بررسي آزمايشگاهي نرخ ويژه شكست(تابع انتخاب) مواد توليد كننده سيمان در آسياي گلوله اي

تدوين و گرد آوري: مهندس فريدون رحماني (شركت سيمان ياسوج)
مهندس محسن يعقوبي (شركت سيمان اردستان)

چكيده :

نرخ ويژه شكست (S_i)، كه در بيشتر مراجع به عنوان حالت درجه اول سايش پذيرفته شده است، يكي از فاكتورهاي مورد نياز براي ارزيابي فرايند خردايش، بخصوص براي فرايند خردايش اوليه در انواع مختلف آسيا به شمار مي رود.

در اين مقاله، بر اساس مدلهاي سينيتيكي تاثيرات قطر گلوله و اندازه خوراک بر روي نرخ ويژه شكست(تابع انتخاب) نمونه هايي از سنگ آهک، تراس و كلينكر در شرايط خردايش ناپيوسته مورد بررسي قرار گرفته است. ۸ بخش از هر كدام از مواد مذكور مواد بين سايزهاي ۱/۷mm و ۰/۱۰۶mm با استفاده ازسريهاي استاندارد سرندهاي با نسبت $\sqrt{2}$آماده و دانه بندي شده اند(نسبت $\sqrt{2}$از تقسيم فاصله بين چشمه هاي سرند بزرگتر به كوچكتر به دست مي آيد). نرخهاي ويژه شكست (S_i)، بر اساس شيب نمودارهاي توزيع اندازه مواد بر اساس زمانهاي مختلف خردايش تعيين مي شود. همچنين مقايسه اي بين مقادير تابع انتخاب براي قطرهاي مختلف گلوله(۹/۵، ۲۵/۴، ۴۱ ميليمتر) صورت پذيرفت.

نتايج تحقيقات انجام شده نشان دا كه تغييرات نرخ ويژه شكست(تابع انتخاب) با ابعاد خوراک مواد تشكيل دهنده سيمان مرتبط است و معادلات تجربي بيان شده، مدلسازي پذيرفت. آن را با اندازه خوراک و قطر گلوله نشان مي دهند.

تابع شكست(*Breakage function*):

تابع شكست بيانگر نحوه توزيع دانه بندي يك طبقه اندازه، ذرات ماده معدني پس از يك مرتبه خردايش است و با $B_{i,j}$ و $b_{i,j}$ نمايش داده مي‌شوند. B_{ij} يعني كسري از ذرات طبقه ابعادي j كه پس از خرد شدن به طبقه ابعادي ريزتر i مي‌رسند. $b_{i,j}$ يعني كسري از طبقه j كه پس از خرد شدن در طبقه i قرار مي‌گيرند. با اين تعاريف مي‌توان نوشت:

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

(تابع شكست از ويژگيهاي يك كانه است و مستقل از شرايط خردايش فرض مي‌شود. تابع شكست در ذرات مي‌تواند به صورت نرمال يا غير نرمال باشد. چنانكه تابع شكست قابل نرمال شدن باشد، فرمول زير بر قرار مي‌باشد:

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

و چنانچه تابع شکست به صورت غیرنرمال باشد، با تغییر ابعاد بار اولیه، تابع شکست تغییر مي‌کند. در این صورت جهت محاسبه تابع شکست، فرمول زیر ارایه مي‌گردد:

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

- d_i برابر ابعاد ذراتي است كه در يكي از فراكسيون‌هاي پايين‌تر با فاصله $\sqrt{2}$ قرار دارد، d_1 برابر ابعاد خوراك بار اوليه مي‌باشد (بالاترين سرند در آناليز سرندي)، Φ برابر نقطه تقاطع امتداد بخش خطي منحني با محور قائم مي باشد، α برابر شيب پايين‌ترين قسمت توزيع تجمعي مي‌باشد، β ديگر پارامتر توزيع سايز مي باشد.

مقادير Φ و α و β را مي‌توان با رسم نمودار لگاريتمي كاهش ابعاد در صورت جمعي عبور كرده، بدست آورد. سايز j تنها مورد يكبار شكست قرار گرفته و ذرات حاصل از شكست در طبقات پايين‌تر كه اندازه كاهش آنها ضريبي از $\sqrt{2}$ مي‌باشد تقسيم مي‌شود. احتمال اين تقسيم با B_{ij} نشان داده مي‌شود و برابر با قسمتي از وزن مواد است كه از اندازه j شكسته شده و به سايزهاي پايين تر از i رفته است.)

تابع انتخاب(*Selection function*):

نرخ شكست[1] S_i بيان كننده آهنگ ناپديد شدن ماده معدني از يك طبقه اندازه در اثر خردايش است و واحد آن عكس زمان مي‌باشد ($\frac{1}{\min}$). تابع انتخاب يا نرخ شكست براي يك كانه عدد ثابتي نيست و به شرايط خردايش و روش سايش، قطر آسيا، تركيب گلوله، رئولوژي پالپ، زمان سايش ، اندازه ذرات كانه و غيره بستگي دارد. براي محاسبه تابع انتخاب بايد دانه‌بندي خوراك ورودي آسيا، دانه بندي محصول آسيا، تابع شكست ماده معدني و توزيع زمان ماند در وسيله خرد كننده موجود باشد.

---

[1] Breakage Rate

۱- مقدمه

خردايش در صنايع سيمان و فراوري مواد معدني، فرايندي انرژي بر بوده به طوريکه در حدود ۳ تا ۴ درصد از کل انرژي جهاني را به خود اختصاص داده است. اين انرژي شامل ۷۰% انرژي مورد نياز در کارخانه هاي سيمان است. با در نظر گرفتن اين فاکتورها، دستيابي به يک خردايش کارا، با در نظر گرفتن نگهداري منابع انرژي، اثر هنگفتي بر روي هزينه هاي عملياتي مي تواند داشته باشد. در طول دو دهه اخير در زمينه کارايي خردايش، نه به دليل توسعه ماشين آلات جديد که استفاه از انرژي را بهبود مي بخشند(اخيرا در صنعت سيمان HPGR ، Horomill و Bmill ها در مدارهاي خردايش آسياي سيمان و مواد خام به کار گرفته شده است.)، بلکه به دليل طراحي و شبيه سازي بهينه مدارهاي خردايش و متغيرهاي عملياتي که قادرند استفاده از انرژي را بهبود بخشند، پيشرفتهاي قابل ملاحظه اي صورت گرفته است.

در سالهاي اخير مدلهاي ماتريکس و سينيتيک که توسط محققين ارائه شده، در آزمايشگاهها و مناطق صنعتي مورد استفاده قرار گرفته است. مدل سينيتيکي که به عنوان يک گزينه اميد بخش مطرح بود، خردايش را به صورت فرايندي پيوسته که در آن نرخ شکست اندازه ذرات، متناسب با جرم موجود در آن ذره است، توصيف مي کند. آناليزهاي کاهش ابعادي در آسياهاي گلوله اي با استفاده از مفاهيم نرخ ويژه شکست(تابع انتخاب) و توزيع شکست اوليه در سالهاي گذشته بسيار مورد توجه قرار گرفته اند. بررسي برخي از مزاياي اين تکنيک که توسط Austin و همکارانش بررسي شد، در اين مقاله ذکر گرديده است. ايشان پس از بررسي اطلاعات آزمايشگاهي آنها را در آسياهاي بزرگ مقياس مدل کرده است.

مطالعات مختلف آزمايشگاهي، کارهاي نيمه صنعتي و گزارشات کارخانه ها نشان داد که قطر گلوله به عنوان يک متغير عملياتي، در دانه بندي محصول خروجي(در صنعت سيمان d_{80} ، بلين ، ذرات ۳ تا ۳۰ ميکرون به عنوان شاخصهاي دانه بندي محسوب مي شوند.) ودر نهايت بر روي کارايي خردايش موثراست. Austin و همکاران نشان دادند که تغيير نرخ ويژه شکست(تابع انتخاب) در مقابل اندازه ذرات براي قطرهاي مختلف گلوله در آسياهاي گردان به صورت شکل (۱) ارائه مي شود. بعلاوه با در نظر گرفتن شاخصي همچون حجم واحد آسيا، هنکامي که قطر گلوله ها (منظور قطر بزرگترين گلوله در آسيا) کاهش مي يابد(به دليل ثابت بودن ميزان شارژ، افزايش تعداد و سطح مخصوص گلوله ها)، نرخ تماس گلوله با گلوله در واحد زمان افزايش مي يابد. زيرا تعداد گلوله ها در آسيا به صورت $1/d^3$ افزايش مي يابد. بنابراين براي قطرهاي کوچکتر گلوله، ميزان نرخ ويژه شکست(تابع انتخاب) بالاتر است.

شکل (۲) تاثیر قطر گلوله را در آسیايي با قطر m ۰/۶ به صورت رابطه $a_T \propto \frac{1}{d}$ نشان داده است. این مطالعه تاثیر قطر گلوله و اندازه خوراک را بر روي نرخ ویژه شکست نمونه هاي سنگ آهک، تراس و کلینکرتحت شرایط استاندارد در آسیاي گلوله اي آزمايشگاهي كوچک ارائه مي دهد.

۲- تئوري :

هنگامي که شکست به عنوان یک مکانیزم کارا اتفاق مي افتد، شکست هر فراکسیون مواد از سینتیک مرتبه اول پیروي مي کند. پس نرخ شکستن مواد براي بزرگترین ذره به شکل زیر بیان مي شود :

$$\frac{-dw_i}{dt} = S_1 w_1(t) \qquad (۲)$$

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

$$\log[w_1(t)] - \log[w_1(0)] = -{}^{s_1 t}\!/_{2.3} \qquad (۳)$$

که $w_1(t)$ کسر وزني باقي مانده بر روي سرند در زمان t است. s_1 نرخ ویژه شکست مي باشد و از شیب ${}^{w_1(t)}\!/_{w_1(0)}$ در مقابل زمان در منحني نیمه لگاریتمي به دست مي آید.

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

$$S_i = \alpha_T x_i^{\alpha} \qquad (۴)$$

که x_i حد بالايي فاصله اندازه (mm) سرند است که مواد با اندازه مختلف در آن تجمع یافته است که با اندیس i بیان مي شود و a_T و α پارامترهاي مدل هستند که بستگي به خصوصیات مواد و شرایط خردایش دارند.

۲- مواد

براي اين آزمايشات نمونه هاي سنگ آهک، تراس و کلينکر از خط توليد کارخانه سيمان Goltas گرفته شد. ترکيبات شيميايي سنگ آهک، تراس و کلينکر در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱)- آناليز نمونه هاي به کار برده شده در آزمايشات

Table 1
Chemical composition of samples using in experiments

	Limestone	Trass	Clinker
SiO_2 (%)	10.60	58.82	22.22
Al_2O_3 (%)	1.07	17.78	3.61
Fe_2O_3 (%)	0.59	3.91	3.30
CaO (%)	48.99	4.12	66.44
MgO (%)	1.11	0.11	1.80
SO_3 (%)	–	–	1.50
Loss on ignition (%)	36.56	3.66	1.05

۳- آزمايشهاي خردايش

در ابتدا، آزمايشات قابليت خردايش استاندارد نمونه هاي سنگ آهک، تراس و کلينکر انجام شد که اين مقادير براي سنگ آهک، تراس و کلينکر به ترتيب ۱۳,۵۲ Kwh/t، ۷/۸۵ Kwh/t و ۱۳,۶۹ Kwh/t به دست آمد. سري استاندارد شرايط خردايش مورد استفاده براي آزمايش، براي آسيابي آزمايشگاهي با حجم $6283\ cm^3$ در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲)- سري استاندارد شرايط خردايش

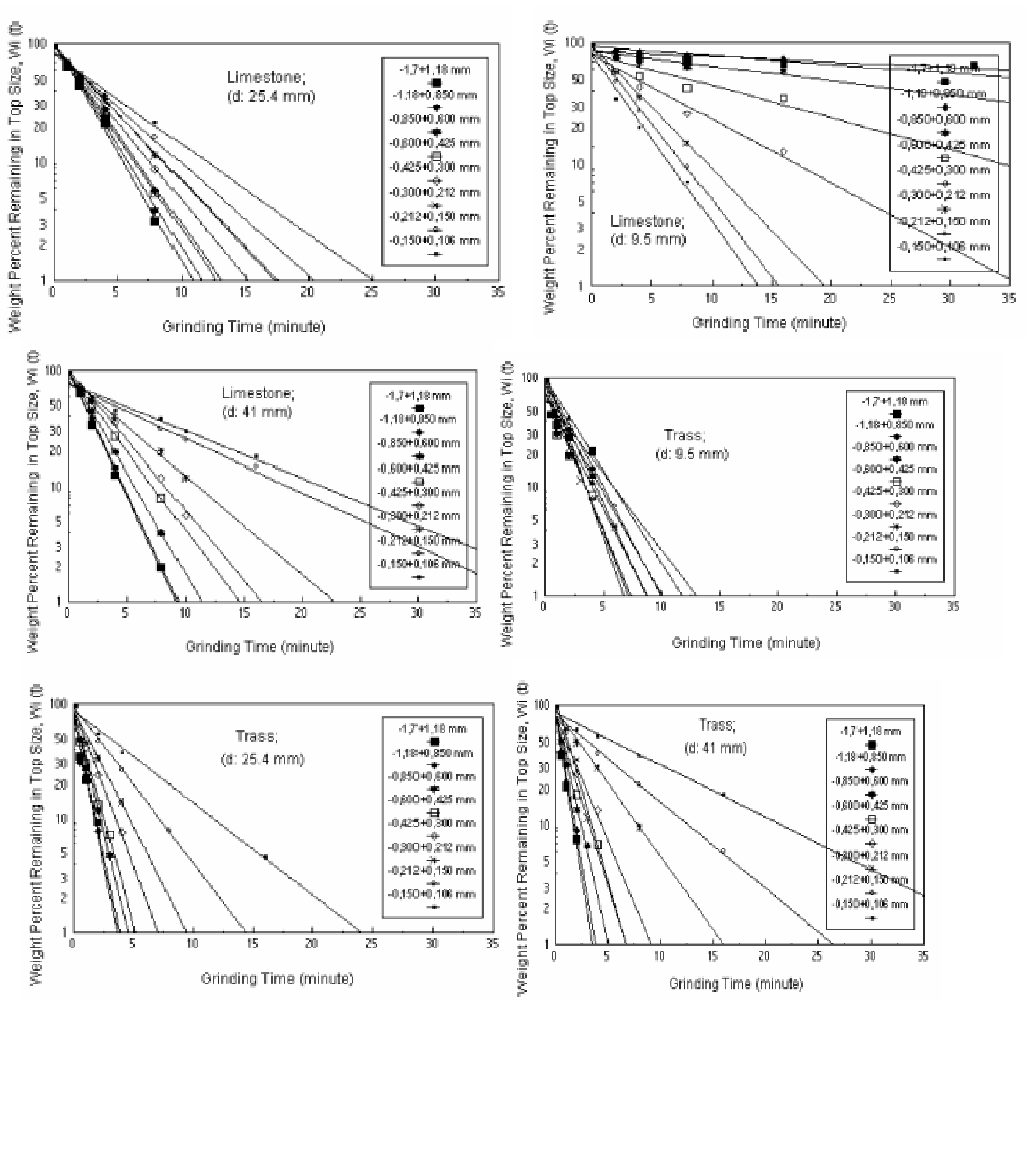
Table 2
The standard set of grinding conditions

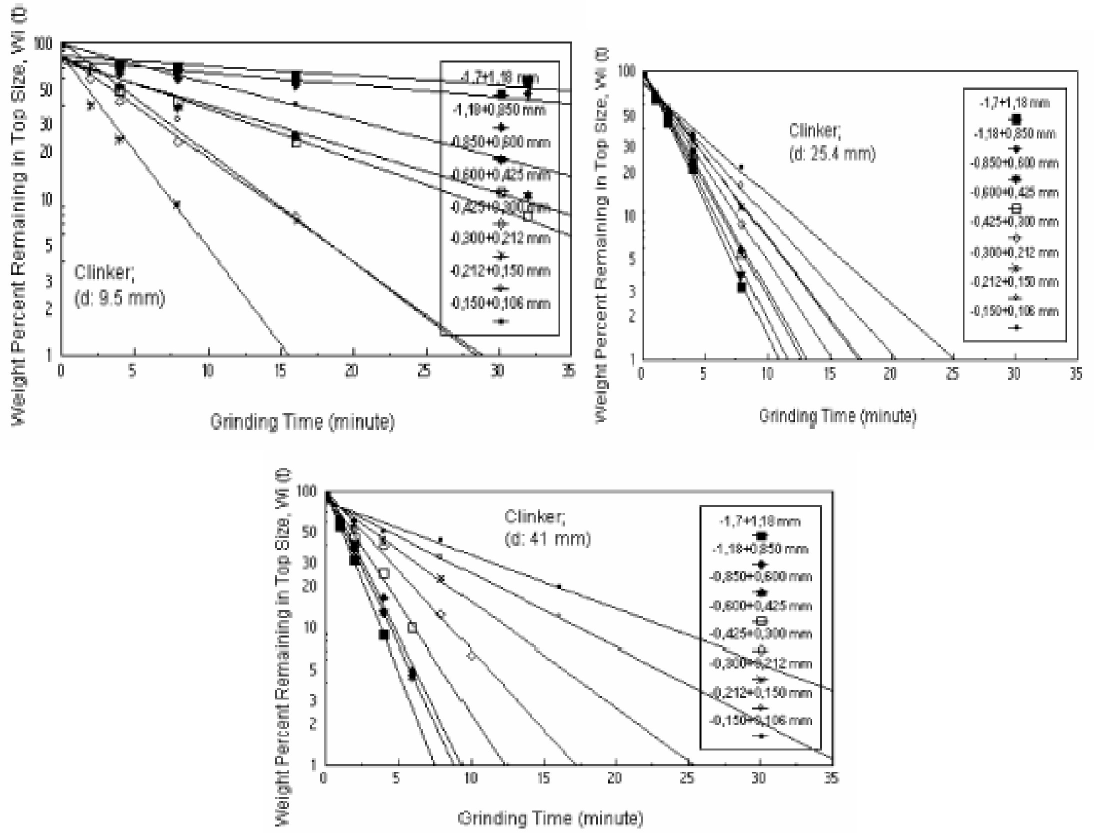
Mill	Diameter and length		200 mm	
	Volume		6280 cm^3	
Mill	Critical	97 rpm	101 rpm	105 rpm
Speed	Operational (ϕ_c = 75%)	72 rpm	76 rpm	79 rpm
Balls	Diameter	9.5 mm	25.4 mm	41 mm
	Specific gravity, g/cm^3		7.8	
	Assumed porosity		40%	
	Ball filling volume fraction (J)		20% (J = 0.2)	
Material	Specific gravity, g/cm^3	Clinker; 3.0	Trass; 2.33	Limestone; 2.69
	Interstitial filling (U)		52.5% (U = 0.525)	
	Powder filling volume (f_c)		4.2% (f_c = 0.042)	

براي آزمايش اصلي ۸ فراكسيون(-۱/۷+۱/۱۸)، (-۱/۱۸+۰/۸۵۰) (-۰,۸۵۰+۰,۶۰۰)، (-۰,۶۰۰+۰,۴۲۵) ، (-۰,۴۲۵+۰,۳۰۰)، (-۰,۳۰۰+۰,۲۱۲) ، (-۰,۲۱۲+۰,۱۵۰) و (-۰,۱۵۰+۰,۱۰۶) از هر كدام از مواد آماده كرده، و به منظور تعيين توابع شكست در زمانهاي ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ ، ۳۰ و ۳۵ دقيقه خردايش گرديدند. سپس هر نمونه از آسيا خارج شده و جهت تعيين آناليز ابعادي، سرند(آناليز سرندي خشك) گرديد.

۴- نتايج و بحث

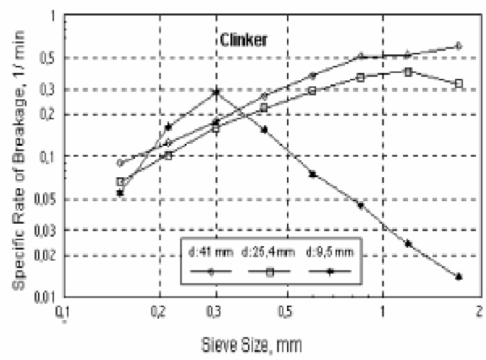
نمودارهاي مرتبه اول براي نمونه هاي سنگ آهک، تراس و كلينكر(در قطرهاي مختلف گلوله(۹/۵، ۲۵/۴، ۴۱ ميليمتر)) در شكلهاي ۱۱-۳ ارائه شده است.

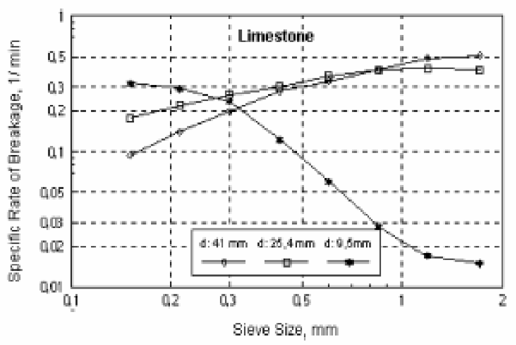




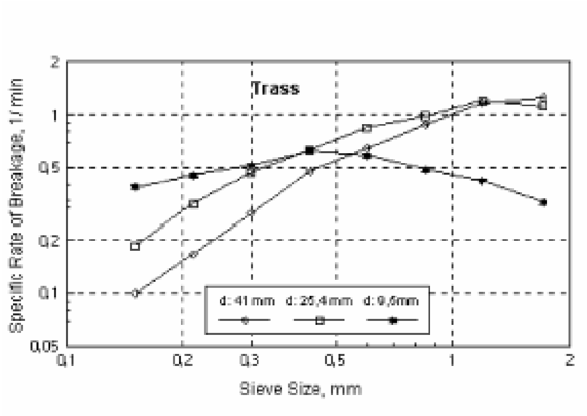
شکلهاي (۳) تا (۱۱)- نمودار درجه اول براي سنگ آهک، تراس و کلينکر در در قطرهاي مختلف گلوله(۹/۵، ۲۵/۴، ۴۱ ميليمتر))

نتايج نشان داد که به طور کلي شکستها از سينيتيک درجه اول پيروي مي کنند و مقادير S_i از شيب خط مستقيم نمودارهاي درجه اول به دست مي آيد. بعلاوه، شکلهاي ۱۴-۱۲ مقادير (S_i) را براي اندازه هاي مختلف گلوله بعنوان تابعي از اندازه ارائه داده است.





شکل (۱۳)- نرخهاي ويژه شکست کلينکر　　شکل (۱۲)- نرخهاي ويژه شکست سنگ آهك



شكل (۱۴)- نرخهاي ويژه شكست تراس

Austin و همكاران معادله زير را براي تغيير S_i با اندازه خوراک بيان كردند. اين معادله مقادير آزمايشي را در دامنه اندازه ذرات كوچک، (اما نه براي ذرات درشت) مي تواند توضيح دهد. Snow نشان داد كه بين S_i و اندازه خوراک رابطه زير برقرار است :

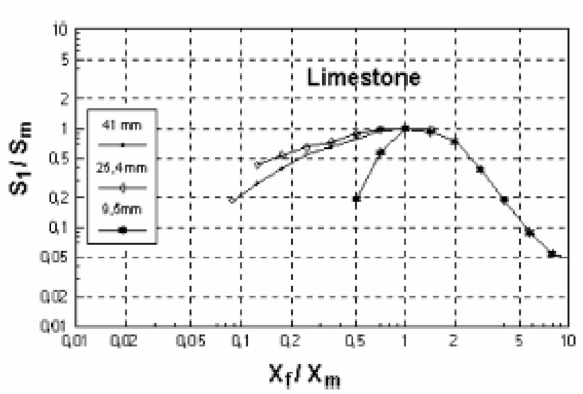
$$\frac{S_1}{S_m}=\left(\frac{X_f}{X_m}\right)^{\alpha}\exp\left(-\frac{X_f}{X_m}\right)$$

كه X_m اندازه خوراكي است كه در آن اندازه S_1 بيشترين مقدار را دارد.snow نشان داده است كه رابطه بين تابع انتخاب غير نرمال و اندازه خوراک تقريبا به شكل معادله (۴) مي تواند بين گردد، اما مطابقت نتايج آزمايشي و محاسبه اي كامل نيست. سپس Kotake و همكاران به يک تابع نمايي در معادله snow رسيدند كه به صورت معادله زير مي تواند اين ارتباط را بيان كند:

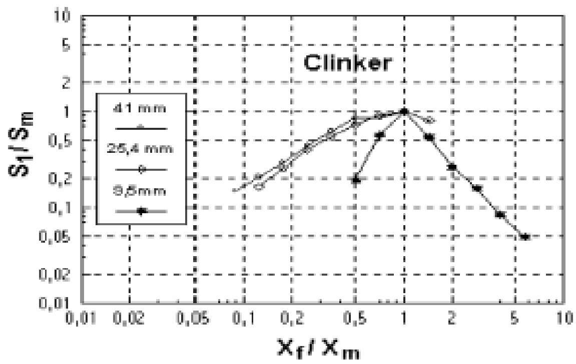
$$\left(\frac{S_1}{S_m}\right)=\left(\frac{X_f}{X_m}\right)^{\alpha}\exp\left(-c\,\frac{X_f-X_m}{X_m}\right)$$

اين معادله نشان مي دهد كه بر اساس نتايج كاهش ابعادي در آسياي گلوله اي از واكنش بين گلوله ها و ذرات و ماهيت اين مكانيزم، اگر مواد خوراک متغير شوند، تغيير نخواهد كرد. معادله ۵ به خوبي مي تواند نتايج تجربي آزمايشيات صورت گرفته را توضيح دهد، اضافه مي نمايد از برازش منحني ها، مقادير تجربي $c=1.01$ ، $c=1.33$ و $c=1.01$ به ترتيب براي سنگ آهک، تراس و كلينكر به دست آمده است.

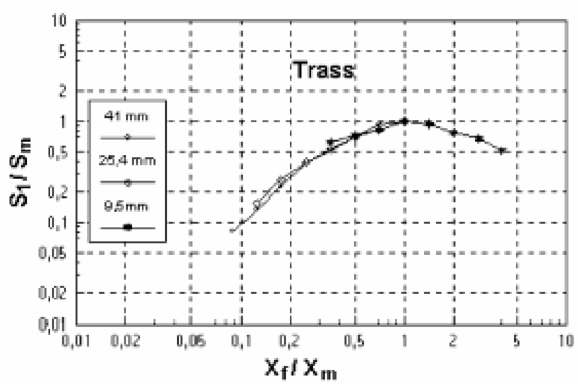
شكلهاي ۱۵-۱۷ رابطه بين اندازه بهينه خوراک و قطر گلوله براي سنگ آهک، تراس و كلينكر را نشان مي دهد.



شكل (۱۵)- نوسان نرخهاي ويژه شكست بااندازه خوراك غيرهندسي براي سنگ آهك

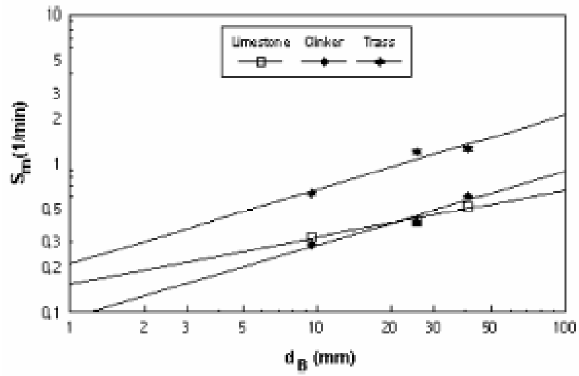


شكل (۱۶)- نوسان نرخهاي ويژه شكست بااندازه خوراك غيرهندسي براي كلينكر



شكل (۱۶)- نوسان نرخهاي ويژه شكست بااندازه خوراك غيرهندسي براي كلينكر

رابطه مشابه براي خردايش با آسياي گلوله اي است. در اين آزمايشات معادله ۸-۶ به ترتيب براي سنگ آهک، کلينکر و تراس به دست آمده است. شکل ۱۸ رابطه بين بيشترين مقدار نرخ ويژه شکست(تابع انتخاب) و قطر گلوله (d_b) مواد سيمان را نشان مي دهد.



شکل (۱۸)- رابطه مقدار ماکزیمم نرخ شکست با قطر گلوله

معادلات ۱۱-۹ براي خطوط موازي در شكل ۱۹ نشان داده شده است.

$$X_m = 0.0034 d_B{}^{1.725} \qquad \text{limestone}$$

$$X_m = 0.020 d_B{}^{1.217} \qquad \text{clinker}$$

$$X_m = 0.050 d_B{}^{0.962} \qquad \text{trass}$$

$$S_m = 0.155 d_B{}^{0.313} \qquad \text{limestone}$$

$$S_m = 0.091 d_B{}^{0.493} \qquad \text{clinker}$$

$$S_m = 0.212 d_B{}^{0.499} \qquad \text{trass}$$

با تركيب معادلات ۶ و ۹، معادلات ۷ و ۱۰ و ۸ و ۱۱ نرخ ويژه شكست براي هر نوع از مواد سيمان مي تواند با اندازه خوراک و قطر گلوله به صورت زير بيان شود :

$$S_1 = C_1 d_B{}^m X_f{}^{\alpha} \left(-C_2 \frac{X_f}{d_B{}^n} \right)$$

كه C_1، C_2، m و n و α مقادير ثابت هستند و به طور خلاصه در جدول ۳ آورده شده است.

مقادير آزمايشات با نتايج محاسباتي با معادله ۱۲ در شكلهاي ۲۲-۲۰ با هم مقايسه شده اند. معادله ۱۲ اغلب بررسي مقادير آزمايشي را در دامنه وسيعي از ذرات پاسخگوست و هنگامي كه هدف ارزيابي نرخ ويژه شكست در عمليات واقعي باشد، مفيد است.

۵- نتيجه گيري

در اين مطالعه، آزمايشهاي خردايش ناپيوسته با مواد سيمان در آسياي گلوله اي انجام شد و تاثير اندازه خوراک و قطر گلوله بر روي نرخ ويژه شکست مورد بررسي قرار گرفت. تغييرات نرخ ويژه شکست(تابع انتخاب) غيرنرمال با اندازه خوراک تقريبا قابل قياس است و مقدار آن بستگي به قطر گلوله ها و نوع مواد دارد.

همانطور که مشاهده مي شود اختلاف کمي بين مقادير آزمايشي و محاسباتي براي کلينکر وجود دارد زيرا کلينکر به صورت يک محصول مصنوعي تشکيل مي شود.

بر اساس مطالعه فوق رابطه بين اندازه خوراک بهينه و قطر گلوله استنتاج شد و همچنين رابطه بين بيشترين نرخ شکست و قطر گلوله نيز براي مواد به دست آمد.