

**تأثیر سرعت آسیا بر روی پارامترهای شکست سینتیکی کلینکر و سنگ آهک**  
 تدوین و گرد آوری: مهندس فریدون رحمانی (شرکت سیمان یاسوج)  
 مهندس محسن یعقوبی (شرکت سیمان اردستان)

چکیده :

در این مقاله تأثیر سرعت آسیا بر روی نمونه های کلینکر و سنگ آهک در کارخانه سیمان Goltas بر اساس مدل های سینتیکی در شرایط خردایش ناپیوسته (آزمایشگاهی) مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. به این منظور، در ابتدا، ۶ بخش (قسمت) مختلف از ذرات، بین سایزهای ۰,۱۰۶ و ۰,۸۵ میلیمتر با دوسری سرندی (یک سری برای کلینکر و سری دیگر برای سنگ آهک) آماده شده است. سپس معادلات  $S_j$  و  $B_{ij}$  برای توزیعات ابعادی مواد در زمانهای مختلف خردایش نوشته شده و پارامترهای مدل  $(S_i, a_T, \alpha, \gamma, \varphi_j)$  برای ۵ سرعت مختلف آسیا با هم مقایسه شده است. این سرعتها به صورت کسری از سرعت بحرانی (۵۵٪، ۶۵٪، ۷۵٪، ۸۵٪ و ۹۵٪) در نظر گرفته شده است. (سرعت بحرانی در آسیاهای گلوله ای از فرمول  $N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D_{mill}}}$  به دست می آید).

تأثیر کسر سرعت بحرانی آسیا ( $\varphi_c$ ) در آزمایشات خردایش، برای تعیین پارامتر مدل ( $a_T$ ) برای دو نمونه مختلف متفاوت است. در این آزمایشات، معادلات  $a_T = 0.0344 \exp(0.00301\varphi_c)$  برای کلینکر و  $a_T = 0.0225 \exp(0.06183\varphi_c)$  برای سنگ آهک به دست آمده است. مطالعات آشکار ساخت که خردایش بهینه آزمایشگاهی در  $\varphi_c = 85\%$  سرعت بحرانی اتفاق می افتد، در حالی که سرعت آسیا در کارخانجات سیمان، ۷۰٪ سرعت بحرانی در نظر گرفته می شود. کلمات کلیدی: خردایش، کلینکر، سنگ آهک، تابع شکست، تابع انتخاب

تابع شکست (Breakage function):

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.  $B_{i,j}$  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 انتخاب (Selection function):

نرخ شکست<sup>۱</sup>  $S_i$  بیان کننده آهنگ ناپدید شدن ماده معدنی از یک طبقه اندازه در اثر خردایش است و واحد آن عکس زمان می باشد  $(\frac{1}{\min})$ . تابع انتخاب یا نرخ شکست برای یک کانه عدد ثابتی نیست و به شرایط خردایش و روش سایش، قطر آسیا، ترکیب گلوله، رئولوژی پالپ، زمان سایش، اندازه ذرات کانه و غیره بستگی دارد. برای محاسبه تابع انتخاب باید دانه بندی خوراک ورودی آسیا، دانه بندی محصول آسیا، تابع شکست ماده معدنی و توزیع زمان ماند در وسیله خرد کننده موجود باشد.

<sup>1</sup> Breakage Rate

## ۱- مقدمه

خردایش در صنایع سیمان و فراوری مواد معدنی، فرایندی انرژی بر بوده به طوریکه در حدود ۳ تا ۴ درصد از کل انرژی جهانی را به خود اختصاص داده است. این انرژی شامل ۷۰٪ انرژی مورد نیاز در کارخانه های سیمان است. با در نظر گرفتن این فاکتورها، دستیابی به یک خردایش کارا، با در نظر گرفتن نگهداری منابع انرژی، اثر هنگفتی بر روی هزینه های عملیاتی می تواند داشته باشد. در طول دو دهه اخیر در زمینه کارایی خردایش، نه به دلیل توسعه ماشین آلات جدید که استفاه از انرژی را بهبود می بخشند (اخیرا در صنعت سیمان HPGR، Horomill و Bmill ها در مدارهای خردایش آسیای سیمان و مواد خام به کار گرفته شده است)، بلکه به دلیل طراحی و شبیه سازی بهینه مدارهای خردایش و متغیرهای عملیاتی که قادرند استفاده از انرژی را بهبود بخشند، پیشرفتهای قابل ملاحظه ای صورت گرفته است.

در طراحی مدارهای خردایش در کارخانجات سیمان، معمولاً روش باند برای تعیین ارزیابی عملکرد و تعیین انرژی مورد نیاز و اندازه آسیا، مورد استفاده قرار گرفته است. این روش، روشی پیچیده بوده و زمان زیادی را صرف می کند. به علاوه به خطاهای عملی نیز بسیار حساس است. به همین منظور روش های مختلفی توسط محققین به عنوان راهکار برای روش باند پیشنهاد شده است.

در سالهای اخیر مدل‌های ماتریکس و سینیتیک که توسط محققین ارائه شده، در آزمایشگاهها و مناطق صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل سینیتیکی که به عنوان یک گزینه امید بخش مطرح بود، خردایش را به صورت فرایندی پیوسته که در آن نرخ شکست اندازه ذرات، متناسب با جرم موجود در آن ذره است، توصیف می کند. آنالیزهای کاهش ابعادی در آسیاهای گلوله ای با استفاده از مفاهیم نرخ ویژه شکست (تابع انتخاب) و توزیع شکست اولیه در سالهای گذشته بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. بررسی برخی از مزایای این تکنیک که توسط Austin و همکارانش بررسی شد، در این مقاله ذکر گردیده است. ایشان پس از بررسی اطلاعات آزمایشگاهی آنها را در آسیاهای بزرگ مقیاس مدل کرده است.

استفاده از سیمانهای پرتلند آهکی از جنبه های فنی و اقتصادی مزایای زیادی دارد. استاندارد اروپایی prEN197-1 دو نوع سیمان پرتلند آهکی (PKZ) را معرفی کرده که یکی شامل ۲۰٪ - ۶ سنگ آهک و دیگری شامل ۳۵٪ - ۲۱ است. انتظار می رود که در آینده، تولید جهانی و استفاده از این سیمانها افزایش یابد. این مواد (مواد تشکیل دهنده سیمان PKZ شامل کلینکر و سنگ آهک) قابلیت خردایش مختلفی دارند و توزیع ابعادی هر جزئی محصول بر روی هیدراتاسیون و در نهایت عملکرد سیمان تاثیر خواهد گذاشت.

مطالعات مختلف آزمایشگاهی، کارهای نیمه صنعتی و گزارشات کارخانه ها نشان داد که سرعت آسیا به عنوان یک متغیر عملیاتی، در دانه بندی محصول خروجی (در صنعت سیمان  $d_{80}$ ، بلین، ذرات ۳ تا ۳۰ میکرون به عنوان شاخصهای دانه بندی محسوب می شوند) و در نهایت بر روی کارایی خردایش موثر است.

در روشهای مشابه نرخهای ویژه شکست نرمال با تغییر سرعت آسیا تغییر می کند. در هر حال، ماکزیمم توان در فراکسیونهای مختلفی از سرعت بحرانی، از یک آسیا به آسیای دیگر تفاوت خواهد کرد که دلیل این تفاوت به عواملی مانند قطر آسیا، نوع لیفتر، نسبت قطر گلوله به آسیا و شرایط پر شونددگی گلوله و مواد بستگی دارد. این مقدار ماکزیمم (ماکزیمم توان)، معمولاً در دامنه ۷۰٪ - ۸۵٪ سرعت بحرانی موجود است. در دامنه سرعت نزدیک به مقدار ماکزیمم، توان

مصرفی در نرخهای ویژه شکست نرمال، با سرعت دورانی تغییرات نسبتاً کمی را از خود نشان می دهد. در این دامنه تفاوت قابل ملاحظه ای بین مقادیر  $B$  (تابع شکست) با سرعت آسیا وجود ندارد.

تغییر شرایط خردایش از آبخاری کوچک به آبخاری بزرگ برای کانه دولومیت سبب بالا رفتن نرخ ویژه شکست ابعاد خوراک ( $S_i$ ) در شرایط کسر حجمی پرشوندگی گلوله ( $j=0.5$ ) و پرشوندگی ( $u=1$ ) در خردایش خشک ناپیوسته شده است (این شرایط در جدول ۲ ارائه شده است). برای این شرایط، با ۸ میله لیفت ۰٫۲۵ اینچی و پوسته با قطر ۱۰ اینچ، تغییرات در کسر بحرانی آسیا در  $\varphi_c = 75\%$  سرعت بحرانی آسیا اتفاق افتاد. گذشته از این، تغییرات برای الگوی خردایش آبخاری بزرگ با کاهش  $S_1$  همراه بوده و شاید آبخاری کوچک فعالیت مهم در داخل آسیا برای شرایط مشخص شده است.

Brame & Austin تلاش کردند که تصحیحی جهت پارامتر مدل سینیتیکی  $a_T$  در معادله (۱) و یا به منظور نشان دادن تغییرات  $S$  برای سرعتهای بحرانی آسیا مشخص کنند:

$$a_T \propto (\varphi_c - 0.1) \{1 + \exp[15.7(\varphi_c - 0.94)]\} \quad (1)$$

این مقاله، مقایسه پارامترهای شکست نمونه های کلینکر و سنگ آهک را با سرعت آسیا در شرایط استاندارد در آسیای گلوله ای آزمایشگاهی کوچک نشان می دهد در حالی که این مواد در مقیاس صنعتی با سرعتی معادل با ۷۰٪ سرعت آسیا خردایش می شوند.

## ۲- تئوری

هنگامی که شکست به عنوان یک مکانیزم کارا اتفاق می افتد، شکست هر فراکسیون مواد از سینیتیک مرتبه اول پیروی می کند. پس نرخ شکستن مواد برای بزرگترین ذره به شکل زیر بیان می شود:

$$\frac{-dw_i}{dt} = S_1 w_1(t) \quad (2)$$

با فرض اینکه  $S_1$  مستقل از زمان است (فرایند شکست مرتبه اول)، این معادله به شکل زیر در می آید:

$$\log[w_1(t)] - \log[w_1(0)] = -\frac{S_1 t}{2.3} \quad (3)$$

که  $w_1(t)$  کسر وزنی باقی مانده بر روی سرند در زمان  $t$  است.  $S_1$  نرخ ویژه شکست می باشد و از شیب  $\frac{w_1(t)}{w_1(0)}$  در مقابل زمان در منحنی نیمه لگاریتمی به دست می آید.

برای تغییر نرخ ویژه شکست با اندازه خوراک رابطه زیر توسط Austin و همکاران پیشنهاد شده است:

$$S_i = \alpha_T x_i^\alpha \quad (4)$$

که  $x_i$  حد بالایی فاصله اندازه (mm) سرند است که مواد با اندازه مختلف در آن تجمع یافته است که با اندیس  $i$  بیان می شود و  $a_T$  و  $\alpha$  پارامترهای مدل هستند که بستگی به خصوصیات مواد و شرایط خردایش دارند.

در شکست ذرات از یک سایز مشخص یک سری از شکستهای اولیه را ایجاد می کند که در قسمت پودر مخلوط می شود و این احتمال وجود دارد که دوباره شکسته شود. سری اولیه شکست مواد در سایز  $j$  می تواند به شکل  $b_{ij}$  بیان شود.  $b_{ij}$  کسری از مواد با اندازه  $j$  است که پس از شکسته شدن در طبقه I قرار می گیرد و  $n \geq i > j$  برای راحتی کار این مقادیر را به صورت جمعی بیان می کنند :

$$B_{ij} = \sum_{k=n}^i b_{kj} \quad (5)$$

که  $B_{ij}$  کسر مجموع مواد کوچکتر از اندازه بالایی فاصله اندازه  $i$  است که در نتیجه شکست اولیه مواد در سایز  $j$  حاصل می شود.  $b_{ij} = B_{ij} - B_{i+1j}$  Austin و همکاران نشان دادند که مقادیر  $B_{ij}$  از آنالیز محصول در زمانهای خردایش کوتاه و عمدتاً با سایز  $j$  (فراکسیون  $B_{\Pi}$ ) به دست آید. معادله مورد استفاده به صورت زیر است :

$$B_{ij} = \frac{\log[1 - P_i(0)] / \log[1 - P_i(t)]}{\log[(1 - P_{j+1}(0))] / \log[(1 - P_{j+1}(t))]} \quad n \leq i \leq j+1 \quad (6)$$

که  $P_i(t)$  کسر وزنی بار آسیا کوچکتر از  $x_i$  در زمان  $t$  است.  $B_{ij}$  می تواند با یک معادله تجربی به شکل زیر برآش شود :

$$B_{ij} = \varphi_j \left[ \frac{X_{i-1}}{X_j} \right]^\gamma + (1 - \varphi_j) \left[ \frac{X_{i-1}}{X_j} \right]^\beta \quad n \leq i > j \quad (7)$$

که در آن :

$$\varphi_j = \varphi_1 \left[ \frac{X_i}{X_1} \right]^{-\delta} \quad (8)$$

که  $\delta$ ،  $\varphi$ ،  $\gamma$  و  $\beta$  پارامترهای مدل بوده و به خصوصیات مواد بستگی دارند. مشخص شد که توابع  $B$  با تغییر در نسبتهای پرشوندگی آسیا و قطر آسیا تغییر نمی کند و اگر مقادیر  $B_{ij}$  مستقل از اندازه اولیه باشند لذا تابع شکست نرمال بوده و بنابر این  $\delta = 0$  است.

(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 غیر نرمال باشد. چنانکه تابع شکست قابل نرمال شدن باشد، فرمول زیر بر قرار می باشد:

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

و چنانچه تابع شکست به صورت غیر نرمال باشد، با تغییر ابعاد بار اولیه، تابع شکست تغییر می‌کند. در این صورت جهت محاسبه تابع شکست، فرمول زیر ارائه می‌گردد:

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

$d_i$  - برابر ابعاد ذراتی است که در یکی از فراکسیون‌های پایین‌تر با فاصله  $\sqrt{2}$  قرار دارد،  $d_1$  برابر ابعاد خوراک بار اولیه می‌باشد (بالاترین سرنده در آنالیز سرنده)،  $\Phi$  برابر نقطه تقاطع امتداد بخش خطی منحنی با محور قائم می‌باشد،  $\alpha$  برابر شیب پایین‌ترین قسمت توزیع تجمعی می‌باشد،  $\beta$  دیگر پارامتر توزیع سایز می‌باشد.

مقادیر  $\Phi$  و  $\alpha$  و  $\beta$  را می‌توان با رسم نمودار لگاریتمی کاهش ابعاد در صورت جمعی عبور کرده، بدست آورد. سایز  $z$  تنها مورد یکبار شکست قرار گرفته و ذرات حاصل از شکست در طبقات پایین‌تر که اندازه کاهش آنها ضریبی از  $\sqrt{2}$  می‌باشد تقسیم می‌شود. احتمال این تقسیم با  $B_{ij}$  نشان داده می‌شود و برابر با قسمتی از وزن مواد است که از اندازه  $z$  شکسته شده و به سایزهای پایین‌تر از  $z$  رفته است.

### ۳- آزمایش

#### ۳-۱- مواد

برای این آزمایشات نمونه‌های سنگ آهک و کلینکر از خط تولید کارخانه سیمان Goltas گرفته شد. ترکیبات شیمیایی کلینکر و سنگ آهک در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱)- ترکیب شیمیایی کلینکر و سنگ آهک

| Chemical composition of clinker and limestone |                  |                                |                                |       |      |                 |       |
|---|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|-------|
| Oxides  | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | SO <sub>3</sub> | LOI   |
|   | (%)              | (%)                            | (%)                            | (%)   | (%)  | (%)             | (%)   |
| Limestone                                     | 10.60            | 1.07                           | 0.59                           | 48.99 | 1.11 | -               | 38.72 |
| Clinker                                       | 22.22            | 3.61                           | 3.30                           | 67.44 | 1.80 | 1.50            | 0.11  |

LOI—Loss of ignition.

#### ۳-۲- آزمایشات خردایش

در ابتدا، آزمایشات قابلیت خردایش استاندارد نمونه‌های سنگ آهک و کلینکر انجام شد که این مقادیر برای سنگ آهک و کلینکر به ترتیب  $13,52 \text{ Kwh/t}$  و  $13,69 \text{ Kwh/t}$  به دست آمد. سری استاندارد شرایط خردایش مورد استفاده برای آزمایش، برای آسیایی آزمایشگاهی با حجم  $6283 \text{ cm}^3$  در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۲)- شرایط خردایش

| Grinding conditions    |  |                                  |
|------------------------|--|----------------------------------|
| Mill                   | Diameter, $D$ (mm)                                     | 200                              |
|                        | Length (mm)  | 200                              |
|                        | Volume (cm <sup>3</sup> )                              | 6283                             |
| Mill speed             | Critical, $N_c$ (rpm) <sup>a</sup>                     | 101                              |
|                        | Operational, $\phi_c$ (%)                              | 55 65 75 85 95                   |
| Grinding media (balls) | Diameter, $d$ (mm)                                     | 25.4                             |
|                        | Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )                  | 7.8                              |
|                        | Quality  | Alloy steel                      |
|                        | Assumed porosity (%)                                   | 40                               |
|                        | Ball-filling volume fraction, $J$ (%) <sup>b</sup>     | 20                               |
|                        | Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )                  | Clinker: 3.0;<br>limestone: 2.69 |
| Material               | Powder-filling volume fraction, $f_c$ (%) <sup>c</sup> | 4.2                              |
|                        | Interstitial filling, $U$ (%) <sup>d</sup>             | 52.5                             |

<sup>a</sup> Calculated from  $N_c = 42.3/\sqrt{D-d}$  ( $D, d$  in meters).

<sup>b</sup> Calculated from  $J = (((\text{mass of balls})/(\text{ball density})) / (\text{mill volume})) \times ((1.0)/(0.6))$ .

<sup>c</sup> Calculated from  $f_c = (((\text{mass of powder})/(\text{formal bulk density})) / (\text{mill volume}))$ .

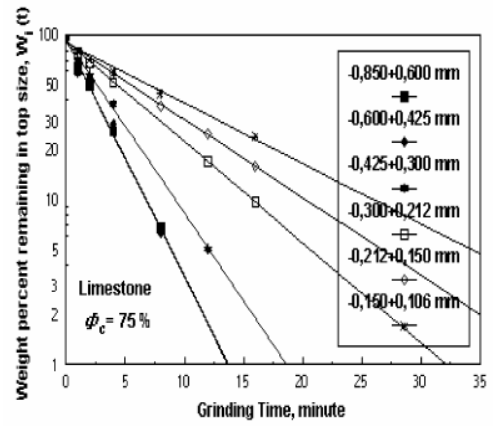
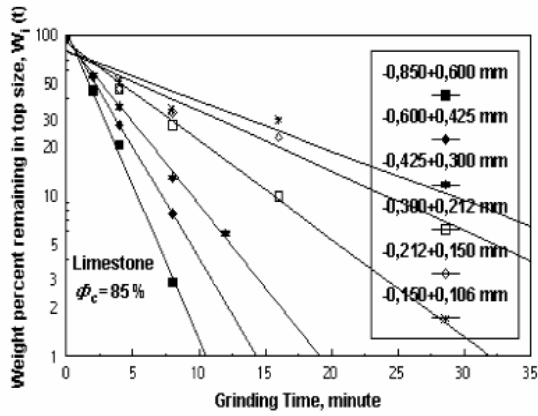
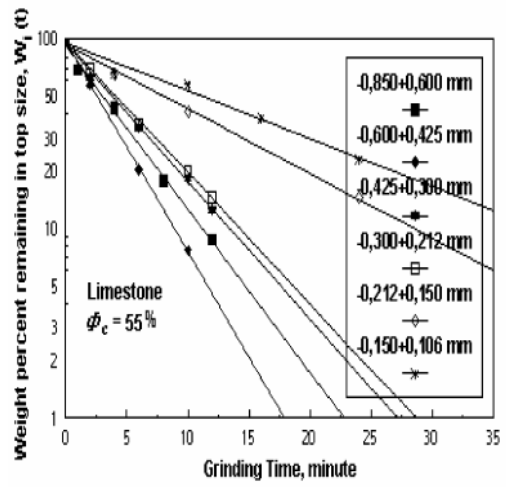
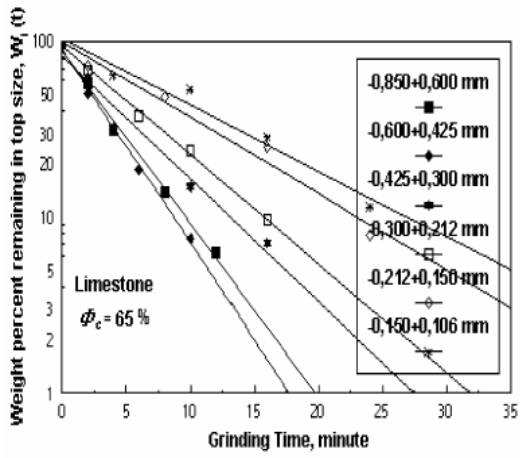
<sup>d</sup> Calculated from  $U = \frac{f_c}{0.4 J}$ .

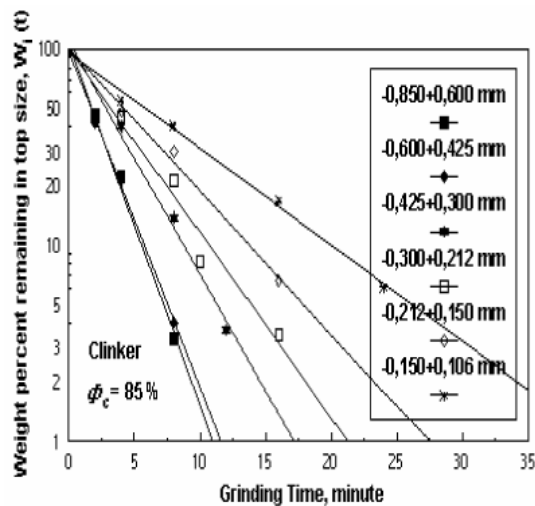
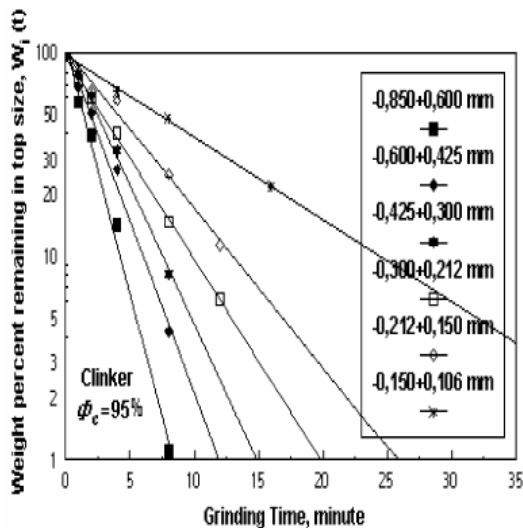
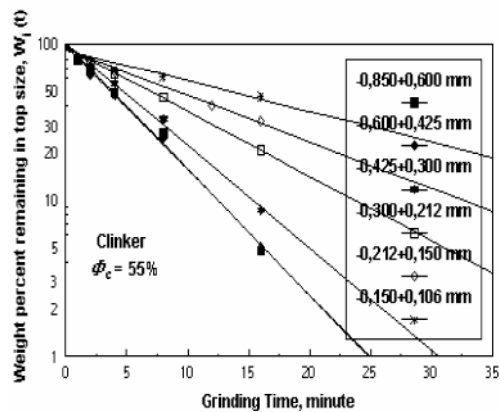
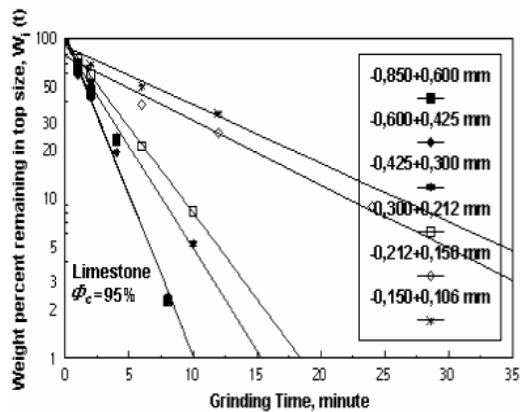
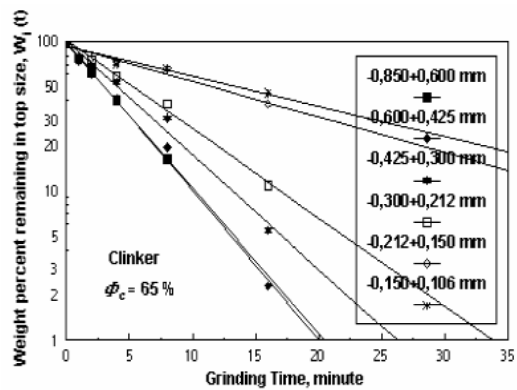
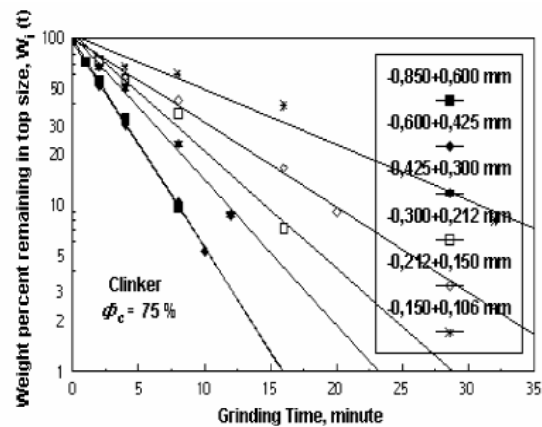
برای آزمایش اصلی ۶ فراکسیون (۰,۶۰۰+۰,۸۵۰-), (۰,۴۲۵+۰,۶۰۰-), (۰,۳۰۰+۰,۴۲۵-), (۰,۲۱۲+۰,۳۰۰-), (۰,۱۵۰+۰,۲۱۲-), و (۰,۱۰۶+۰,۱۵۰-) از هر کدام از مواد آماده کرده، و به منظور تعیین توابع شکست در زمانهای ۱، ۲، ۴، ۱۲، ۱۶ و ۱۸ دقیقه خردایش گردیدند. سپس هر نمونه از آسیا خارج شده و جهت تعیین آنالیز ابعادی، سرند گردید.

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- تعیین پارامترهای $S$

نمودارهای درجه اول برای اندازه های مختلف خوراک و سنگ آهک درشکلهای ۱ تا ۱۰ ارائه شده است.

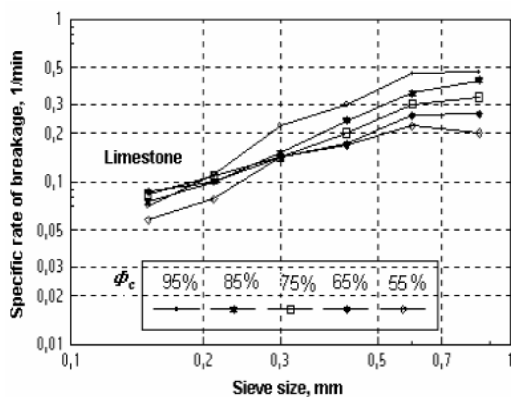




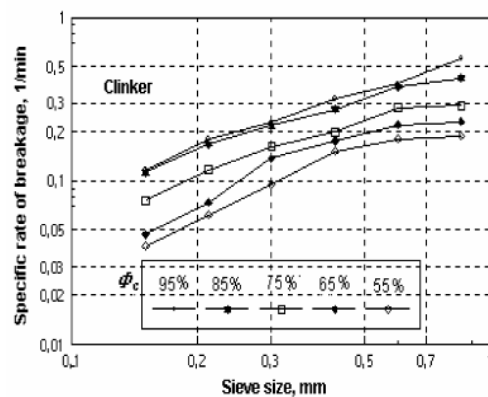
شکلهای (۱) تا (۱۰) - نمودار درجه اول برای سنگ آهک و کlinker در ۵۵٪، ۶۵٪، ۷۵٪، ۸۵٪ و ۹۵٪ سرعت  
 بحرانی

نتایج نشان داد که به طور کلی شکستها از سینیتیک درجه اول پیروی می کنند و مقادیر  $S_i$  از شیب خط مستقیم نمودارهای درجه اول به دست می آید (جدول ۳ و ۴). به علاوه شکلهای ۱۱ و ۱۲ نشان می دهد که  $S_i$  در ارتباط با کسر سرعت بحرانی آسیا و اندازه ذرات کلینکر و سنگ آهک است.

خردایش فراکسیونهای تشکیل دهنده کلینکر و سنگ آهک نشان داد که اولاً همه نمونه ها از سینیتیک شکست درجه اول پیروی کرده و ثانیاً توزیع شکست اولیه نیز نرمال است (تابع شکست نرمال است). اضافه می نماید که مقادیر توزیع شکست اولیه و همچنین ضریب  $a_T$  در رابطه  $S_i = \alpha_T x_i^a$  برای دو نمونه متفاوت است. به عبارت دیگر زمانی که  $S_i$  یا  $a_T$  افزایش می یابد، شکست موثر و کارا نیز فزونی می یابد در نتیجه این رویکرد، مواد به سرعت به زیر اندازه اولیه خود می رسند. مقادیر آزمایشی به دست آمده از  $a_T$  نشان داد هنگامی که بر کسر سرعت بحرانی افزوده می شود، خردایش سریعتری را شاهد خواهیم بود. نتایج خردایش همچنین بیانگر این است که خردایش کلینکر از اندازه اولیه به اندازه های کوچکتر نسبت به سنگ آهک سریعتر است.



شکل (۱۲) - نرخ ویژه شکست سنگ آهک



شکل (۱۱) - نرخ ویژه شکست کلینکر

هر بست و فیورستنا نشان دادند که تغییر مکانیزم خردایش از آبخاری کوچک به آبخاری بزرگ سبب اوج وابستگی اندازه خوراک به نرخ ویژه شکست شده است که در مطالعاتشان  $\phi_c = 75\%$  به دست آمده است. مطالعات و تحقیقات حال حاضر این مقاله موجود نشان می دهد که تغییر شرایط آبخاری کوچک به آبخاری بزرگ در  $\phi_c = 85\%$  رخ می دهد. بنابراین نتایج موجود نسبت به نتایج هر بست و فیورستنا متفاوت بوده و مقادیر  $\phi_c$  بایستی به تفاوت در خصوصیات مینرالوژیکی نمونه ها بستگی داشته باشد.

۲-۴- تعیین پارامترهای B

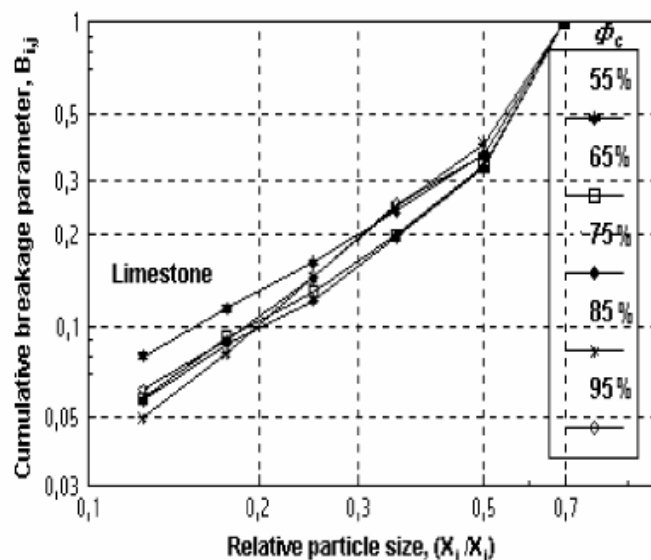
مقادیر B با استفاده از متد  $B_{II}$  (متد تابع شکست تجمعی) از روی توزیعات ابعادی محصول در زمانهای کوتاه خردایش به دست آمده است. این نتایج در جدول ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است. نتایج نمونه های سنگ آهک و کلینکر یک رفتار قابل نرمال شدن را نشان داد به طوریکه توزیع تابع شکست به اندازه ذرات خوراک بستگی نداشته و بنا بر توضیحات قبلی پارامتر مدل سینیتیکی مدل  $\delta = 0$  است. همانگونه که از اطلاعات مندرج در جدول ۳ و ۴ مشخص است، مقادیر پارامترهای مدل سرعت آسیا در مقاله برای سرعتهای بحرانی مشابه است.

جدول (۳) و (۴) - مقادیر پارامترهای مدل برای سنگ آهک و کلینکر  
Model parameter values of limestone

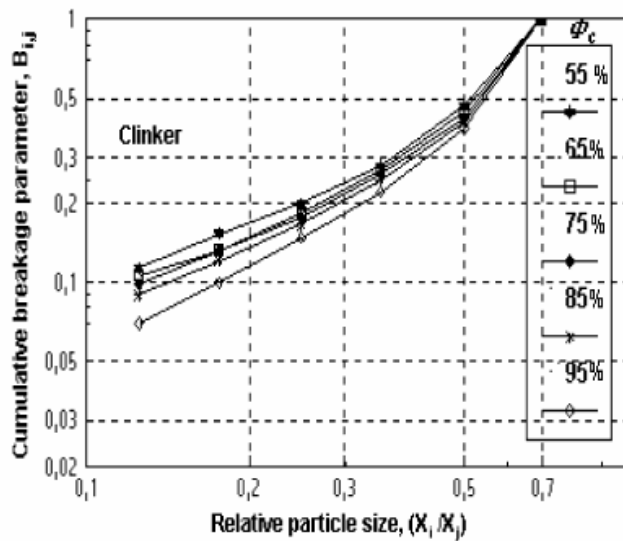
| $\phi_c$ (%) | $-0.300 + 0.212$<br>(mm) Si | $\alpha$ | $a_T$ | $\phi_j$ | $\gamma$ |
|--------------|-----------------------------|----------|-------|----------|----------|
| 55           | 0.139                       | 0.831    | 0.199 | 0.507    | 1.315    |
| 65           | 0.141                       | 0.765    | 0.273 | 0.510    | 1.336    |
| 75           | 0.142                       | 0.752    | 0.371 | 0.514    | 1.357    |
| 85           | 0.150                       | 0.833    | 0.436 | 0.504    | 1.432    |
| 95           | 0.220                       | 1.278    | 0.489 | 0.497    | 1.237    |

Model parameter values of clinker

| $\phi_c$ (%) | $-0.300 + 0.212$<br>(mm) Si | $\alpha$ | $a_T$ | $\phi_j$ | $\gamma$ |
|--------------|-----------------------------|----------|-------|----------|----------|
| 55           | 0.095                       | 1.261    | 0.191 | 0.419    | 0.801    |
| 65           | 0.137                       | 1.314    | 0.234 | 0.415    | 0.809    |
| 75           | 0.162                       | 1.249    | 0.301 | 0.413    | 0.848    |
| 85           | 0.217                       | 1.241    | 0.462 | 0.394    | 0.857    |
| 95           | 0.230                       | 1.272    | 0.611 | 0.387    | 1.081    |



شکل (۱۳) - تابع توزیع شکست تجمعی برای سنگ آهک



شکل (۱۴) - تابع توزیع شکست جمعی برای کلینکر  
 مقادیر  $\phi_c$  برای هر دو نمونه با افزایش سرعت آسیا، روند کاهشی را از خود نشان می دهد. بنابراین مقادیر  $\gamma$  برای کلینکر با افزایش سرعت آسیا تمایل به افزایش دارد. برای نمونه سنگ آهک، این مقدار تا  $\phi_c = 85\%$  تمایل به افزایش و پس از آن تمایل به کاهش دارد. بنابراین ماکزیم مقدار  $\gamma$  در ۸۵٪ سرعت بحرانی اتفاق می افتد.

Austin و همکاران ثابت کرده اند که تغییرات در مقادیر B تاثیر چشمگیری بر سرعت آسیا ندارد. در مقابل، آزمایشات اخیر، تفاوت چشمگیر مقادیر B را با سرعت آسیا را نشان می دهد. همچنین مقادیر  $B_{ij}$  در خردایش کلینکر و سنگ آهک متفاوت بوده و در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است. مقادیر  $\gamma$  برای کلینکر (۰,۸۰۱ تا ۱,۰۸۱) کمتر از سنگ آهک (۱,۴۳۱ تا ۱,۲۳۱) است و بر این نکته تاکید می کند که خردایش کلینکر نسبت به سنگ آهک مواد ریزتری را تولید می کند.

جدول (۵) - مقادیر  $B_{i1}$  برای کلینکر

| $B_{i,1}$ values of clinker |                 |                 |                 |                 |                 |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Sieve size (mm)             | $\phi_c = 55\%$ | $\phi_c = 65\%$ | $\phi_c = 75\%$ | $\phi_c = 85\%$ | $\phi_c = 95\%$ |
| - 0.850 + 0.600             | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               |
| - 0.600 + 0.425             | 0.468           | 0.442           | 0.422           | 0.404           | 0.386           |
| - 0.425 + 0.300             | 0.277           | 0.268           | 0.259           | 0.246           | 0.221           |
| - 0.300 + 0.212             | 0.192           | 0.182           | 0.176           | 0.166           | 0.148           |
| - 0.212 + 0.150             | 0.153           | 0.133           | 0.130           | 0.121           | 0.100           |
| - 0.150 + 0.106             | 0.113           | 0.107           | 0.098           | 0.090           | 0.067           |

جدول (۶) - مقادیر  $B_{i1}$  برای سنگ آهک

| $B_{i,1}$ values of limestone |                 |                 |                 |                 |                 |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Sieve size (mm)               | $\phi_c = 55\%$ | $\phi_c = 65\%$ | $\phi_c = 75\%$ | $\phi_c = 85\%$ | $\phi_c = 95\%$ |
| - 0.850 + 0.600               | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               |
| - 0.600 + 0.425               | 0.366           | 0.339           | 0.333           | 0.401           | 0.366           |
| - 0.425 + 0.300               | 0.241           | 0.201           | 0.198           | 0.247           | 0.254           |
| - 0.300 + 0.212               | 0.163           | 0.130           | 0.122           | 0.145           | 0.145           |
| - 0.212 + 0.150               | 0.115           | 0.092           | 0.088           | 0.082           | 0.090           |
| - 0.150 + 0.106               | 0.080           | 0.058           | 0.057           | 0.050           | 0.062           |

۳-۴- تغییر مقادیر  $a_T$  با کسرهای سرعتهای بحرانی آسیا تغییرات  $a_T$  سرعت آسیا توسط Austin و Brame در معادله ۱ به صورت فرمول در آمده است. به طور مشابه معادلات ۹ و ۱۰ با استفاده از شکل ۱۵ فرموله شده اند که تغییر مقادیر  $a_T$  با کسر سرعت بحرانی برای هر دو نمونه را نشان می دهد. فرمولهای ارائه شده توسط این دانشمندان مختلف هستند:

برای کلینکر:  
(۹)

$$a_T = 0.0344 \exp(0.00301\phi_c) \quad r^2 = 0.98$$

و برای سنگ آهک:  
(۱۰)

$$a_T = 0.0225 \exp(0.06183\phi_c) \quad r^2 = 0.96$$

همانطور که از شکل ۱۵ مشخص است مقادیر  $a_T$  کلینکر ( $a_T = 0.191 - 0.611$ ) بیشتر از مقادیر  $a_T$  سنگ آهک ( $a_T = 0.199 - 0.489$ ) است. این موارد نشان می دهد که خردایش کلینکر از ابعاد اولیه خود، سریعتر از سنگ آهک صورت می پذیرد که علت آن را باید در نحوه تشکیل کلینکر بررسی کرد که طی یک فرایند حرارتی تشکیل می شود.

### ۵- نتیجه گیری

اگر چه اندیس باند نمونه های کلینکر و سنگ آهک به هم نزدیک است (مقادیر اندیس کار برای نمونه های سنگ آهک و کلینکر به ترتیب ۱۳,۵۲ و ۱۳,۶۹ کیلووات ساعت بر تن به دست آمد)، اما مشخص شده است که این مواد دارای خصوصیات کاملاً متفاوتی در پارامترهای مدل تابع شکست و تابع انتخاب هستند. به علاوه این نمونه ها در تابع توزیع شکست تجمعی به ابعاد ذرات وابسته نیستند.

در این مطالعه مشخص شد که خردایش بهینه آزمایشگاهی در ۸۵٪ سرعت بحرانی اتفاق می افتد که با خردایش بهینه در کارخانه های سیمان که در ۷۰٪ سرعت بحرانی اتفاق می افتد، متفاوت است. آنالیزهای رگرسیونی برای مدلسازی  $a_T$  با کسر سرعت بحرانی آسیا ( $\phi_c$ ) ضرایب تصحیحی ۰,۹۸ و ۰,۹۶ را برای کلینکر و سنگ آهک به دست آورده است.

این مطالعه نشان داد که پارامترهای سینتیکی خردایش برای کلینکر و سنگ آهک متفاوت است و بنابراین هدف اصلی از تعیین سینتیکیهای خردایش مواد، کاهش هزینه های انرژی در فرایندهای خردایش و دستیابی به سرعت بهینه برای خردایش در آسیاهای گلوله ای به شمار می رود.

#### منابع:

- [1] D.W. Fuerstenau, J.J. Lutch, A. De, The effect of ball size on the energy efficiency of hybrid-pressure roll mill/ball mill grinding, Powder Technol. 105 (1999) 199–204.
- [2] M. O'ner, Ball size rationing affects clinker grinding, World Cem. Res., (1999 February) 101– 106.
- [3] L.G. Austin, R. Bagga, M. Celik, Breakage properties of some materials in a laboratory ball mill, Powder Technol. 28 (1981) 235– 241.
- [4] S. Tsvilis, N. Voglis, J. Photou, A study on the intergrinding of clinker and limestone, Miner. Eng. 12 (1999) 837–840.
- [5] L.G. Austin, R.R. Klimpel, P.T. Luckie, Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling, A.I.M.E., S.M.E., New York, 1984.
- [6] J.A. Herbst, D.W. Fuerstenau, Influence of mill speed and ball loading on the parameters of batch grinding equation, Trans. Soc. Min. Eng. AIME 252 (1972) 169– 176.
- [7] L.G. Austin, K. Brame, A comparison of the Bond method for sizing wet tumbling mills with a size –mass balance simulation method, Powder Technol. 34 (1983) 261–274.
- [8] L.G. Austin, A review introduction to the description of grinding as a rate process, Powder Technol. 5 (1972) 1 – 7.
- [9] L.G. Austin, P.T. Luckie, Methods for determination of breakage distribution parameters, Powder Technol. 5 (1972) 215–222.
- [10] V. Deniz, A study on the specific rate of breakage of cement materials in a laboratory ball mill, Cem. Concr. Res. 33 (2003) 439–445.