

بهینه‌سازی آسیاهای گلوله‌ای سیمان به سبک نوین

- مهندس فریدون رحمانی (شرکت سیمان یاسوج)
- مهندس محسن یعقوبی (شرکت سیمان اردستان)

چکیده

در طول دهه گذشته کارخانجات با مدار خردایش نیمه پایانی برای بهره‌گیری بهتر از راندمان انرژی در جهت تولید سیمان‌های کیفیت بالا استفاده شده‌اند. محققان دریافته‌اند که با کاهش نسبت پرشوندگی شارژ گلوله، امکان کاهش انرژی مصرفی به طور قابل ملاحظه‌ای وجود دارد. همچنین محقق گردید که نسبت $\frac{L}{D}$ روی انرژی ویژه مصرفی و ظرفیت آسیا به خوبی تاثیر می‌گذارد. به همین منظور، برنامه‌های آزمایشی گسترده‌ای با آسیای گلوله‌ای نیمه صنعتی مدار بسته انجام شده است.

در این آزمایشات، بلین دو نوع خوراک (محصول میانی به ترتیب ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ cm^2/gr) بعنوان نمونه برای مدارهای خردایش نیمه پایانی در نظر گرفته شد. بلین محصولات خردایش شده نیز به ترتیب ۳۰۰۰ و ۳۸۰۰ cm^2/gr بودند. نسبت $\frac{L}{D}$ در این آزمایشات برای چهار حالت مختلف اعداد ۱/۷۵، ۲/۱، ۲/۷۹ و ۳/۴۹ و نسبت پرشوندگی گلوله در سه حالت ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ متغیر در نظر گرفته شده بود. در این بررسی‌ها به وضوح نشان داده شد که نِسبِه بهینه $\frac{L}{D}$ و پرشوندگی شارژ گلوله برای انواع خوراک (با بلین‌های متغیر) متفاوت است. تاثیر درجه شارژ گلوله بر روی انرژی مصرفی ویژه با اندازه گلوله میانگین مشخص می‌شود که در این بررسی‌ها بوسیله آسیای گلوله‌ای ناپیوسته ارزیابی شد. نتایج آزمایشات نشان داد که انرژی مصرفی با بکارگیری سائز گلوله کوچکتر به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

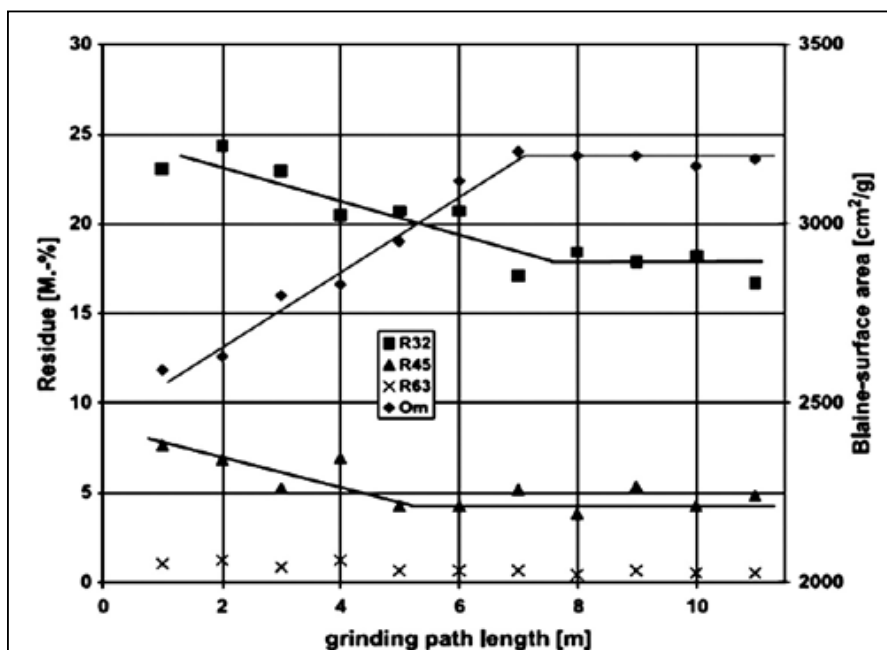
نتایج به دست آمده را می‌توان با ملاحظات تئوریک مربوط به نقش شدت تنش و تعداد وقایع تنش به خوبی توضیح داد. شدت تنش به صورت توان ورودی به ازای گلوله تعریف می‌شود که به توان سوم قطر گلوله (D^3) و تا حدودی به قطر داخلی آسیا بستگی

دارد. تعداد تنش‌ها نیز در صورت ثابت بودن درجه شارژ آسیا، با زمان ماند میانگین مواد خردایش شده داخل آسیا، مرتبط است. زمان ماند بهینه نه تنها به مواد خوراک و نتیجه دلخواه خردایش بستگی داشته، بلکه به عواملی همچون نسبت پرشوندگی شارژ گلوله و مخصوصاً به نسبت $\frac{L}{D}$ نیز بستگی دارد. بر اساس نتایج و ملاحظات موجود، بهینه‌سازی آسیاهای گلوله‌ای در کارخانجات با مدار خردایش نیمه پایانی به طور ویژه قابل حصول است.

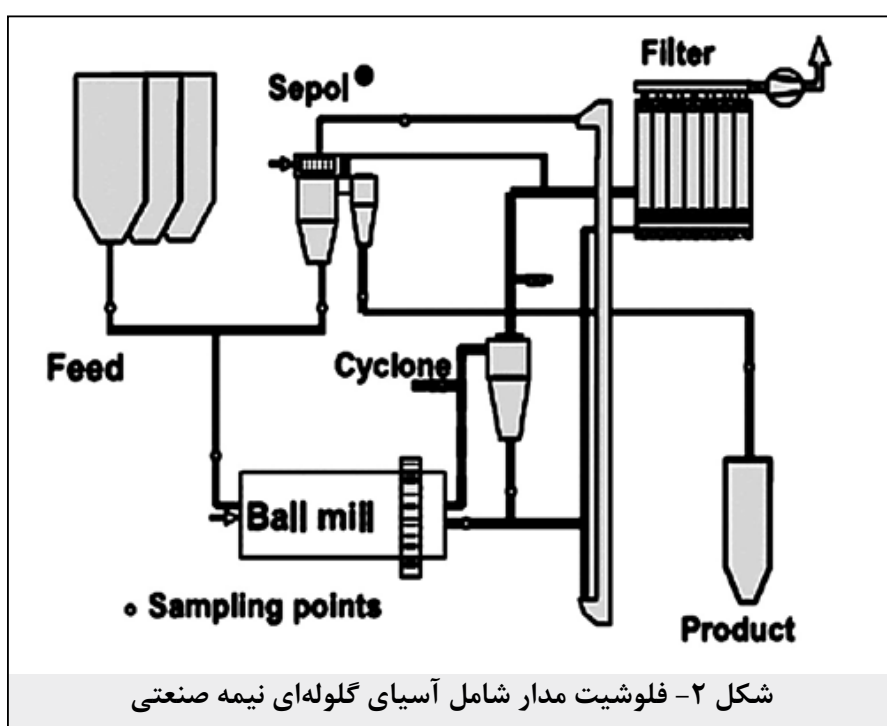
مقدمه

در طول دهه گذشته کارخانجات سیمان با مدار خردایش نیمه پایانی برای خردایش کارای سیمان‌های کیفیت بالا به کرات استفاده شده‌اند. کارهای تحقیقاتی اخیر نشان داده است که عملکرد آسیای گلوله‌ای که در مدار خردایش (با چیدمان رولر پرس)، پایین دست‌تر از $HPGR$ جانمایی می‌شود، همراه با سپراتور راندمان بالا می‌تواند به میزان قابل ملاحظه‌ای بهبود یابد. نتایج تحقیقات وسیع انجام شده بر روی مدارهای صنعتی خردایش نیمه پایانی نشان داد که با کاهش نسبت پرشوندگی شارژ گلوله از ۳۰٪ به ۲۰٪، از توان مخصوص مصرفی آسیای گلوله‌ای به طور تقریب ۲۰٪ کاسته می‌شود و در این حالت ظرفیت آسیا نیز در حدود ۲۰٪ کاهش می‌یابد.

علاوه بر این نشان داده شده است نسبت $\frac{L}{D}$ در حدود ۳ برای آسیاهای سیمان یک نسبت معمول و متداول به شمار می‌رود. شاید این نسبت برای آسیاهای گلوله‌ای در کارخانجات با مدار



شکل ۱- باقیمانده روی الک‌های ۳۲، ۴۵ و ۶۳ μm سطح مخصوص نمونه‌های گرفته شده به عنوان تابعی از طول مسیر خردایش



شکل ۲- فلوشیت مدار شامل آسیای گلوله‌ای نیمه صنعتی

۳) راه‌اندازی آزمایشی کارخانجات خردایش نیمه صنعتی

۳-۱) توصیف کارخانه: فلوشیت کارخانه نیمه صنعتی در شکل ۲ نشان داده شده است.

در این مدار، خوراک تازه و برگشتی سپراتور با هم ترکیب شده و به آسیای گلوله‌ای شارژ می‌شود. آسیای گلوله‌ای دارای قطر داخلی ۷۲/۰ متر می‌باشد. طول آن با ترکیب پوسته‌های مختلف با طول‌های ۲۵ یا ۵۰ cm در دامنه ۱/۲۵ - ۳/۵ m می‌تواند تغییر کند. شکل ۳ شماتیکی از یک آسیای گلوله‌ای نیمه صنعتی را نشان می‌دهد.

موادی که به صورت پنوماتیکی توسط هوای تهویه آسیا خارج می‌شود، در یک سیکلون و بگ فیلتر بعد از سیکلون جمع‌آوری می‌شوند و همراه با موادی که به صورت مکانیکی توسط الواتور حمل شده‌اند مجموعاً به سپراتور راندمان بالا شارژ می‌شوند. آسیای گلوله‌ای با لایرهای طبقه بندی کننده (کلاسیفایینگ) موج‌دار مخروطی مجهز می‌شود. ضخامت لایرهای لیفتینگ کاملاً مشابه

خردایش ترکیبی (Combi grinding) بالا باشد. دلیل اثبات مطلب فوق این است که هیچ پیشرفت خردایشی در یک سوم آخر کل مسیر طولی خردایش دیده نمی‌شود. نیز اضافه می‌شود که این نتایج از نسبت‌های مختلف شارژ گلوله و دبی‌های جرمی مختلف ظرفیت آسیا تاثیر نمی‌پذیرند. نمونه‌ای از این نتایج در شکل ۱ به صورت سطح مخصوص جرمی (بلین) و باقیمانده بر روی الک‌های ۳۲، ۴۵ و ۶۳ میکرون بر حسب طول مسیر خردایش آسیا (که نمونه‌گیری در مترهای مختلف انجام شده است) ترسیم شده است.

نسبت پرشوندگی شارژ گلوله و نسبت $\frac{L}{D}$ ، توامان بر روی توان ویژه مصرفی و ظرفیت تاثیرگذارند. بعلاوه میزان ریزش خالص شارژ گلوله و درجه شارژ گلوله فاکتورهای مهمی برای کارکرد بهینه آسیای گلوله‌ای به شمار می‌روند.

۲) حالت نسبت $\frac{L}{D}$ و نسبت پرشوندگی شارژ گلوله

مصرف توان ویژه همان طور که قبلاً اشاره شد از نسبت $\frac{L}{D}$ و پرشوندگی شارژ گلوله‌های آسیا تاثیر می‌پذیرد. در آسیاهای دو اتاقچه‌ای، سیمان پرتلند معمولی با بلین در حدود $3000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ تولید می‌شود. نرمی محصول خروجی آسیا در حدود $1800 \text{ cm}^2/\text{gr}$ بوده و بلین مواد ورودی به اتاقچه دوم در حدود فقط $800 \text{ cm}^2/\text{gr}$ می‌باشد، در حالی که بلین مواد ورودی به آسیای گلوله‌ای در مدارهای خردایش Combi grinding (در حدود $2000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ یا حتی بیشتر) می‌باشد. بنابراین این خوراک نمی‌تواند مستقیماً به آسیاهای گلوله‌ای یک اتاقچه‌ای در کارخانجات با مدار خردایش Combi grinding منتقل شود (به دلیل این که d_{80} مواد ورودی به آسیای سیمان خیلی ریز است، در طراحی مدار ممکن است دیافراگم بین دو اتاقچه برداشته شده و کل آسیا تک اتاقچه‌ای و مجهز به لاینر کلاسیفایینگ باشد، همچنین به علت کاهش عواملی مانند d_{80} و W_i ، شارژ ریزتر، مقدار آن کمتر و مصرف انرژی کمتر است.) اما با این وجود مقدمه خوبی برای وارد شدن به مشکلات موجود به ما می‌دهد.

توان مصرفی ویژه در طی این آزمایشات در دامنه نسبت پرشوندگی شارژ گلوله‌ای ۲۶٪، در مقادیر وسیعی ارزیابی شد. دامنه نسبت بهینه $\frac{L}{D}$ با حداقل (۳/۲) است. برای آسیاهای تک اتاقچه‌ای به دلیل عدم وجود اتاقچه اول مورد استفاده برای خردایش ذرات درشت، این نسبت بهینه بایستی کمتر باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود نسبت بهینه پرشوندگی شارژ گلوله برای آسیاهای گلوله‌ای ترکیبی کمتر باشد. به طور مثال اثر نسبت پرشوندگی شارژ گلوله برای خردایش سنگ کوارتز در حدود ۱۵٪ به یک کاهش یکنواخت در انرژی ویژه مصرفی می‌رسد.

استاتیکی تهیه شده بود. بلین (نرمی) خوراک های مورد استفاده به ترتیب ۲۲۰۰ و $3000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ بود. این اعداد نرمی محصولات واسطه اغلب کارخانجات طبیعی است که برای تولید سیمان های پرتلند تیپ ۱-۳۲۵ و ۱-۴۲۵ به کار می رود. در ضمن در این آزمایشات کمک سایش دی اتانول آمین جهت از بین بردن کوتینگ روی گلوله ها به خوراک تازه اضافه شد، خوراک ها برای رسیدن به نرمی محصول 3000 و $3800 \text{ cm}^2/\text{gr}$ خردایش شدند.

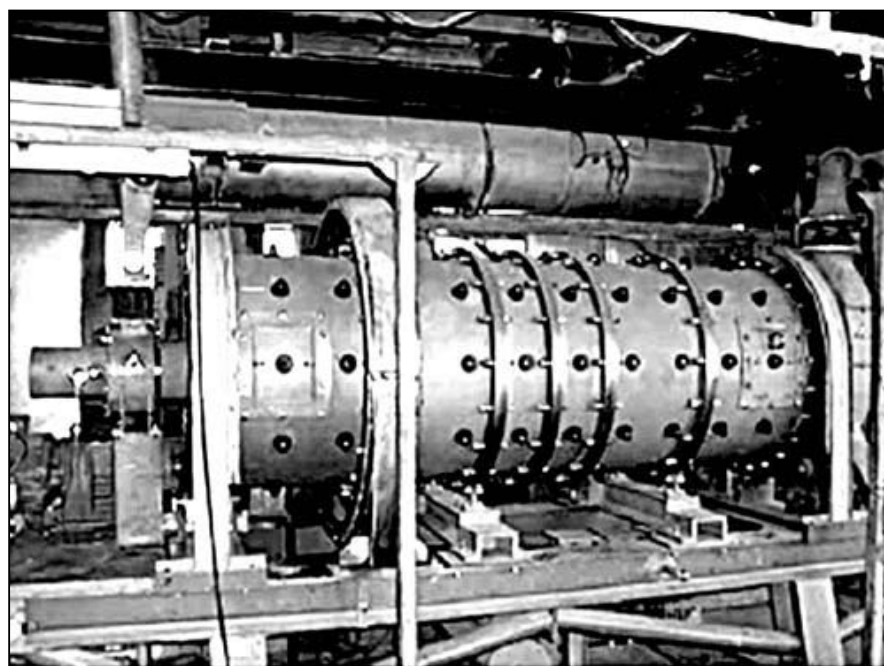
۴) نتایج آزمایشات

نتایج آزمایش در شکل های ۴ و ۵ ترسیم شده است. در هر دو شکل توان مصرفی ویژه (در سمت چپ نمودار) و ظرفیت (در سمت راست نمودار) بر اساس نسبت $\frac{L}{D}$ ترسیم شده است. شاخص مورد بحث، نسبت پرشوندگی شارژ گلوله می باشد. شکل ۴ نتایج را برای مواد خوراک درشت (بلین $2200 \text{ cm}^2/\text{gr}$) و شکل ۵ نیز نتایج را برای خوراک ریزتر (بلین $3000 \text{ cm}^2/\text{gr}$) نشان می دهد. شکل ۴ نشان می دهد که در نسبت $\frac{L}{D}$ در حدود $2/9 - 2/7$ ، ظرفیت آسیا حداکثر و در همین دامنه ($2/9 - 2/7$)، توان مصرفی ویژه حداقل است. همچنین نسبت پرشوندگی شارژ گلوله در حدود ۲۵٪ (یا بیشتر)، حالت بهینه دارد، زیرا ظرفیت به میزان قابل ملاحظه ای بالاتر می باشد (۲۰٪) که این مورد با آزمایشات انجام شده در درجات پرشوندگی پایین مقایسه گردید و در این مقایسه ملاحظه شد توان ویژه تقریباً ۷٪ کمتر می شود.

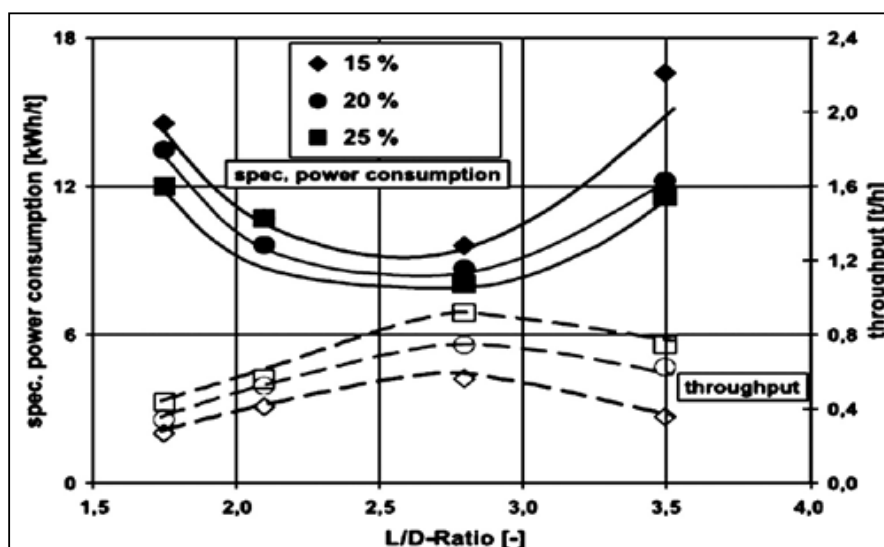
برای خوراک های ریزتر (بلین $3000 \text{ cm}^2/\text{gr}$) روال مشخصی از نسبت $\frac{L}{D}$ و ظرفیت آسیا وجود ندارد. در این آزمایش، ظرفیت آسیا بین $\frac{L}{D}$ های $2/1 - 2/7$ تقریباً ثابت می ماند. نسبت پرشوندگی شارژ گلوله ۲۵٪ در قیاس با نسبت های پرشوندگی ۲۰ و ۱۵٪، ظرفیت آسیا را در حدود ۴ و ۱۰٪ افزایش می دهد. نسبت بهینه $\frac{L}{D}$ در ارتباط با توان مصرفی ویژه در دامنه $2/4 - 2$ واقع می شود. بر خلاف خوراک درشت به نظر می رسد نسبت پرشوندگی شارژ گلوله کمتر (در حدود ۱۸٪) مفید باشد. به همین منظور برای کاربردهای صنعتی بایستی تصمیم گرفت که کدام هدف به صرفه می باشد: توان مصرفی ویژه کمتر یا ظرفیت بیشتر.

برای تعیین روند پیشرفت خردایش در مسیر اطاقچه ها، آسیا در چندین آزمایش زیر بار متوقف شده و نمونه ها در فواصل ۴۰ الی ۵۰ cm در طول مسیر خردایش گرفته شد و توزیع دانه بندی این نمونه ها توسط طیف سنج لیزری آنالیز گردید و پارامترهای تابع $RRSB$ معادله $Sperling$ و $Bennet$ رزین راملر به $PSDs$ (شیب توزیع دانه بندی) برازش شده است.

شیب $RRSB$ (n) به صورت تابعی از طول مسیر خردایش در



شکل ۳- آسیای گلوله ای نیمه صنعتی

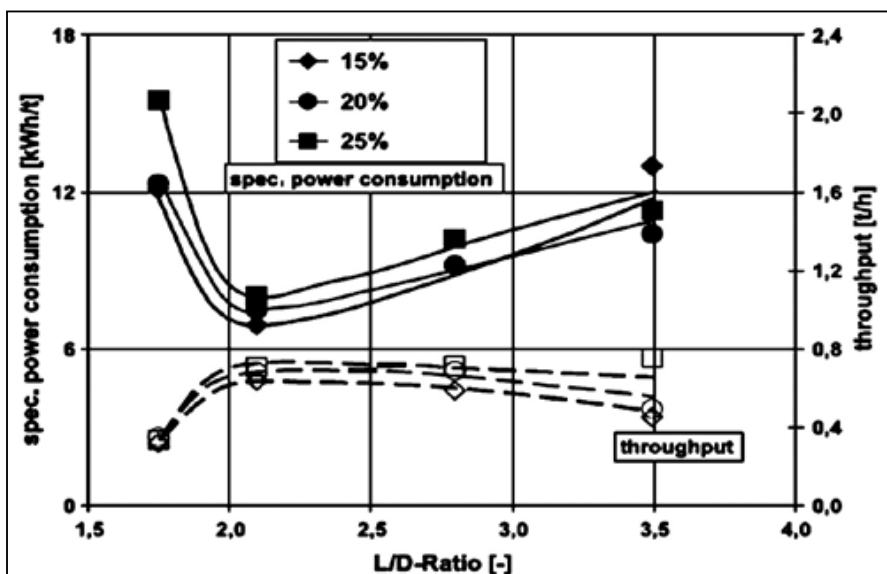


شکل ۴- توان مصرفی ویژه و ظرفیت در ارتباط با نسبت $\frac{L}{D}$ برای مواد خوراک درشت، شاخص: نسبت پرشوندگی شارژ گلوله

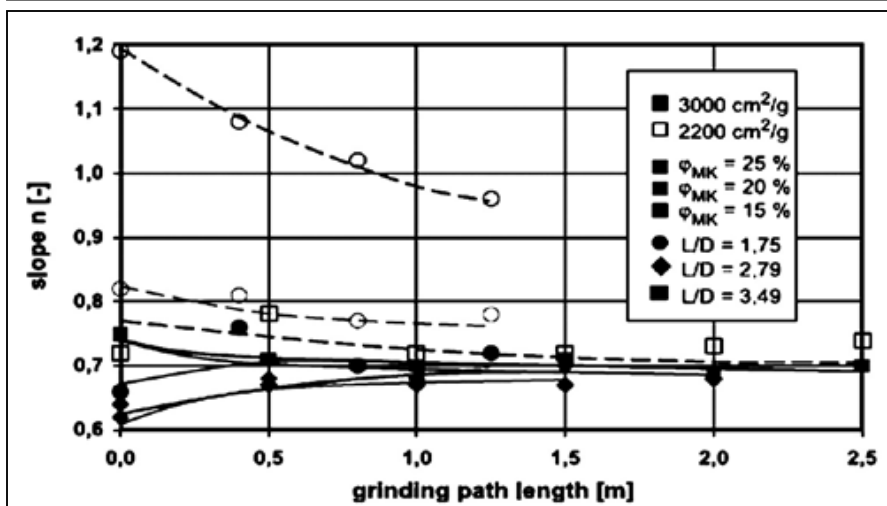
به صفحه لاینرهای مورد استفاده در صنعت می باشد. دیافراگم خروجی نیز نوع شکافدار است. درجه شارژ گلوله در طول این آزمایشات مشابه درجه استاندارد صنعتی با گلوله های بین ۱۲ و ۲۰ mm با قطر میانگین گلوله $15/8 \text{ mm}$ و وزن متوسط گلوله $15/3 \text{ gr}$ برای هر قسمت بود.

برای این آزمایشات دیافراگم خروجی سوراخدار (با منافذ قطر 4 mm ساخته شده بود). سرعت جریان هوای داخل آسیا در حدود $0/5 \text{ m/s}$ تنظیم شد. سرعت آسیا در $37/4 \text{ rpm}$ ثابت نگه داشته شده بود که در ارتباط با سرعت نسبی ۷۵٪ سرعت بحرانی آسیا است. کار لاینرهای کلاسیفایینگ در چندین نوبت مورد بررسی قرار گرفت. در چندین مرحله نرمه محصول خروجی با تغییرات سرعت قفس روتور، تنظیم شد. فاکتور بار سیرکوله نیز در این آزمایش، محدود به ۳ شده بود.

۲-۳) دو نوع مواد خوراک مورد استفاده در این آزمایشات با استفاده از مدار خردایش آسیای غلتکی فشار بالا با یک سپراتور



شکل ۵- توان مصرفی ویژه و ظرفیت در ارتباط با نسبت $\frac{L}{D}$ برای مواد خوراک ریز، شاخص: نسبت پر شونگی شارژ گلوله



شکل ۶- شیب معادله رزین راملر (n) نمونه‌ها در نسبت‌های مختلف $\frac{L}{D}$

شدت تنش (SI) نیز به صورت انرژی میانگین تعریف می‌شود و توسط هر گلوله به مواد خردایش شونده منتقل می‌شود و بایستی متناسب با توان ورودی به ازای گلوله $\frac{P}{n_k}$ باشد. پر واضح است که تعداد وقایع تنش (SN) به طور مستقیم مرتبط با میانگین زمان ماند داخل آسیا است. با توجه به مورد فوق معادله (۲) به صورت زیر در می‌آید:

$$W_m = \left(\frac{p}{n_k} \right) \left(\frac{n_k}{m} \bar{t} \right) \quad (3)$$

n_k = تعداد گلوله‌ها

توان عملیاتی (جذب شده) در آسیاهای گلوله‌ای صنعتی برای چندین دهه با فرمول تجربی زیر محاسبه می‌شد:

$$p = \frac{\pi}{4} c \phi_k \rho_k (1 - \varepsilon) \frac{L}{D} D^{3.5} \quad (4)$$

که در آن قطر داخلی آسیا (D) و نسبت $\frac{L}{D}$ ، تخلخل شارژ گلوله (ε)، دانسیته واقعی بار خرد کننده (ρ_k)، نسبت پرشوندگی شارژ گلوله (ϕ_k) و فاکتور تجربی (C) است، فاکتور C نیز به عواملی همچون نسبت پرشوندگی شارژ گلوله، درجه گلوله مورد استفاده و لاینرهای آسیا بستگی دارد.

شکل ۶ ترسیم شده است. شاخص مورد قیاس، نسبت پرشوندگی شارژ گلوله است. ملاحظه می‌گردد که شیب منحنی رزین راملر در طول مسیر خردایش به مقدار ثابتی می‌رسد. همچنین مقادیر بالای (n) برای نسبت‌های پایین $\frac{L}{D}$ ، کاهش و مقادیر پایین n برای نسبت‌های بالای $\frac{L}{D}$ در طول مسیر خردایش افزایش می‌یابد. بعلاوه به نظر می‌رسد نسبت پرشوندگی شارژ گلوله بر روی ضریب شیب $RRSB$ هیچ اثری نداشته باشد. می‌توان چنین خلاصه کرد که برای آسیاهای گلوله‌ای در کارخانجات سیمان با مدار *Combi grinding* قطعاً بایستی مقدار $\frac{L}{D}$ پایین تر از ۳ باشد. برای مواد خوراک درشت و خوراک ریز به نظر می‌رسد که ارقام $\frac{2}{7}$ و $\frac{2}{3}$ مناسب باشد. پیشنهادات ارائه شده توسط Haubold (۲۰۰۱) چنین است که نسبت‌های $\frac{L}{D}$ در دامنه ۴-۵ فقط برای آسیاهای گلوله‌ای در مدارهای خردایش نیمه پایانی قابلیت کاربرد دارد که به صورت مدار باز به کار گرفته می‌شوند. اهمیت آسیاهای گلوله‌ای مدار باز بدلیل این که اغلب مشتریان سیمانی، ذرات در حدود $500 \mu m$ را در محصول نهایی قبول ندارند، کمتر اهمیت داده می‌شوند.

۵) شدت تنش و تعداد وقایع تنش

به منظور به دست آوردن رویه‌ای مشخص در جهت بهینه‌سازی آسیاهای گلوله‌ای آنالیز تئوریک نتایج به دست آمده فواید زیادی را به دنبال دارد.

۵-۱) ملاحظات تئوریک

فرایند خردایش در آسیاهای گلوله‌ای با عوامل زیر کنترل می‌شود:

- چگونه یک ذره از مواد خردایش شونده مورد تنش واقع می‌شود (تعداد تنش)
 - با چه شدتی و چگونه ذره تحت تنش واقع می‌شود (شدت تنش)
- اگر شدت تنش (SI) و تعداد وقایع تنش (SN) بدون تغییر باشد، پیشرفت یا نتایج به دست آمده از خردایش (به عنوان مثال مساحت سطح جدید تولید شده) ثابت می‌ماند. بنابراین توان مصرفی ویژه جرمی (W_m) برای یک نتیجه خردایش معین متناسب با تولید تعداد تنش و شدت تنش می‌باشد:

$$W_m \propto SI \cdot SN \quad (1)$$

(W_m) از حاصل مصرف انرژی اندازه گیری شده آسیا در شافت p و ظرفیت محصول محاسبه می‌شود. ظرفیت نیز با تعیین میانگین زمان ماند مواد داخل آسیا بدست می‌آید:

$$W_m = \frac{p}{m} = \frac{p}{m} \bar{t} \quad \bar{t} = \frac{m}{\dot{m}} \quad (2)$$

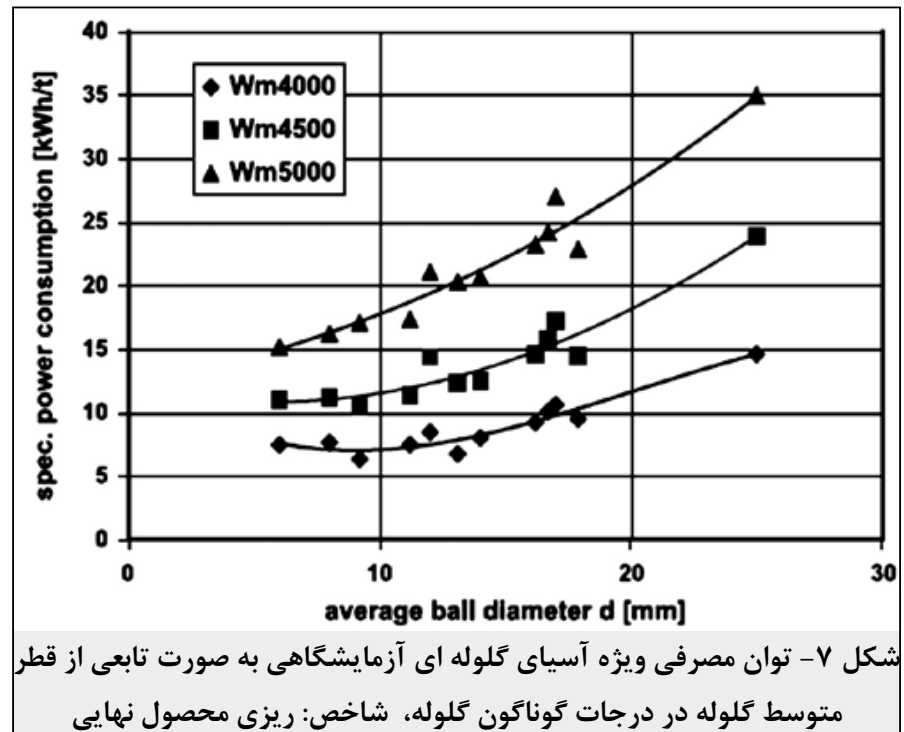
$$d = a\sqrt{x} \quad (9)$$

که در آن a = پارامتر برازش کننده و x = اندازه ذره است. مقدار پارامتر a را برای کلینکر سیمان با یک دقت مناسب می‌توان ۲۴ در نظر گرفت. خوراک آسیا با سطح مخصوص $1500 \text{ cm}^2/\text{gr}$ شامل ذرات بزرگتر از $50 \mu\text{m}$ خواهد بود. بنابراین بزرگترین گلوله‌های آسیا بایستی قطری در حدود 17 mm داشته باشد. برای ذرات زیر $50 \mu\text{m}$ ، گلوله 5 mm بایستی کافی باشد. اما این حقیقت مهم که در ارتباط با خردایش محصول واسطه در کارخانجات *Combi grinding* مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته، معمولاً نادیده انگاشته می‌شود. برای این هدف آزمایش‌هایی با آسیای گلوله‌ای ناپیوسته آزمایشگاهی با چندین درجه مختلف گلوله انجام شده است.

آسیای آزمایشگاهی (قطر 0.75 و طول 0.45 متر، نسبت پرشوندگی شارژ گلوله 10% و سرعت نسبی 88%) توسط کلینکری با سطح مخصوص بلین $2700 \text{ cm}^2/\text{gr}$ خوراک دهی می‌شود. مصرف توان مخصوص جرمی برای خردایش مواد تا نرمی‌های 3000 ، 4000 و $5000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ تعیین شده بود. نتایج در شکل ۷ ترسیم شده است.

شکل ۷ شامل توان ویژه جرمی در ارتباط با قطر متوسط گلوله در درجات گوناگون گلوله می‌باشد. می‌توان مشاهده کرد که مصرف توان با کاهش قطر گلوله کاهش می‌یابد. صرفه جویی بالقوه با افزایش نرمی محصول افزایش می‌یابد. می‌توان چنین نتیجه گرفت که با بکارگیری اندازه گلوله‌های کوچکتر محصول دلخواه نرمتر به دست می‌آید.

درجات مختلف گلوله (چند تایی) در مقایسه با درجات تکی با همان قطر متوسط گلوله (یکسان) کارایی بیشتری نشان می‌داد. در هر صورت، انتقال مستقیم این خوراک به آسیای گلوله‌ای صنعتی که به طور پیوسته کار می‌کند، ممکن نیست. دلیل اثبات این مدعا این است که موادی که در آسیاهای پیوسته خردایش می‌شوند بایستی از طریق شارژ گلوله حمل شوند. در ضمن گلوله‌های خیلی کوچک با قطر کمتر از 8 mm تمایل به شناوری دارند. به علاوه، با گلوله‌های کوچکتر، گرایش مواد به تشکیل آگلومراسیون بر روی لاینر و گلوله‌های آسیا افزایش می‌یابد. لذا تمیز کردن لاینر و گلوله‌های آسیا از پدیده آگلومراسیون با استفاده از گلوله‌های کوچکتر (به دلیل وزن و انرژی کمتر) میسر نبوده و از این رو این مورد یکی از محدودیت‌های استفاده از گلوله‌های خیلی ریز است، اما در کنار این مسائل، حذف این پدیده با افزودن کمک سایش امکان پذیر است.



شکل ۷- توان مصرفی ویژه آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی به صورت تابعی از قطر متوسط گلوله در درجات گوناگون گلوله، شاخص: ریزی محصول نهایی

برای یک قطر ثابت آسیا (d) تعداد گلوله‌های داخل آسیا می‌تواند مطابق با فرمول زیر محاسبه شود:

$$n_k = \frac{3}{2} \left(\frac{D}{d} \right)^3 \frac{L}{D} \phi_k (1 - \varepsilon) \quad (5)$$

با ترکیب معادلات (۴) و (۵) برای انرژی ورودی به ازای گلوله $(\frac{p}{n_k})$ معادله‌ای به دست می‌آید که بایستی متناسب با شدت تنش باشد:

$$BI \propto \left(\frac{p}{n_k} \right) = \frac{\pi}{6} \sqrt{D} d^3 c \rho_k \quad (6)$$

رابطه‌های اصلی بین پارامترها می‌تواند از معادله (۶) توجیه شود: انرژی به ازای گلوله با دانسیته واقعی گلوله‌ها و فاکتور بستگی دارد. بیشترین فاکتور تاثیرگذار در این فرمول توان سوم قطر گلوله است. بعلاوه نکته جالب توجه این است که در آسیاهای گلوله‌ای با قطر بزرگتر، بیشترین انرژی به ازای گلوله منتقل می‌شود.

قسمت دوم معادله (۲) با بکارگیری رابطه‌ای برای مقدار خوراک (m) که در زمان (t) در داخل آسیا موجود می‌باشد، می‌تواند به صورت معادله (۸) نوشته شود:

$$m = \frac{\pi}{4} D^3 \frac{L}{D} \rho \phi_k \rho \varepsilon (1 - \varepsilon) \quad (7)$$

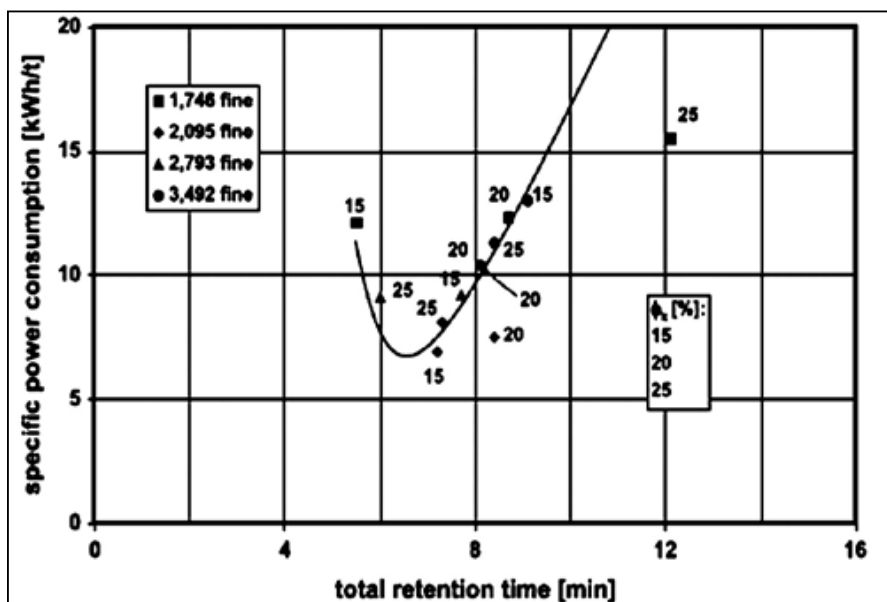
ρ = دانسیته واقعی خوراک

$$BH \propto \left(\frac{n_k}{m} \right) = \frac{6}{\pi} \frac{1}{\varepsilon} \frac{1}{\rho d^3} \quad (8)$$

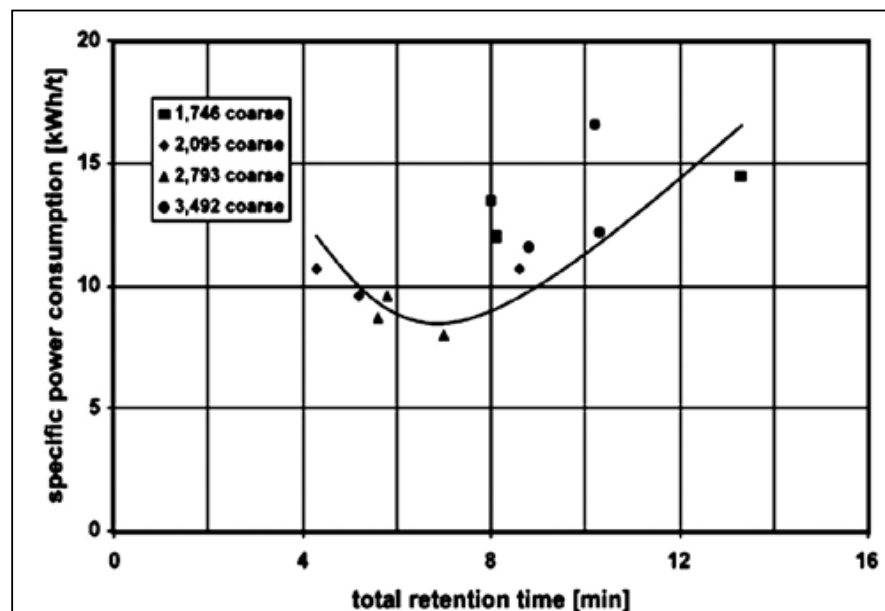
معادله (۸) نشان داد که تعداد وقایع تنش متناسب با زمان ماند داخل آسیا و با دانسیته واقعی مواد و توان سوم قطر گلوله نسبت معکوس دارد.

۲-۵) شدت تنش و قطر گلوله

قطر گلوله‌ای که قادر است ذره‌ای از اندازه معین از مواد را خردایش کند بر اساس معادله باند با معادله تجربی به شکل زیر به دست می‌آید:



شکل ۹- توان مصرفی ویژه برای مواد خوراک ریز به صورت تابعی از زمان ماند خوراک داخل آسیا، مقادیر شکل ۵



شکل ۸- توان مصرفی ویژه برای مواد خوراک درشت به صورت تابعی از زمان ماند خوراک داخل آسیا، مقادیر شکل ۴

زمان ماند بهینه فقط به مواد خوراک و نتیجه دلخواه خردایش بستگی نداشته و به عواملی همچون نسبت پرشوندگی شارژ گلوله و مخصوصاً به نسبت $\frac{L}{D}$ نیز وابسته است. اثر فاکتورهای نسبت پرشوندگی شارژ گلوله و نسبت $\frac{L}{D}$ بر روی زمان ماند مواد خردایش شونده نیز به صورت جزئی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. بعلاوه، گسترش آزمایشات راجع به تاثیر سرعت آسیا بر روی زمان ماند نیز لازم به نظر می‌رسد.

۷- مراجع

- 1-Blanc, E.C., Eckhardt, H., 1928. Technologie der Brecher, Mqhlen und Siebvorricht ungen. Springer Verlag, Berlin.
- 2-Bond, F.C., 1958. Grinding ball size selection. Mining Engineering10 (5), S. 592–S. 595.
- ۳- بنیسی، صمد. جزوه مهندسی خردایش، دانشگاه شهید باهنر کرمان، بخش مهندسی معدن(فراوری مواد معدنی)
- 4- Haubold, S., 2001. Verbesserung des Arbeitsergebnisses von Mahlanlagen fqr Zement nach der Technologie der Teilfertigmahl-ung. ZKG International 54 (10), 556– 565.
- 5- info@thyssenkrupp.com
- 6- Further studies of ball and powder filling effects in ball milling. Powder Technology 31, S. 121–S. 126.
- 7-High pressure rolls applications in the cement industry, mineral engineering,19(2006), pp 130-139.

۳-۵) تعداد وقایع تنش و زمان ماند

نتایج به دست آمده با آسیای گلوله‌ای نیمه صنعتی (مراجعه به شکل‌های ۴ و ۵) راجع به تعداد وقایع تنش (محاسبه شده از فرمول (۶)) آنالیز شده است. برای سایز گلوله تغییر نیافته و دانسیته واقعی مشابه خوراک، تعداد وقایع تنش می‌تواند با زمان ماند متوسط خوراک داخل آسیا هم ارز و معادل شود. مقادیر محاسبه شده برای مواد درشت و ریز در شکل‌های ۸ و ۹ ترسیم شده است.

هر دو شکل نشان می‌دهد توان مصرفی ویژه در زمان حدود ۷ دقیقه کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد. زمان ماند نیز از عواملی همچون نسبت پرشوندگی شارژ گلوله و نسبت $\frac{L}{D}$ تاثیر می‌پذیرد. این حقیقت که زمان ماند بهینه با نسبت‌های مختلف $\frac{L}{D}$ برای مواد خوراک درشت و ریز به دست آمده است، نشان می‌دهد که رفتار انتقال مواد فاکتور مهمی قلمداد می‌شود.

۶) نتیجه گیری

بر اساس نتایج و ملاحظات ارائه شده در این مقاله، بهینه‌سازی آسیاهای گلوله‌ای در کارخانجات سیمان با مدار خردایش *Combi grinding* امکان پذیر است. نتایج به دست آمده به خوبی با ملاحظات تئوریکی راجع به مفاهیمی همچون شدت تنش و تعداد وقایع تنش به خوبی تفسیر می‌شود. شدت تنش به صورت توان ورودی به ازای گلوله بیان می‌شود که خود بستگی به توان سوم قطر گلوله و تا حدودی نیز به قطر داخلی آسیا دارد. تعداد وقایع تنش را نیز در صورت ثابت بودن درجه شارژ گلوله می‌توان با میانگین زمان ماند مواد داخل آسیا به دست آورد.