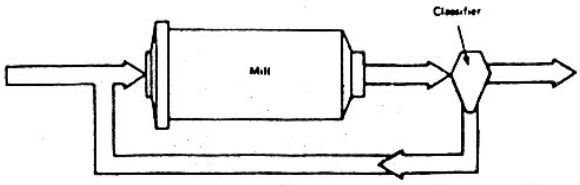
۷- نگاهی نو به مکانیزم خردایش و کاهش مصرف انرژی

۱-۷- خردایش در آسیابهای گلوله‌ای

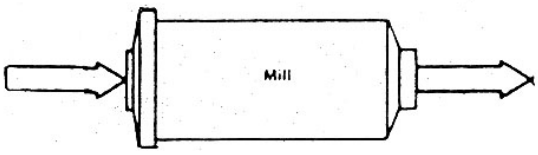
فرآیند خردایش شبیه به مهندس سینتیک می‌باشد. زمانیکه واکنشی صورت می‌گیرد تا محصول B از خوراک A حاصل شود. همواره این امکان وجود دارد که محصولاتی مثل D,C آنگونه که در معادله (۱۱) نشان داده شده حاصل شود. در هر حال این واکنش می‌تواند طوری کنترل شود که از B مقدار بیشتری تولید شده و محصولات دیگر کمتر تولید شوند. همینطور در فرآیند خردایش ما علاقمندیم که ذره تک یا در محدوده خاص را داشته باشیم و ذرات ریزتر از آن را به حداقل برسانیم.

$$A \rightarrow B + C + D + \ldots \qquad (۱۱)$$

آسیابهای گلوله‌ای معمولاً در مدار بسته آنطور که در شکل (۷) نشان داده شده بکار می‌روند و بعضی مواقع امکان بکارگیری آنها در مدار باز نیز وجود دارد. شکل (۸). و معمولاً پارامترهای عملیاتی عبارتند از مقدار بار، مقدار گلوله، توزیع اندازه گلوله‌ها و سرعت آسیاب می‌باشد. سرعت آسیا معمولاً تحت کنترل اپراتور نبوده و توسط کارخانه تولید کننده با توجه به اطلاعات داده شده خریدار تثبیت شده است.



شکل (۷) خردایش در مدار بسته



شکل (۸) خردایش در مدار باز

۲-۷- تئوری اندازه ذرات

اندازه محصول سیمان توسط عدد بلین $\left(m^2/gr\right)$ یا ماکزیمم اندازه ذره مثل صددرصد کمتر از ۹۰ میکرون بیان می‌شوند. در اینجا این امکان وجود دارد که بتوان سیمانی تولید کنیم که پاسخگوی سیمانی با عدد بلین مربوطه بوده ولی دارای توزیع اندازه متفاوتی باشد. و اگر بر ماکزیمم اندازه تکیه کنیم ممکن است باعث خردایش بیش از حد ذرات شویم. این عمل باعث خواهد شد که میزان خردایش را بعلت پدیده تشکی کاهش داده و در نتیجه انرژی مورد نیاز خردایش افزایش یابد.

خردایش بیش از حد به مشکلات ثانویه دیگری مثل آلودگی محیط زیستی را دامن می‌زند. در نتیجه بنظر می‌رسد که ضروری است که توزیع کامل ذرات برای خوراک و همینطور محصول را داشته باشیم. تا بتوانیم سیستم عملکرد آسیاب را بهینه نمائیم. خردایش بیش از حد را می‌توان کاهش داد اگر آسیاب با توجه به مشخصات ویژه خردایش مورد مطالعه قرار گیرد.

۳-۷- تئوری خردایش

فرآیند خردایش را می‌توان به دو عملیات تقسیم‌بندی کرد: تابع انتخاب و تابع شکست.

۱-۳-۷- تابع انتخاب S

تابع انتخاب نشانگر کسری از اندازه‌ی خوراک است که برای عملیات خردایش انتخاب شده‌اند. تابع انتخاب بصورت معادله (۱۲) به اندازه ذره مرتبط می‌باشد. [۳]

$$S(x) = a\,x^b \qquad (۱۲)$$

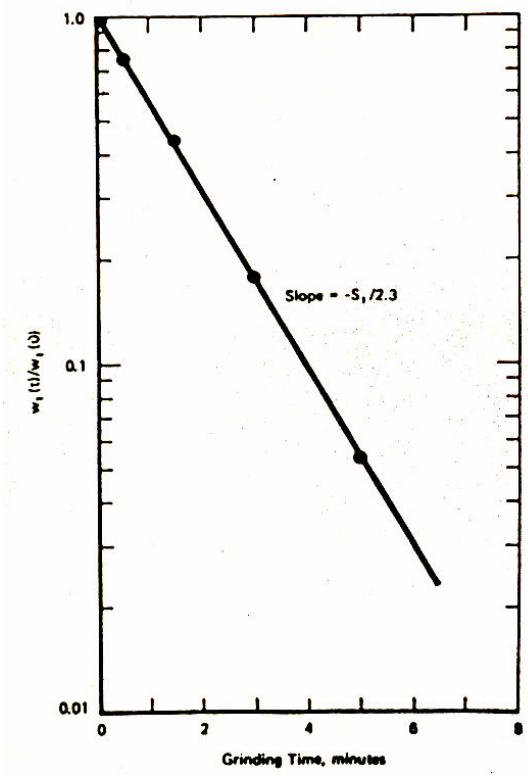
a: ثابت ـ بستگی به ماده خرد شده دارد.

b: ثابت ـ بستگی به شرایط عملیاتی آسیاب دارد.

مقادیر ثابت معادله ۱۲ را باید بطور تجربی بدست آورد.

۲-۳-۷- تخمین تابع انتخاب

برای تخمین تابع انتخاب کسری از خوراک با ابعاد نزدیک بهم را در درون آسیاب قرار داده و مقادیر بار مـواد و بار گلوله در مقادیر مورد دلخواه تنظیم می‌گردد و آسیاب برای زمان کوتاهی عمل کرده و مواد پودر شده را جهـت تخمین مقدار اندازه خوراکی که خرد نشده و باقی مانده آنالیز می‌شود. بعد از آنالیز اندازه، پودر آنالیز شده با بـاقی مواد در آسیاب مخلوط شده و بـــرای زمان بعدی خرد می‌شوند. منحنی نشان داده شده در عکس (۹) بـه کمـک مقدار مواد خرد نشده $W_i(t)$ در زمانهای مختلف بدست می‌آید. همینطور مقادیر تابع انتخاب برای کسرهای مـواد با زمانهای مختلف خردایش محاسبه می‌گردد. شیب خط عکس ۹. مقادیر تابع انتخاب را بدست مـی‌دهـد. در ایـن آنالیز خردایش از نوع درجه اول را فرض کرده‌ایم.



شکل (۹) تخمین تابع انتخاب

بدین ترتیب مقادیر توابع انتخاب برای شرایط مختلف عملیاتی آسیاب تعیین شده و مقادیر ثابـت معادلـه (۱۲) را بدست می‌آوریم.

۳-۳-۷- تخمین تابع شکست : b_{ij}

این اتفاق بعد از اینکه مواد برای خردایش انتخاب شدند صورت می‌گیرد. و بصورت کسری از اندازه مواد حاصل شده از یک اندازه خوراک خاص تعریف می‌شود. برای مثال:

$b_{1,1}$: یعنی کسری از اندازه ماده ۱ انتخاب شده ولی خرد نشده و باقیمانده

$b_{2,1}$: یعنی کسری از ماده با اندازه ۲ تشکیل شده از اندازه ۱

محصول حاصل در هر فاصله زمانی بدست آمده از خردایش به هنگام تخمین تابع انتخاب می‌بایستی برای توزیع کامل ذرات آنالیز شود. این امر کمک به تخمین تابع شکست خواهد نمود. حال توزیع کامل اندازه را می‌توان با حل معادله موازنه اندازه (۱۳) حل نمود.

$$dw_i/dt = -S_i + b_{i,j} S_j W_i \qquad (۱۳)$$

عملیات خردایش برای شرایط شرح داده شده در جدول ۲ آورده شده است. [۱و۳]

جدول (۲) عملیات خردایش

Feed size mm	Selection function	Breakage function			
–1+0.5	S (1)	b(1,1)	0	0	0
–0.5+0.3	S (2)	b(2,1)	b(2,2)	0	0
–0.3+0.2	S (3)	b(3,1)	b(3,2)	b(3,3)	0

۸- نتیجه‌گیری

آنچه که در ارتباط با مطالب فوق می‌توان بیان داشت اینست که تخمین توزیع اندازه ذرات خوراک و محصول به هنگام عملیات منجر به صرفه‌جوئی در مصرف انرژی خواهد شد. آنالیز معادلات مداری در مقالات علمی می‌بایستی جهت فهم فرآیند خردایش برای صرفه‌جویی انرژی در صنعت سیمان بکار گرفته شوند. مدل معادلات عملکردی می‌بایستی جهت شناسایی طراحی سیلکونهای موجود و توسعه طرحهای جدید استفاده شده و معادلات موازنه انرژی می‌بایستی با ثبت کردن متوالی عملیات پیش گرمکن‌ها جهت بازیافت کامل حرارتی انجام گیرد. علاوه بر این نگاه نو به توابع انتخاب و شکست و حل معادلات مربوط نه تنها باعث استفاده بهینه از سیستم خردایش و کاهش انرژی شده بلکه افزایش ظرفیت را نیز بهمراه خواهد داشت.

مراجع

1- Austin, L. G. and P. Bagga, Analysis of fine dry grinding in ball mills, Powder Technol., Vol. 28, 83 (1981).

2- Shrikant, Phadnis and Pitchumani, B., Computer analysis for economic optimization of cyclone, Proc. Powder and Bulk Solids, Chicago, May (1986).

3- Fine Grinding in Stirred Ball mill. M. Habibian. PhD Thesis I.I.T- Delhi – India.