



مهندس سید کسری سید مصطفوی  
مؤلف اصلی این مقاله، دانشجوی  
کارشناسی ارشد سرامیک در  
دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و  
تحقیقات می‌باشند.

kasra1364@yahoo.com

# بررسی آسیاب‌های گلوله‌ای به کار گرفته شده در صنعت سیمان و تاثیر شارژهای تغییر شکل یافته بر کارآیی آنها

سید کسری سید مصطفوی<sup>۱</sup>، سعید باغشاهی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی علوم و تحقیقات  
<sup>۲</sup> دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

**چکیده:** بر طبق آمارها، انرژی اتلافی در آسیاب‌های گلوله‌ای مقدار بالایی است. علاوه بر عواملی چون سرعت بحرانی آسیاب‌ها، زاویه سقوط، جنس و نوع گلوله‌ها بر بازده آسیاب‌ها عوامل دیگری چون دفرمگی شارژ بر بازده آسیاب‌ها تاثیر گذار است که در این مقاله بر روی این موارد بیشتر بحث شده است. با تغییر شکل یافتن شارژ گلوله‌ها در آسیاب‌های گلوله‌ای مصرف انرژی ۱۸٪ بیشتر بوده و همچنین محصول نهایی نیز ۹٪ از حالت ایده‌آل دورتر است.  
**کلمات کلیدی:** آسیاب گلوله‌ای، کارآیی، شارژ گلوله سالم، شارژ گلوله تغییر شکل یافته.

## ۱- مقدمه

در دیدگاه و روش‌های سنتی دو پارامتر بلین و زبری سیمان تولیدی اندازه‌گیری می‌شود. اما این دو پارامتر به تنهایی خواص کیفی سیمان را بازگو نمی‌کنند. بلین روشی برای اندازه‌گیری سطح ویژه است که توسط عبور هوا از بستر سیمان اندازه‌گیری می‌شود. بررسی نشان می‌دهد که پارامتر بلین به تنهایی نمی‌تواند اثر پدیده نرمی را بر خواص سیمان به‌خصوص مقاومت سیمان توجیه کند [۱ و ۲]. سیمان‌های با بلین یکسان می‌توانند دارای توزیع دانه‌ندی متفاوت باشند. پس می‌توان گفت آزمایش بلین یک معیار کامل برای ارزیابی نرمی سیمان نیست. از سوی دیگر پارامتر زبری روی الک ۹۰ میکرومتر نمی‌تواند شاخص مناسبی برای ارزیابی دانه بندی سیمان بر مقاومت آن باشد. آخرین بررسی‌ها روی اثرات دانه بندی بر مقاومت سیمان نشان می‌دهد که ذرات بزرگتر از ۳۰ میکرومتر نقش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت سیمان ندارند [۳-۵]. بنابراین لزوم توجه بیشتر به بحث توزیع دانه‌بندی سیمان و پارامترهای مربوط به آن کاملاً واضح است.

برای روشن شدن موضوع منطقی‌ترین راه و روش آن است که هر فرایند تولیدی با توجه به خواص ویژه شیمیایی و مینرالوژیکی و اکتیواسیونی مربوط نسبت به دانه‌بندی سیمان خود در فراکسیون‌های مختلف از الک‌های میکرومتری تا الک‌های با ابعاد بزرگتر اقدام کرده و سپس با اختلاط آن‌ها با ترکیب درصدی متفاوت یک الگوی تاثیر دانه‌بندی بر مقاومت سنین مختلف ایجاد کند:

برخی از نتایج مربوط به تاثیر دانه‌بندی بر استحکام نشان می‌دهد که [۶]:

- (۱) ذرات خیلی ریز اثر عمده‌ای در مقاومت سیمان سنین زودرس سیمان (۱ و ۲ و ۳ روزه) دارند که این ذرات در برخی مقالات تا ۳ میکرومتر و در برخی تا ۷ میکرومتر معرفی شده‌اند.
- (۲) در برخی از مقالات ذرات ۵ تا ۲۵ میکرومتر و در برخی دیگر ذرات ۳ تا ۳۰ میکرومتر، به‌عنوان مناسب‌ترین دامنه موثر بر مقاومت ۲۸ روزه سیمان شناخته شده‌اند.



علاوه بر دو فاکتور بلین و ضریب یکنواختی در ارزیابی توزیع دانه‌بندی، شاخص سومی با عنوان پارامتر نرمی (X) در تعیین نرمی و مقاومت سیمان نیز کاربرد دارد [۳]. این پارامتر مشخص کننده الکی است که  $63/2\%$  ذرات از آن عبور می‌کنند چراکه این پارامتر به‌عنوان شاخص مجزایی در تعیین نرمی سیمان و نتایج آن بر مقاومت شناخته می‌شود [۶].

۱) سیمان‌های تجاری دارای پارامتر نرمی بین ۱۵ تا  $31/3$  میکرومتر هستند پس می‌تواند شاخص مناسبی از دیدگاه نرمی برای مقایسه سیمان‌های مختلف باشد.

۲) تقریباً  $63/2\%$  از ذرات سیمان پایین‌تر از این اندازه هستند که بخش قابل توجهی از سیمان را به خود اختصاص می‌دهد.

۳) بهبود یکنواختی (n) لزوماً به معنی نرمی سیمان نیست بلکه یک محصول کاملاً زبر نیز می‌تواند دارای ضریب یکنواختی بالایی باشد [۷].

با این توضیحات می‌توان دریافت که اندازه ذرات بر روی خواص سیمان بسیار موثر است که نشات گرفته از روند عملکرد آسیاب گلوله‌ای یا همان بال‌میل است. در این مقاله به بررسی عملکرد این آسیاب‌های گلوله‌ای و چگونگی تاثیر بر روی محصول نهایی با تغییر پارامترهای موثر آن، پرداخته شده است.

## ۲- فعالیت‌های تجربی

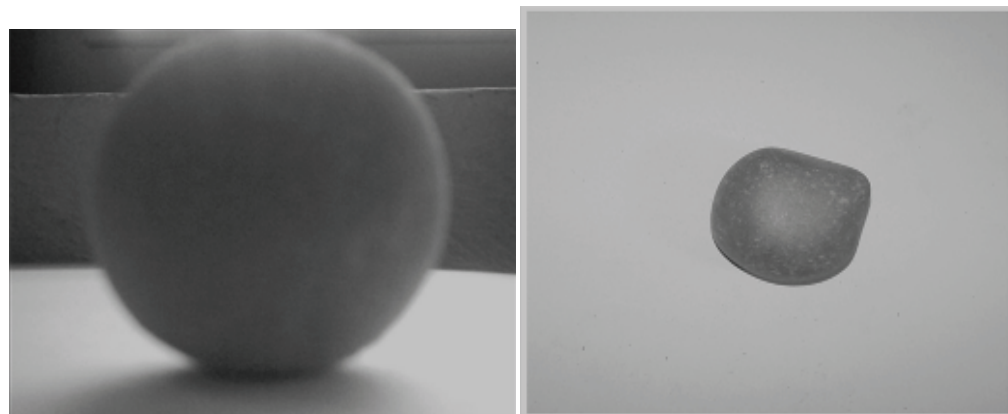
دستگاه آسیاب گلوله‌ای آزمایشگاهی که این دسته آزمایش‌ها با آن انجام شد، بر اساس یک آسیاب تک اتاقچه‌ای طراحی شده است. طول اتاقچه ۵۳ سانتیمتر و قطر آن ۴۸ سانتیمتر است. آستری از جنس ورق صاف ضد سایش است و مقدار توان الکتروموتور برابر  $1/5$  کیلو وات و سرعت آسیاب برابر ۴۴ rpm است. حجم کل آسیاب برابر  $0/959$  متر مکعب است. طبق استانداردها، توصیه شده است که حداکثر شارژ مجاز لازم حفظ شود و حتی‌الامکان وزن گلوله‌ها تا حد مجاز افزایش یابد. در نتیجه می‌بایست  $25\%$  تا  $30\%$  حجم آسیاب را با شارژ یا گلوله پر کرد. گلوله‌ها از جنس کرومیت هستند و برای بهتر نتیجه گرفتن در انجام آزمایش‌ها و کم کردن خطا، از شارژهای استفاده شد که نو نبوده و قبلاً در آسیابی مورد استفاده قرار گرفته بودند و به اصطلاح آب دیده شده‌اند. علت استفاده نکردن از شارژهای نو، خوردگی بالا در سطح آن‌ها است که باعث ایجاد خطا در آزمایش‌ها می‌شود. جنس گلوله‌ها باید طوری انتخاب شود که سایش آن‌ها در نقاط مختلف آن (در سطح و عمق) تفاوتی وجود نداشته باشد، چرا که ممکن است گلوله‌ها به شکل کروی (در شارژهای سالم) خارج شده و بازده سایش آسیاب کاهش ایجاد کنند و باعث خطا در آزمایش شوند.

تعیین اندازه گلوله‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. اگر شارژها خیلی بزرگ باشند، تعداد تماس‌هایی که موجب شکست می‌شود کاهش می‌یابد و اگر خیلی کوچک باشند، یکدسته تماس‌های اتلاف‌کننده انرژی صورت می‌گیرد. مناسب‌ترین اندازه گلوله تابعی از خواص مواد، اندازه مواد، طول آسیاب، قطر آسیاب و نوع سیستم (باز یا بسته) است که بهترین اندازه شارژ برای این ابعاد آسیاب شارژهای با قطر ۳۰ میلیمتر بود. بهترین حالت استفاده از گلوله‌هایی با اندازه‌های مختلف است که در اتاقچه‌های مختلف هستند ولی امکانات آسیاب اجازه استفاده از چند گلوله‌هایی را نداد.

با توجه به هدف اصلی پروژه که بررسی کارایی آسیاب‌های گلوله‌ای و تفاوت شارژ گلوله سالم و تغییر شکل یافته است، برای انجام آزمایش‌ها به دو دسته شارژ گلوله نیاز است. همان طور که اشاره شد، می‌بایست  $25\%$  تا  $30\%$  حجم آسیاب را شارژ گلوله پر کند. درصد پر شدگی  $25/2\%$  تعیین شده است. حجم کل آسیاب برابر  $416/67$  کیلوگرم است که مقدار  $25/2\%$  آن  $112/5$  کیلوگرم است طبق استاندارد وزن هر گلوله ۳۰ میلی‌متری ۱۱۱ گرم است که  $112/5$  کیلوگرم تقریباً ۲۰۰۰ گلوله است.

شارژ گلوله‌های سالم، تغییر شکل کمتر از  $10\%$  تفاوت در دو قطر در گلوله و بین  $10$  تا  $20\%$  تغییر شکل را

شارژ دفرمه تعریف شد. منظور از ۱۰ تا ۲۰٪ دفرمگی در گلوله‌های ۳۰ میلی‌متری یعنی تفاوت دو قطر گلوله بین ۳ تا ۶ میلی‌متر باشد. نمونه‌ایی از شارژ گلوله سالم و تغییر شکل یافته در شکل ۱ الف و ب آمده است.



شکل ۱- الف) نمونه شارژ گلوله دفرمه، ب) نمونه شارژ گلوله سالم

بر طبق گفته درسnel<sup>۱</sup> و لورلند<sup>۲</sup> نسبت شارژ گلوله به مواد برای دستیابی به نرمی بیشتر باید بزرگتر باشد که تنظیم آن بر طبق نرمی مطلوب، بیشترین صرفه جویی در مصرف برق را به دنبال دارد. مدلییر<sup>۳</sup> نسبت بین مواد و شارژ گلوله موجود در آسیاب را ۱ به ۸ یا ۱ به ۱۰ گزارش کرده است [۴] که در این آزمایش‌ها نسبت ۱ به ۸ انتخاب شده است. در نتیجه مقدار مواد مصرفی در هر مرتبه از آزمایش ۱۰ کیلوگرم کلینکر تعیین شد که آنالیز شیمیایی متوسط دو نمونه آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. وزن مخصوص این کلینکر برابر ۳/۲ gr بود و برای آزمایش‌ها بلین نیز مقدار ۳/۲ gr از این کلینکر استفاده شد.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی نمونه کلینکر

|        | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  |
|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|
| کلینکر | 23.58            | 4.78                           | 3.36                           | 63.7 | 3.67 |

برای هر دسته از آزمایش‌ها یک دسته آزمایش با شارژ گلوله سالم و یک دسته با شارژ گلوله تغییر شکل یافته انجام شده است و برای کم کردن خطا و رسیدن به عددی دقیق‌تر، ۴ مرتبه هر مرحله از آزمایش‌ها تکرار شد.

### ۳- نتیجه و بحث

هدف از این آزمایش‌ها، تفاوت محصول نهایی آسیاب شارژ گلوله سالم با شارژ گلوله دفرمه است. بلین، درصد موادی که روی الک ۹۰ میکرومتر مانده، یا درصد موادی که روی الک ۲۰۰ میکرومتر مانده است و همچنین توزیع اندازه ذرات مواردی بودند که مورد بررسی قرار گرفتند.

برای مشاهده تفاوت میان انرژی مصرفی میان آسیاب دارای شارژ گلوله سالم و مقایسه آن با آسیاب دارای شارژ گلوله دفرمه، مقدار برق مصرفی در هر مرتبه از آزمون اندازه‌گیری شد. قبل از شروع آزمایش‌ها، برای اطمینان از سلامت دستگاه، برق مصرفی برای آسیاب بدون مواد اولیه دو مرتبه مورد بررسی قرار گرفت و با مقایسه آن‌ها سلامت آن مورد تایید قرار گرفت. وزن مواد اولیه کلینکر ۱۰ کیلوگرم و وزن شارژ گلوله‌ها برابر ۱۱۲/۵ کیلوگرم بود.

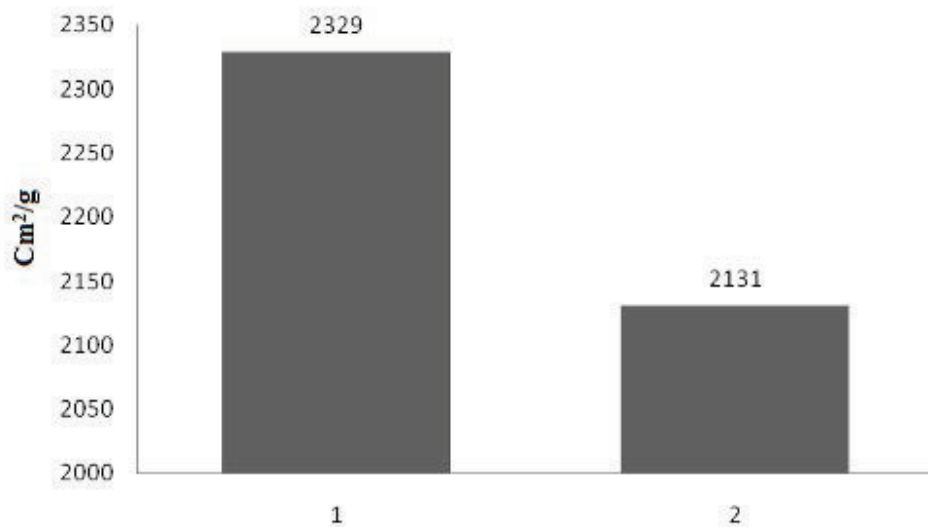
نتیجه بلین به‌دست آمده از آزمایش‌ها با شارژ گلوله سالم و مقایسه با شارژ گلوله دفرمه در شکل ۲ نشان

<sup>1</sup> Dersnal  
<sup>2</sup> Loreland  
<sup>3</sup> Madulier

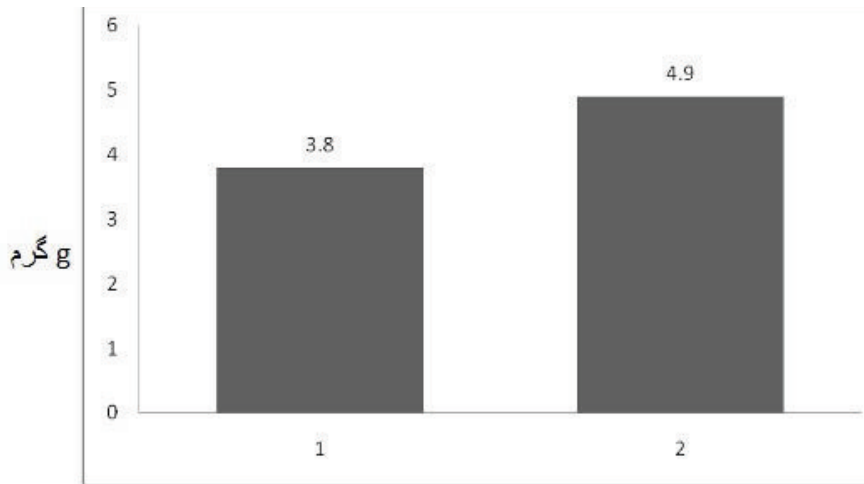
می‌دهد که مقدار بلین با شارژ گلوله سالم ۹/۲۹٪ نسبت به شارژ گلوله‌های دفرمه بیشتر (تغییر شکل یافته) است. باقی مانده روی الک ۹۰ میکرومتر و باقی مانده روی الک ۲۰۰ میکرومتر با هم مقایسه شد (شکل ۳ و ۴) باقی مانده روی الک ۲۰۰ میکرومتر در دو حالت فرق چندانی ندارد ولی مقدار باقی مانده روی الک ۹۰ میکرومتر در حالت دفرمه، مقدار بیشتری را نشان می‌دهد (شکل ۳).

جدول ۲- پارامترهای مربوط به کلینکر آسیاب شده

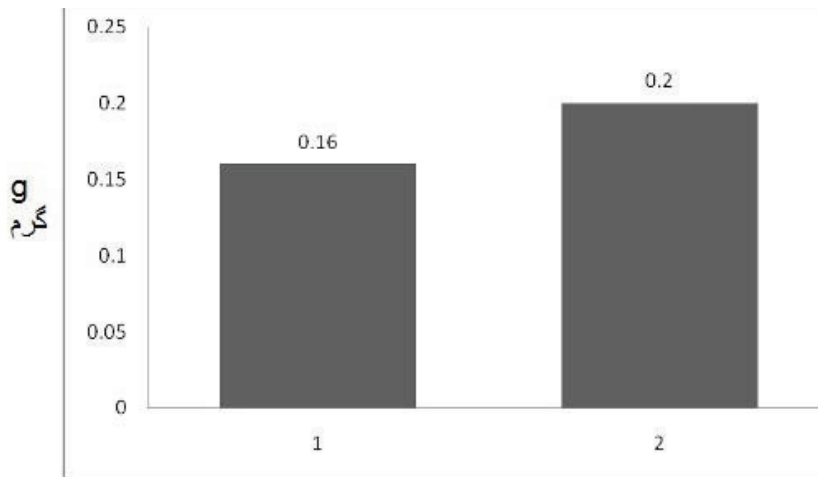
| نوع شارژ | بلین<br>Cm <sup>2</sup> /g | درصد مانده روی الک<br>۲۰۰ میکرومتر | درصد مانده روی<br>الک ۹۰ میکرومتر | زمان سایش<br>(min) | انرژی مصرفی<br>کد نمونه |
|----------|----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|-------------------------|
| سالم     | 2346                       | 0.2                                | 4.8                               | 22                 | 1KS11 321801            |
| سالم     | 2570                       | 0.1                                | 2.8                               | 26                 | 1KS12 374634            |
| سالم     | 2317                       | 0.2                                | 4.4                               | 26                 | 1KS21 374634            |
| سالم     | 2099                       | 0.2                                | 4.4                               | 26                 | 1KS31 365028            |
| دفرمه    | 2195                       | 0.2                                | 5.2                               | 26                 | 1KD11 365028            |
| دفرمه    | 2099                       | 0.2                                | 4.4                               | 26                 | 1KD21 384240            |
| دفرمه    | 2099                       | 0.2                                | 5.2                               | 26                 | 1KD31 379437            |
| دفرمه    | 2257                       | 0.2                                | 3.6                               | 29                 | 1KD32 427467            |
| سالم     | 3059                       | 0.4                                | 4                                 | 40                 | 2KS11 576360            |
| سالم     | 2597                       | 0.4                                | 4.8                               | 35                 | 2KS21 504318            |
| سالم     | 2874                       | 0.4                                | 3.6                               | 40                 | 2KS31 614784            |
| دفرمه    | 2898                       | 0.4                                | 3.6                               | 40                 | 2KD11 585966            |
| دفرمه    | 2751                       | 0                                  | 2.8                               | 40                 | 2KD21 576360            |
| دفرمه    | 3104                       | 0.4                                | 1.2                               | 45                 | 2KD31 667617            |



شکل ۲- مقایسه بلین میانگین نمونه های بدست آمده از شارژ گلوله سالم (۱) و شارژ گلوله دفرمه (۲)

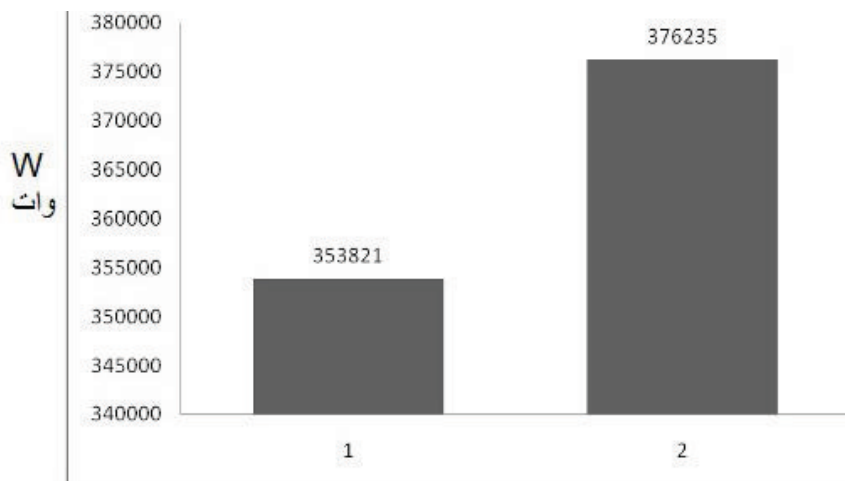


شکل ۳- مقایسه باقی مانده روی الک ۹۰ میکرومتر نمونه‌های بدست آمده از شارژ گلوله سالم (۱) و شارژ گلوله دفرمه (۲)



شکل ۴- مقایسه باقی مانده روی الک ۲۰۰ میکرومتر نمونه‌های بدست آمده از شارژ گلوله سالم (۱) و شارژ گلوله دفرمه (۲)

نتایج نشان می‌دهد که دانه‌های خروجی از آسیاب دارای گلوله‌های دفرمه ۲۸/۹۴٪ درشت‌تر از دانه‌های خروجی دارای گلوله‌های آسیاب سالم است. مقایسه برق مصرفی دو حالت آسیاب با شارژ گلوله سالم و شارژ گلوله‌های دفرمه در صورتی که مدت زمان آسیاب نیز ثابت باشد، قابل تعمق است (شکل ۵).

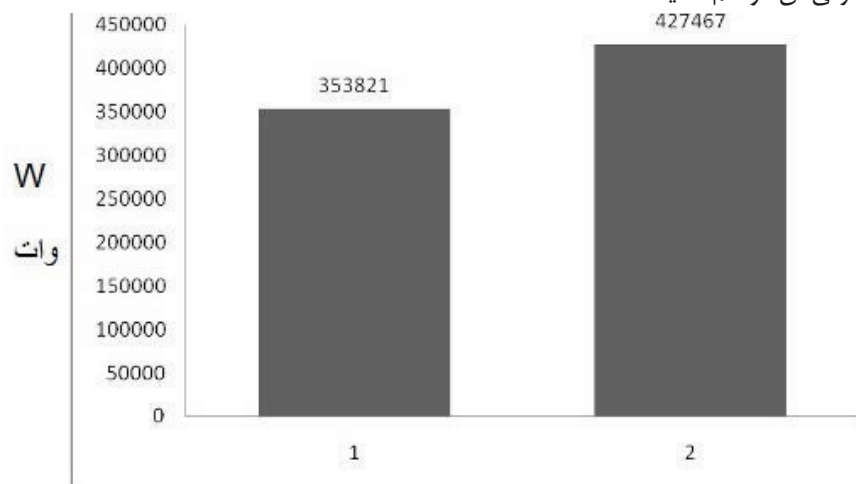


شکل ۵- مقایسه برق مصرفی آسیاب نمونه‌های شارژ گلوله سالم (۱) و شارژ گلوله دفرمه (۲)

برق مصرفی آسیاب با شارژ گلوله‌های دفرمه مقدار بیشتری است. زمان در این حالت ثابت بود و نتایج نشان می‌دهد که حتی با ثابت بودن زمان برق مصرفی ۶/۳۴٪ بیشتر است. منشاء این تفاوت اصطکاک بیشتری است که بین گلوله با گلوله و همچنین گلوله‌ها و ماده اتفاق می‌افتد. ولی به علت شکل نامناسب گلوله‌ها، ضربات کامل به مواد وارد نمی‌شود و عمل خردایش ناقص صورت می‌گیرد.

همچنین در حالتی که به زمان ثابت است (۲۶ دقیقه)، محصول خروجی به بلین مورد نظر نمی‌رسد. اگر بلین ثابت در نظر گرفته شود، یعنی آسیاب شامل شارژ دفرمه آن قدر کار کند تا به بلین  $3000 \text{ Cm}^2/\text{g}$  برسد، آنگاه تفاوت برق مصرفی به صورت شکل ۶ است.

در شکل ۷، آسیاب دارای شارژ گلوله دفرمه (۲)، ۳ دقیقه بیشتر کار کرده است تا به بلین با شارژ سالم برسد و برق مصرفی آن دو هم مقایسه شده است.

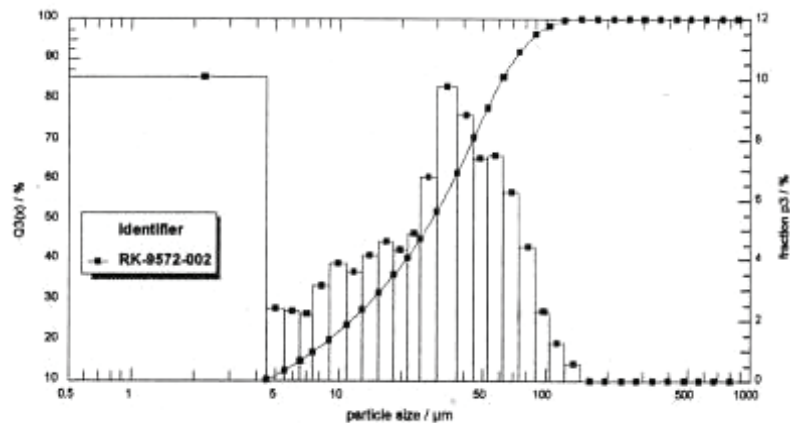


شکل ۶- مقایسه برق مصرفی آسیاب نمونه‌های شارژ گلوله سالم (۱) و شارژ گلوله دفرمه (۲) با فرض ثابت بودن بلین

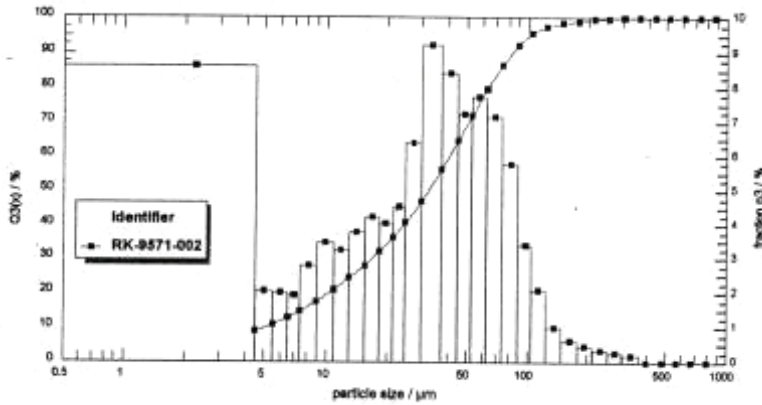
همان طور که توضیح داده شد، بلین هر دو نمونه یکی است ولی آسیاب با شارژ دفرمه ۲۰/۸۱٪ برق بیشتر مصرف کرده تا به بلین  $3000 \text{ Cm}^2/\text{g}$  برسد.

### ۳-۱- نتایج پارتیکل سائز

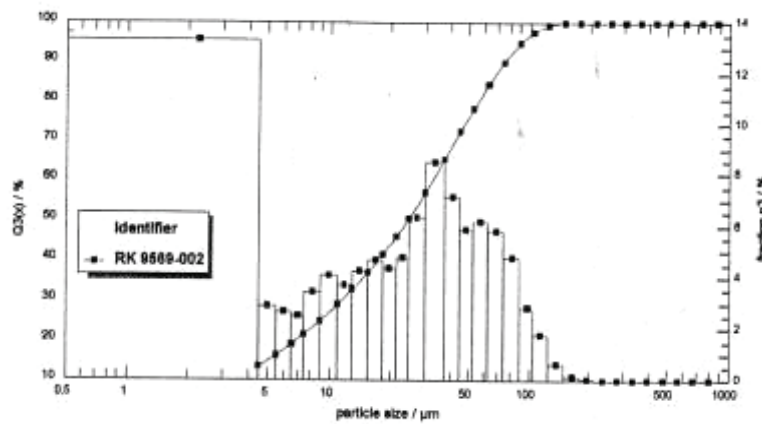
در شکل ۷ الف-د، چگونگی توزیع اندازه ذرات برای نمونه‌های مختلف آورده شده است. همان طور که قابل مشاهده است اندازه ذرات محصول خروجی آسیاب با شارژ گلوله سالم از توزیع یکنواخت‌تر و نزدیک به استاندارد برخوردار هستند. توزیع اندازه ذرات به شکل زنگوله، الگویی است که بهترین حالت را معرفی می‌کند.



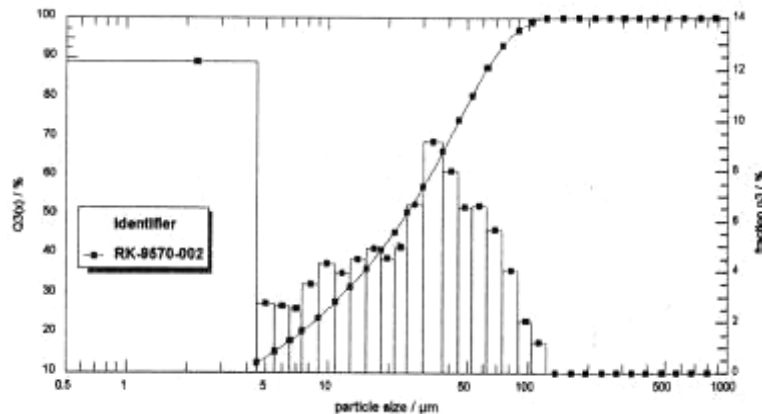
شکل ۷- الف) نمونه 1KS12 - سائش با شارژ سالم- بلین: ۲۵۷۰- زمان سائش ۲۶ دقیقه- الک: ۰,۱-۲,۸



شکل ۷-ب) نمونه 1KD11 - سایش با شارژ دفرمه- بلین: ۲۱۹۵ - زمان سایش ۲۶ دقیقه- الک ۰,۲ - ۵,۲



شکل ۷-ج) نمونه 2KS11- سایش با شارژ سالم برای رسیدن به بلین ۳۰۰۰- بلین ۳۰۵۹- الک ۴ - ۰,۴  
زمان سایش ۴۰ دقیقه



شکل ۷-د) نمونه 2KD21 - سایش با شارژ دفرمه برای رسیدن به بلین ۳۰۰۰- بلین ۲۷۵۱- الک ۲,۸: ۰ -  
زمان سایش ۴۰ دقیقه.

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج نشان داد که با ۱۰ تا ۲۰٪ (۳ تا ۶ میلی متر) دفرمگی در شارژ گلوله‌های یک آسیاب، محصول خروجی ۹/۲۹٪ از بلین پایین‌تر، ۲۸/۴۹٪ دانه‌ها درشت‌تر، ۲۰/۸۱٪ مصرف برق بالاتر است. یعنی با ۱۰ تا ۲۰٪ دفرمگی هزینه آسیاب‌ها ۲۰/۸۱٪ افزایش یافته است. نتیجه آن که برای رسیدن به محصول نسبتاً ایده‌آل باید زمان بیشتری صرف شود که از هیچ لحاظ به صرفه

نیست. اما متأسفانه مشاهده می‌شود که در اغلب کارخانجات سیمان ارزیابی روند سایش گلوله‌ها و کارایی آن‌ها مورد توجه قرار نمی‌گیرد.

## مراجع

- [1] D. Marinov, T. Penzov, S. Kostov, E. Spasov, "New sensor system for ball mill control", Mining Magazine, London, Sept. 1991.
- [2] مهندس امیرمسعود خرازی، مرجع تکنولوژی کامل سیمان، تولید و کاربرد، انتشارات نشر طرح، ۱۳۸۶.
- [3] W. Duda. "Cement-Data- Book", Wiesbaden, 1968.
- [4] C. Hewlett (Ed) Lea's Chemistry of Cement and Concrete: 4th Ed, Arnold, 1998.
- [5] عباس طالب، سیمان، انتشارات مرکز تحقیقات سیمان، دانشگاه علم و صنعت.
- [6] چهرگانی، آسیاب‌های گلوله‌ای، انتشارات سیمان تهران، ۱۳۸۲.
- [7] عباس طالب، افزایش بازده آسیاب‌های گلوله‌ای سیمان، مرکز تحقیقات سیمان، دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۷۷.